

Université Mohamed Chérif
Messadia Souk Ahras

Mohamed Chérif Messadia University
Souk-Ahras



جامعة محمد الشريف مساعديّة
سوق أهراس

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

**TRANSESTERIFICATION PAR CATALYSE
BASIQUE POUR LA PRODUCTION DE BIODIESEL
A PARTIR DES HUILES DE FRITURES**

Filière

Génie des Procédés

Spécialité

Génie Chimique

Par

Bechgaoui Zakaria

DIRECTEUR DE MEMOIRE : M. OUZZAR

MAB

U.SOUK-AHRAS

Devant le jury

PRESIDENT: H. GHODBANE

Pr

U.SOUK-AHRAS

EXAMINATEUR : S. BOURANENE

Pr

U.SOUK-AHRAS

N°..... /2024

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH pour tous ce qu'il m'a offert.

*Je tiens à remercier vivement mon directeur de mémoire, **Mr. OUZZAR Mohamed laid**, de m'avoir offert la chance de travailler sur ce sujet, de m'avoir guidé et orienté. Je la remercier pour la confiance et le soutien morale, pour toute sa générosité.*

Nous remercions les membres du jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égard nous présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude sans oublier les ingénieurs des laboratoires de génie des procédés.

Mes chaleureuses remerciements à tous mes enseignants tout au long de mes études depuis l'école primaire jusqu'à l'université.

Le plus grand merci à mes parents pour m'avoir fourni tous les exigences d'étude et de vie.

Dédicace

Ce jour-là mon rêve que j'attendais depuis des années d'études, s'est réalisé et le mérite en revient à ma généreuse famille grâce à leur aide, leur amour, leurs encouragements et leur soutien pour moi

Je dédie ce mémoire :

A ma chère mère et A mon cher père

Dédicace à ma mère vous n'été pas pour moi qu'une simple Maman, mais vous représentez pour moi le symbole du sacrifice, de la force et de la fierté, que dieu te donne longue vie merci pour ta bonne éducation.

*À mon encadreur **Dr Ouzzar Mohamed laid.***

Une spéciale dédicace encore à mon cher frère Abd erraouf Qui m'a orientée et m'a encouragée.

À mes amis : Rostom, Islem, Ilyes.

À toute La Famille Bechgaoui tous ceux qui me sont chers.

A mon cher frère A ma plus belle sœur au monde

BECHGAOUI ZAKARIA

ملخص

تزايد الاهتمام بالوقود الحيوي كبديل نظيف و مستدام للوقود الاحفوري مما ادى الى التركيز على استغلال الموارد المتجددة مثل الزيوت النباتية المستعملة. لديهم ميزة تقليل التلوث و الانبعاثات الغازات المسبة للاحتباس الحراري مع تقليل الاعتماد على النفط و تنوع مصادر الطاقة .وقود الديزل الحيوي يتم الحصول عليه من زيت نباتي او حيواني يتم تحويله بواسطة عملية الاسترة التبادلية.

هدف هذه الدراسة هو انتاج وقود الديزل الحيوي من خلال تحسين عدة عوامل تؤثر على الاستجابة مثل زمن التفاعل كمية المحفز المستعملة و نسبة الزيت / الميثانول.

اظهرت النتائج المتحصل عليها ان اعلى مردود كان (98%) في الظروف التشغيلية المثلى التالية باستخدام 200 غ من زيت القلي (زيت مستعمل) مع 40 غ من الميثانول و (1%) KOH المستخدم كمحفز عند درجة حرارة 60 درجة مئوية و تفاعل لمدة 90 دقيقة.

الخصائص الفيزيائية و الكيميائية المحددة مثيرة للاهتمام للغاية و تقترب من تلك الموجودة في الديزل التجاري.

كلمات مفتاحية : وقود الديزل حيوي ، استرة تبادلية ، زيت مستعمل ،محفز.

Résumé

L'intérêt pour les biocarburants comme alternative propre et durable aux carburants fossiles est en augmentation, ce qui a conduit à une focalisation sur l'exploitation des ressources renouvelables telles que les huiles végétales usagées. Ils ont l'avantage de réduire la pollution et les émissions de gaz à effet de serre tout en réduisant la dépendance au pétrole et en diversifiant l'approvisionnement énergétique, Le biodiesel est un biocarburant obtenu à partir d'huile végétale ou animale transformée par transestérification.

L'objectif de cette étude est de synthétiser du biodiesel en optimisant plusieurs facteurs influençant la réaction, tels que le temps de réaction, la quantité de catalyseur utilisée, le ratio massique huile / Méthanol.

Les résultats obtenus ont montré que le meilleur rendement était ($R = 98\%$) dans les conditions opératoires optimales suivantes : en utilisant 200 g d'huile de friture avec 40g de méthanol et 2g de catalyseur KOH (1%) utilisée comme catalyseur à cette température 60°C et pour temps de réaction 90 min.

Les propriétés physico-chimiques déterminées sont très intéressantes et proches de celle du diesel commerciale.

Mots clés : Biodiesel, transestérification, huile usagée, catalyseur.

Abstract

Interest in biofuels as a clean and sustainable alternative to fossil fuels is increasing, leading to a focus on utilizing renewable resources such as used vegetable oils. Biofuels help reduce greenhouse gas emissions and decrease dependence on oil, Biodiesel is a biofuel obtained from vegetable or animal oil transformed by transesterification.

The objective of this study is to synthesize biodiesel by optimizing several factors influencing the reaction time, amount of catalyst used, and the oil/ methanol mass ratio.

The results showed that the highest yield (R=98%) was achieved under operating conditions : using 200g of used frying oil with 40g of methanol and 2g of KOH catalyst (1%) at temperature (60°C) and a reaction time of 90 min.

The determined physic-chemical properties are very promising and close to those of commercial diesel.

Keywords: biodiesel, Transesterification, used oil, catalyst.

LISTE DES FIGURES

Figure II.1: Schéma simplifié de la synthèse du biodiesel	15
Figure II.2: Réactions successives de la transestérification	16
Figure II.3: Mécanisme de la réaction de la transestérification d'huile végétale par l'alcool catalysée par une base	16
Figure II.4: Procède de la transestérification basics	23
Figure II.5: procède de transestérification acide	25
Figure III.6: Dispositif de la réaction de transestérification	28
Figure III.7: La décantation du mélange	29
Figure III.8: Lavage du biodiesel	30
Figure III.9: Produit final de biodiesel	31
Figure III.10: Viscosimètre à vibration SV-10	33
Figure III.11: pH mètre Hanna.....	34
Figure IV.12: Effet de la durée de la réation sur le rendement en biodiesel.....	36
Figure IV.13: Effet de la concentration du catalyseur sur le rendement en biodiesel.....	37
Figure IV.14: Effet de ratio massique sur le rendement en biodiesel.....	38
Figure IV.15: Effet de la nature des catalyseurs sur le rendement de transestérification.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les différentes marques d'huiles alimentaires fabriquées en Algérie.....	11
Tableau III.2 : Réactifs et Equipements.....	16
Tableau III.3 : Paramètres étudiés.....	27
Tableau IV.4 : Résultats d'analyse la densité.....	31
Tableau IV.5 : Résultats d'analyse la viscosité.....	40
Tableau IV.6 : Résultats d'analyse le potentiel d'hydrogène.....	41
Tableau IV.7 : Paramètres physico-chimiques du biodiesel.....	42

Liste des abréviations

EMHV : Ester méthylique d'huile végétale.

EMAG : Ester Méthylique d'Acide Gras (FAME : Faty Acide Methyl Ester).

GES : Gaz à effet de serre.

HC: Hydrocarbures.

ISO: International Organization for Standardization.

WCO: waste cocking oil.

DG: Diglycérides.

MG : Monoglycérides.

D 20 : Densité à 20° C.

PH : potentiel d'hydrogène.

EN : European norm.

HVU : Huiles végétales usagées.

NO_x : Oxydes d'azote

Sommaire

REMERCIEMENTS

DEDICACES

ملخص

RESUME

Abstract

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Introduction générale..... 1

Chapitre I.1 : Biocarburants

I.1. Biocarburant 5

I.2. Différents types de biocarburant 5

I.2.1. Biogaz5

I.2.2. Bioéthanol6

I.2.3. Biodiesel6

I.3. Générations du biodiesel 7

I.3.1. Biodiesel de première génération7

I.3.2. Biodiesel de deuxième génération.....7

I.3.3. Biodiesel de troisième génération8

I.4. Types des huiles utilisées 9

I.4.1. Huile de soja	9
I.4.2. Huile de Coton	9
I.4.3. Huile de Jatropha	9
I.4.4. Huile de maïs	9
I.4.5. Huile de tournesol	10
I.4.6. Huile de Micro algue	10
I.4.7. Huile de friture	10
5. Impact des biocarburants sur l'environnement	11
6. Impact sur l'Economie	12
I.7. Sources des huiles végétales	12
I.7. Avantages et inconvénients de biodiesel	13
I.7.1. Avantages	13
I.7.2. Inconvénients	13

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

II.1. Transestérification	15
II.2. Etapes de transestérification	17
II.2.1. Séparation	17
2.2. Récupération de l'alcool	17
2.3. Neutralisation du glycérol	17

2.4. Lavage du biodiesel.....	18
2.5. Séchage	18
II.3. Caractéristiques du biodiesel.....	18
II.3.1. Viscosité	18
II.3.2. Densité	19
II.3.3. Indice de cétane.....	19
II.3.4. Pouvoir lubrifiant.....	19
II.3.5. Indice de réfraction (IR)	20
II.3.6. Indice d'acidité	20
II.3.7. Indice de saponification.....	20
II.3.8. Teneur en eau	20
II.3.9. Indice d'iode	21
II.4.1. Rapport molaire alcool/huile	21
II.4.2. Nature de l'alcool	21
II.4.3. Type du catalyseur	22
II.4.3.1. Catalyseurs homogènes	22
II.4.3.2. Catalyseurs hétérogènes	24
II.4.4. Température.....	25
II.4.5. Temps.....	25

Chapitre III: Etude expérimentale

26	III.1. Matériels et méthodes	27
	III.1. Réactifs chimiques	27
	III.2. Calculs de la quantité de réactifs	27
	III.3. Synthèse du biodiesel	28
	III.3.1. Dispositif expérimental	28
	III.3.2. Etapes de la réaction	29
	III.3.4. Etape du lavage	30
	III.3.5. Etape du séchage	30
	III.3.6. Rendement en biodiesel	31
	4. Paramètres étudiés	31
	III.5. Caractéristiques physico-chimiques du biodiesel	32
	III.5.1. Analyses physiques	32
	III.5.2. Analyse chimique	34

Chapitre IV. Résultats et discussions

	IV.1. Effet de la durée de la réaction de transestérification	36
	IV.2. Effet de la quantité du catalyseur	37
	IV.3. Effet du rapport massique	38
	IV.4. Influence du type de catalyseur	39
	IV.5. Caractérisation du biodiesel	39

IV.5.1. Densité	39
IV.5.2. Viscosité	40
IV.5.3. Potentiel d'hydrogène pH	42
Conclusion générale	43
Conclusion générale	44

Références Bibliographiques

Introduction générale

Introduction

Introduction

La production de l'énergie fossile pour le besoin de l'humanité est le principal facteur de l'émission des gaz à effet de serre (GES), en particulier le CO₂ dans l'atmosphère. Les combustibles fossiles émettent jusqu'à 98% de carbone donc une réduction de leurs utilisation permettra bien de réduire le niveau de dioxyde de carbone et de polluants. [1]

Le contrôle de ces émissions repose sur le développement de technologies qui émettent pas ou peu de carbone comme le nucléaire, l'hydrogène, le solaire, l'éolien et la géothermie ainsi sur des stratégies innovantes pour capturer et éliminer le dioxyde de carbone émis lors de la combustion de combustibles fossiles. [2] La pollution atmosphérique causée par le pétrole est au cœur des débats internationaux portant sur le changement climatique, le protocole de Kyoto 1997 a porté dans ce contexte des mesures visant à réduire les émissions en gaz à effet de serre à savoir le CO₂ généré par la combustion du pétrole. [3]

De plus que l'industrie pétrolière est bénéfique sur le plan économique des pays producteurs, elle mène à engendrer beaucoup de dommages sur les êtres humains, l'environnement, les opérations terrestres et maritimes, la destruction des habitats et l'atteinte à la biodiversité à travers le réchauffement de la planète due à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les déversements de pétrole, les fuites accidentelles lors du transport eux aussi ont endommagé la faune et la flore menant à des catastrophes écologiques graves. [3]

Ainsi, les réserves du pétrole et du gaz vont s'épuiser vu leurs consommation massive. Les scientifiques ont mis le point sur la faisabilité et la commercialisation des énergies renouvelables, ainsi que sur le recyclage des déchets. Dans l'ensemble, les prévisions s'accordent sur un début de décroissance de la production mondiale de combustibles fossiles entre 2010 et 2050 et un épuisement des réserves ultimes au cours du prochain siècle. [4]

La plupart des pays du monde ont commencés à réagir face à cette situation et cela en dirigeant la boussole vers des ressources d'énergie renouvelables, moins polluantes et moins couteuses tout en boostant le travail de recherche scientifique. En 2006, la biomasse et les déchets (58%), l'hydroélectricité (31%), l'énergie éolienne, géothermique et solaire (12%)

Introduction

était les principales sources d'énergie renouvelable utilisée dans le monde. De plus, différents types d'huiles comestibles et non comestibles, comme l'huile de cuisson et les graisses animales ont été utilisées comme combustible dans les moteurs à allumage par compression ou comme matière première dans la production de biocarburants. [5]

Ces crises énergétiques, comme les chocs pétroliers ou les pénuries de carburants fossiles, ont souvent marqué l'histoire des biocarburants. Par exemple, les gazogènes qui génèrent un gaz énergétiquement faible ont été développés pendant la dernière Guerre mondiale, et la majorité des productions actuelles en Europe, aux États-Unis et au Brésil ont été influencées par les crises pétrolières de 1973, 1979 et d'autres crises géopolitiques. Cependant, il est également possible de mettre en valeur les biocarburants dans des situations où les sites de production ou de distribution des produits pétroliers sont éloignés des lieux de consommation, en plus de l'existence de ressources locales à exploiter. Dans ces circonstances, ils jouent un rôle purement énergétique en tant que carburant de remplacement. [6]

Le défi majeur de la production de biodiesel c'est d'avoir une source de matière première rentable, disponible et moins coûteuse ce qui rend le produit économiquement rentable par rapport au diesel normal. L'utilisation des huiles de friture usagées constitue une nouvelle alternative pour réduire les coûts de production car elles sont moins chères. Ces huiles ont de nombreux impacts environnementaux lorsqu'elles sont rejetées dans les réseaux d'assainissement d'où l'intérêt de les valoriser en biodiesel.

Le grand nombre des paramètres influençant le procédé de production de biodiesel par transestérification des huiles de friture usagées est devenu un problème complexe dans la recherche de la production optimale. La méthodologie des plans d'expériences sert à résoudre cette problématique d'optimisation et permettent d'organiser au mieux les essais expérimentaux. L'optimisation des paramètres du processus en utilisant un plan d'expériences est l'étape clé pour obtenir une qualité élevée sans inflation des coûts. Cet outil a été mise en œuvre de manière efficace pour évaluer l'efficacité de la production du biodiesel.

Introduction

Dans ce travail, on propose la préparation et le contrôle de qualité d'un biodiesel synthétisé en exploitant les huiles de friture usagées. Cela entre dans le cadre de recyclage et de valorisation des déchets et des rejets.

Ce mémoire est subdivisé en deux parties :

La première partie est une synthèse bibliographique répartie en deux chapitres focalisant respectivement sur les biocarburants et le procédé de transestérification ainsi que sur l'optimisation de cette dernière en étudiant l'effet des paramètres opératoires sur la repense de cette technique.

La deuxième partie est consacrée pour le côté expérimental. Le travail au laboratoire a commencé par une étude paramétrique des facteurs influençant le rendement en biodiesel de l'estérification, et il a terminé par l'étude des propriétés physico-chimiques du biodiesel produit.

Ces deux parties sont précédées par une introduction générale et terminées par une conclusion générale qui représente le bilan du travail accompli dans cette étude.

Chapitre I.1 : Biocarburants

Chapitre I.1 : Biocarburants

Chapitre I.1 : Biocarburants

I.1. Biocarburant

C'est un carburant liquide ou gazeux provenant de sources biologiques renouvelables telles que les huiles végétales, les graisses animales, la biomasse algale...etc. Les biocarburants sont durables, moins polluants avec une sécurité d'approvisionnement. Les principaux types de biocarburants sont : Le biodiesel, qui est un carburant produit par le traitement catalytique de l'huile végétale et peut être utilisé directement dans les moteurs diesel sans modifications. Le bioéthanol comme substituant de l'essence, la plupart des moteurs à essence ne peuvent pas fonctionner au bioéthanol sans modification et le biogaz ou biométhane. [7]

Donc, les biocarburants se distinguent des autres sources d'énergie non fossiles par leur provenance des matériaux biologiques. En outre, peu importe la nature des biocarburants, il est évident que c'est une énergie durable et renouvelable car elle provient de sources végétales et animales, ce qui autorise leur remplacement après une période limitée. [6]

I.2. Différents types de biocarburant

I.2.1. Biogaz

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de Méthane (CH_4) et de gaz carbonique (CO_2). Suivant sa provenance, il contient aussi des quantités variables d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré (H_2S), d'oxygène, de composés organo-halogénés (chlore et fluor) et des métaux lourds, ces deux dernières familles chimiques étant présentes à l'état de traces. Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie de matières organiques animales ou végétales, qui se déroule en trois étapes (hydrolyse, acidogène et méthanogène) sous l'action de certaines bactéries, il se déroule spontanément dans les centres d'enfouissement des déchets municipaux, mais on peut le provoquer artificiellement en appliquant la technique de méthanisation dans des enceintes appelées "digesteurs" où l'on introduit à la fois les déchets organiques solides ou liquides et les cultures bactériennes. [8]

Chapitre I.1 : Biocarburants

I.2.2. Bioéthanol

Le bioéthanol provient de la fermentation alcoolique de sucres simples par des levures, les sucres simples sont obtenus à partir de la biomasse. Les sources de la matière première pour la fabrication du bioéthanol sont :

Les sucres simples ou amidon hydrolysé (dégradé) provenant des plantes consommables (canne à sucre, maïs, etc.), ce sont des agro-carburants.

Les déchets végétaux de différentes natures (comme les résidus forestiers, les copeaux provenant de scieries ou de papeteries, etc.) qui contiennent une grande quantité de cellulose (éthanol cellulosique) qui peut être hydrolysée pour former du sucre simple fermentable. L'éthanol produit lors de cette fermentation est combustible et peut être incorporée dans les carburants classiques en tant qu'additifs. Il est également utilisé comme matière première pour la production d'autres carburants, notamment dans des moteurs spécifiquement conçus pour cette utilisation. Le taux d'éthanol peut atteindre 85 %, mais un taux inférieur de 5 à 10% est peut être ajouté aux carburants des voitures, sans avoir besoin de modifier les moteurs. [8]

I.2.3. Biodiesel

Obtenu à partir de plantes oléagineuses (colza, tournesol, soja...), de graisses animales ou d'huiles alimentaires déjà utilisées, par estérification, une réaction chimique qui transforme les corps gras en esters méthyliques d'acides gras (EMAG) en utilisant un catalyseur pour transestérifier. Ce procédé permet de produire de la glycérine et du biodiesel. [8]

Ce dernier est un substitut du carburant diesel, biodégradable produit par transformation d'huiles d'origine végétales, animales ou usées en esters alkyliques. Il est moins polluant, renouvelable, non toxique. Ce biocarburant est produit en estérifiant les acides gras libres présents dans les huiles végétales ou les graisses animales, puis en transestérifiant les huiles estérifiées avec des alcools à chaîne courte en présence d'un catalyseur. Les catalyseurs utilisés afin de produire le biodiesel sont : Les alcalis, les acides ou les enzymes. Des esters méthyliques d'acides gras (FAME) et un sous-produit qui est le glycérol résultent à la fin de la réaction de transestérification. Le biodiesel est peut être utilisé dans les actuelles voitures diesel sans modification majeure des moteurs, par rapport au petro-diesel, ce biocarburant a

Chapitre I.1 : Biocarburants

l'avantage de réduire les émissions de particules cancérogènes, il possède un pouvoir lubrifiant et une biodégradabilité accrue ainsi qu'une facilité de manipulation, de transport et de stockage. Afin de rendre le prix du biodiesel compétitif par rapport au pétrodiesel, des matières premières peu coûteuses sont utilisées, telles que les huiles non comestibles ou les huiles de friture usagées. [9]

I.3. Générations du biodiesel

I.3.1. Biodiesel de première génération

Les biocarburants de première génération sont fabriqués à partir de sucre, d'amidon et d'huile végétale. Parmi ces biocarburants, il y en a de nombreux qui ne sont pas compétitifs par rapport aux combustibles fossiles et qui peuvent menacer l'approvisionnement alimentaire et la biodiversité. [10]

I.3.2. Biodiesel de deuxième génération

Ces biocarburants proviennent de cultures lignocellulosiques et à base de matériaux obtenus à partir de cultures non alimentaires (bois, feuilles, paille...). On a fait recours à ce type de biocarburant parce que la fabrication des biocarburants de la première génération présente des limites importantes. Les principales matières premières pour la production des biocarburants de la deuxième génération sont : L'huile végétale usagée, les résidus forestiers, les résidus industriels et la biomasse durable. [10]

Actuellement, des technologies sont développées afin d'exploiter les matières celluloseuses. Par exemple, on peut trouver du bois des feuilles et des tiges de plantes ou des déchets. Ces substances sont appelées biomasse lignocellulosique, car elles sont issues de composants lignocellulosiques. Les fibres ligneuses ne sont pas directement employées dans la fabrication des aliments. L'avantage de ces attributs réside dans leur disponibilité accrue et leur absence de concurrence alimentaire. [11]

Chapitre I.1 : Biocarburants

I.3.3. Biodiesel de troisième génération

Il s'agit des agro carburants à partir de micro-algues ou les Algo-carburants. Les microalgues peuvent fournir différents types d'énergies renouvelables. Il s'agit notamment du méthane produit par la digestion anaérobie des algues, du biodiesel dérivé de l'huile des microalgues ainsi que de la production d'hydrogène par photobiologie [12]

L'utilisation des micro-algues comme carburant n'est pas une idée récente, mais elle commence à être sérieusement considérée en raison de l'augmentation des prix. [12]

Les algues entraînent la production de tous les types de biocarburants tels que le biodiesel, l'essence, le butanol, le propanol et l'éthanol à haut rendement, environ 10 fois plus élevé que la deuxième génération de biocarburant. La culture de la biomasse contribue également au maintien de l'équilibre de l'environnement en consommant le CO₂ présent dans l'atmosphère [13]. La production de biocarburants à partir d'algues dépend généralement de la teneur en lipides des microorganismes. Habituellement, des espèces telles que les chlorelles sont ciblées en raison de leur teneur élevée en lipides (environ 60 à 70 %) et leur productivité élevée. En règle générale, les algues produisent de 1 à 7 g/L/j de biomasse dans des conditions de croissance idéales. [10]

Étant donné que les biocarburants de deuxième et troisième générations sont neutres en carbone et peuvent réduire la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ils sont supérieurs à ceux de la première génération en termes de développement durable. Par exemple, le biodiesel de 1^{ère} génération (comme le soja) induit seulement une réduction nette des émissions de gaz à effet de serre de 41%. En revanche, certains auteurs estiment que pour chaque tonne de biomasse de micro algues produite, 1,8 tonne de dioxyde de carbone sera consommée (une réduction de 180%). [13]

Chapitre I.1 : Biocarburants

I.4. Types des huiles utilisées

I.4.1. 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. [14]

I.4.2. Huile de Coton

Classée au rang de la cinquième huile alimentaire mondiale la plus consommée, l'huile de coton est peu connue en Europe mais très développée dans les pays africains producteurs de Coton comme le Burkina, le Togo, le Mali, le Tchad, le Cameroun, la Côte-d'Ivoire, etc. Cette huile est d'abord utilisée dans la cuisson des aliments. Elle est, par la suite valoriser énergétiquement pour produire de l'électricité. C'est le cas depuis 1988 des sociétés Cotonnières du Mali et du Tchad. [15]

I.4.3. Huile de Jatropha

Huile de Jatropha Le Porchère est un arbuste des zones arides pouvant atteindre une hauteur de 4 à 5 m au bout de 3 à 4 ans de croissance. Cet arbuste nécessite très peu d'eau et de nutriments pour sa croissance. Sa culture dans les zones menacées de désertification assure la protection du sol de l'érosion et la rétention d'eau. C'est une plante oléagineuse dont son rendement moyen en huile est de 1892 litres/ha/an. [14]

I.4.4. 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. [16]

Chapitre I.1 : Biocarburants

I.4.5. 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 [16]

I.4.6. Huile de Micro algue

Les micros algues sont des algues d'une taille réduite. La richesse en huile de certaines de ces espèces peut atteindre plus de 50 % de leur masse. Ces micros algues présentent des opportunités. Assez captivantes non seulement en raison de leur teneur en huile, mais aussi en raison de leur croissance rapide qui permet de réaliser des récoltes complètes en seulement quelques jours. Dans cette optique, les scientifiques américains, japonais, français et allemands ont envisagé de fabriquer à grande échelle du carburant à base d'huile d'algues. [17]

I.4.7. Huile de friture

Les huiles végétales usagées désignent les résidus de matières grasses, principalement provenant de plantes, utilisées lors des opérations de friture pour l'alimentation humaine, l'industrie agroalimentaire et la restauration commerciale. Collective, mais aussi par les individus. [18]

Comme toutes les activités économiques, le domaine de la restauration génère des déchets, en particulier des huiles alimentaires usagées, principalement des huiles de friture. Le fait de convertir ces huiles usées en biodiesel permet d'éviter leur rejet dans le réseau. Les installations de traitement des eaux et l'environnement sont donc soumis à des problèmes d'assainissement. Selon toutes les recherches, l'emploi des huiles de cuisson (friture) usées est plus avantageux que celui des huiles pures. Le biodiesel fabriqué à partir des huiles usées a un

Chapitre I.1 : Biocarburants

coût de production non seulement plus bas que celui des huiles vierges, mais aussi plus bas que celui du diesel. [19]

Tableau I.1 : Les différentes marques d'huiles alimentaires fabriquées en Algérie [20]

ELIO	80% Soja, 20% Tournesol
FLEURIAL	100% Tournesol
AFIA	95% Soja, 5% Maïs
HUILOR	100% Tournesol
BONAL	100% Soja
LYNOR	90% Soja, 10% Palme
SAFIA	100% Soja
LANELE	100% Soja

5. Impact des biocarburants sur l'environnement

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, la majorité des recherches soutiennent l'avantage des biocarburants par rapport aux carburants fossiles. [21]

Ainsi la fabrication de biocarburants peut avoir des conséquences bénéfiques sur la diversité des espèces sauvages et de l'agriculture en favorisant la restauration des sols. [22]

Dans de nombreux cas, la pénurie d'eau, plus que celle des sols, pourrait être le principal obstacle à la production de matières premières pour les biocarburants. L'agriculture utilise environ 70 % de l'eau douce prélevée à l'échelle mondiale.

En raison de la concurrence croissante avec les usages domestiques ou industriels, les ressources en eau agricoles deviennent de plus en plus rares dans de nombreux pays. De plus, les conséquences prévues du changement climatique en ce qui concerne la diminution des précipitations et du ruissellement dans certaines grandes régions productrices (comme le Proche-Orient, l'Afrique du Nord et l'Asie du Sud) vont accroître la pression sur des ressources déjà limitées. [22]

Chapitre I.1 : Biocarburants

Les huiles de friture usagées sont à l'origine de nombreux problèmes tels que les obstructions et les odeurs de rance nauséabondes lorsqu'elles s'échappent dans les tuyaux de drainage puis dans le réseau d'assainissement, cela implique donc des coûts financiers importants pour les restaurants et les municipalités pour le débouchement des égouts et la gestion de ces résidus indésirables [23]. L'huile de friture utilisée un certain nombre de fois devient impropre à la consommation humaine, elle peut entraîner des problèmes de santé graves ainsi que des risques tels que les risques gastro-intestinaux et même la mutagenèse chez le corps humain. Les changements physico-chimiques qui se produisent dans l'huile de friture comprennent principalement : le changement de couleur, odeur, viscosité, nombre de calories. Les huiles de friture usagées peuvent ainsi conduire à de graves problèmes environnementaux tel que : un litre d'huile versé dans les eaux naturelles peut polluer 500 000 litres d'eau. [24]

6. Impact sur l'Economie

En raison de leur faible coût et de leur grande disponibilité, Les huiles de friture usagées présentent une alternative prometteuse pour la synthèse de biodiesel, leur coût est deux à trois fois inférieur à celui des huiles végétales raffinées. La production du biodiesel n'a pas été largement commercialisée vu son coût élevé, alors, développer une méthode globale pour minimiser le coût du biodiesel peut résoudre ce problème. La synthèse du biodiesel à partir de l'huile de friture usagée ainsi que l'optimisation des paramètres du processus qui influent sur le rendement et la qualité peuvent s'avérer comme des méthodes prometteuses pour minimiser le coût du processus. [25]

I.7. Sources des huiles végétales

En théorie, il est possible d'utiliser n'importe quelle source de corps gras pour fabriquer du biodiesel. Toutefois, certaines sources sont plus ou moins appréciées en fonction des pays. De cette manière, aux États-Unis, les producteurs font appel à l'huile de soja. Ils sont les plus performants. De leur côté, les Brésiliens utilisent diverses sources d'huile en raison de la diversité biologique du pays. Par exemple, le nord du pays se concentre principalement sur l'huile de palme et de soja, tandis que le centre se concentre principalement sur l'huile de colza. [17]

Chapitre I.1 : Biocarburants

I.7. Avantages et inconvénients de biodiesel

I.7.1. Avantages

Le biodiesel est une alternative à l'énergie fossile, car ses réserves sont aussi restreintes que celles d'autres combustibles fossiles. Dans des conditions naturelles, le biodiesel peut aisément se décomposer, et plus de 90% des biodiesels purs peuvent être dégradés en quelques semaines.

Le biodiesel présente une valeur combustible plus élevée par rapport au diesel et à l'essence courants, ce qui le rend relativement sécurisé à conserver et à transporter.

Le biodiesel présente une quantité significativement réduite de soufre, ce qui permet non seulement de diminuer la quantité de substances toxiques présentes dans les gaz d'échappement, mais également de garantir la lubrification des pièces mobiles pendant le fonctionnement du moteur. La réduction d'autres substances nocives comme les PA HS et les NOx est due à une concentration élevée d'oxygène et à une combustion plus complète du carburant. La production nette de dioxyde de carbone pourrait également être supprimée par le biodiesel pur ou mélangé. [26]

I.7.2. Inconvénients

La viscosité élevée et le stress de surface entraînent des gouttes plus importantes qui peuvent causer des problèmes avec le système d'injection de carburant.

La présence de composés insaturés dans l'huile végétale est bien supérieure à celle du diesel, ce qui rend le biodiesel de celui-ci plus oxydable. Ce critère est associé à la quantité d'iode.

Coût plus élevé en raison des matériaux utilisés. Aujourd'hui, le biodiesel est fabriqué à partir d'huile de soja aux États-Unis et de pétrole d'arachide dans l'Union européenne

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

II.1. Transestérification

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.

Dans le procédé de transestérification, un mélange de catalyseur et d'alcool est ajouté à l'huile à transformer. [27]

La transestérification est la réaction entre une huile pure composée majoritairement de triglycérides avec un alcool pour former des esters d'alkyl et du glycérol, elle consiste en trois réactions consécutives et réversibles. Les triglycérides sont convertis en diglycérides, puis en monoglycérides et finalement en glycérol. Une molécule d'ester d'alkyl se forme à chaque étape. Un catalyseur et un excès en alcool sont souvent utilisés pour améliorer la vitesse de réaction et le rendement et pour déplacer l'équilibre vers le produit en raison du caractère réversible de la réaction. [28]

L'équation de la réaction sont s'écrit (Figure II.1) :

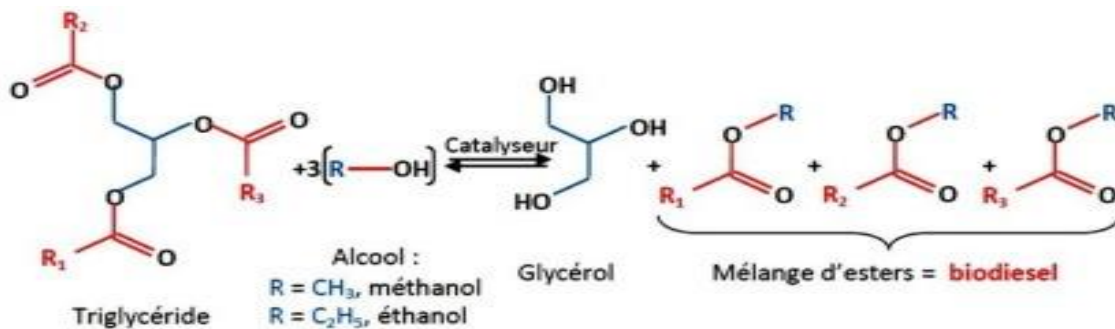


Figure II.1: schéma simplifié de la synthèse du biodiesel

La production de biodiesel est donnée par la réaction de transestérification, qui se compose de trois réactions consécutives et réversibles. Tout d'abord, le triglycéride est converti en

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

diacylglycérol, puis en mono glycéride et en glycérine. À chaque réaction, une mole d'esters méthyliques est libérée, comme le montre (Figure II.2) :

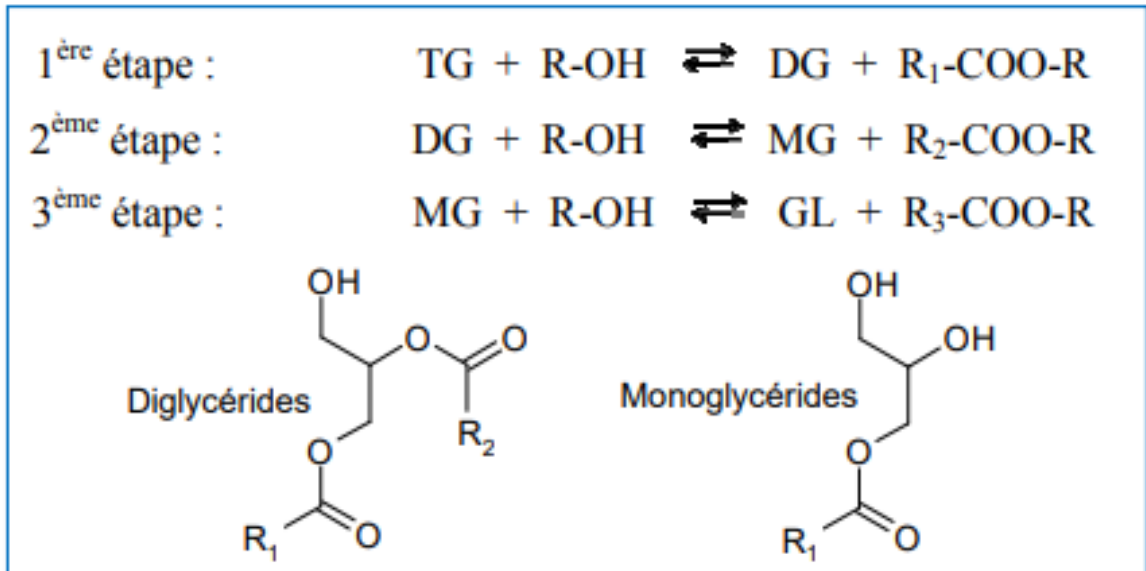


Figure II.2: Réactions successives de la transestérification

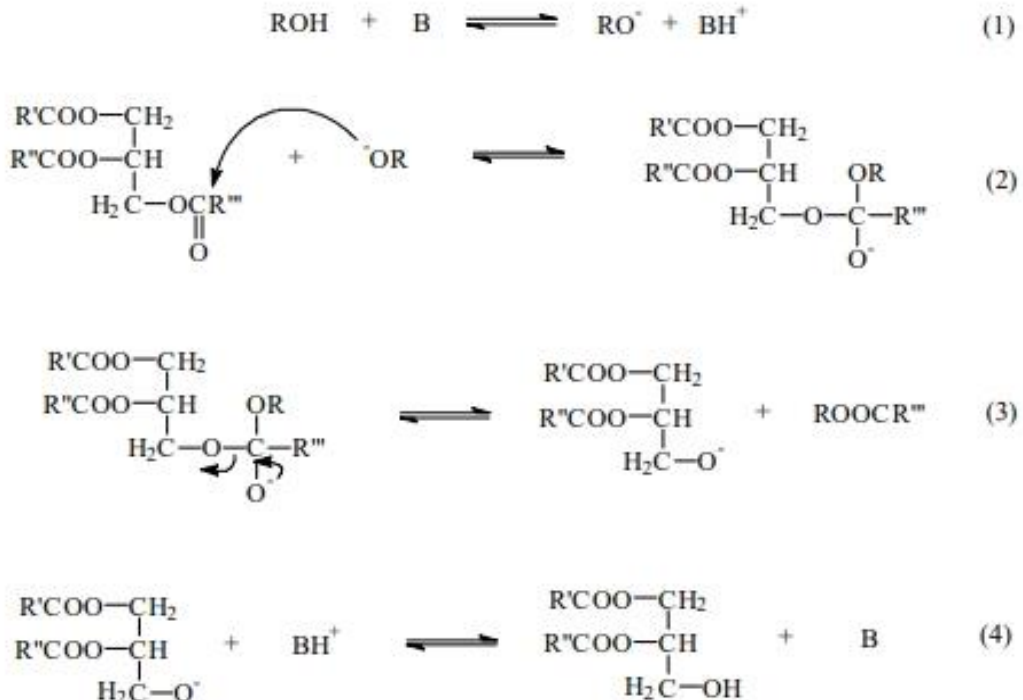


Figure II.3: Mécanisme de la réaction de la transestérification d'huile végétale par l'alcool catalysée par une base. [29]

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

Dans un premier temps, il s'agit d'une attaque nucléophile du carbonyle (du triglycéride) par l'anion alcoolate afin de créer un carbanion intermédiaire (phase adjacente). Ensuite, l'élimination nucléofuge se produit lorsque le doublet de l'oxygène est rabattu (phase d'élimination). Dès l'apparition d'une fonction alcoolate du glycérol, l'alcoolate est régénéré. En utilisant du NaOH, du KOH, du K₂CO₃ ou d'autres catalyseurs similaires, on appelle généralement l'alcoxyde l'espèce catalytique. L'étape déterminante de la réaction semble être la troisième réaction (mono donne l'ester), car les monoglycérides sont des intermédiaires plus stables que les diglycérides. [30]

Étant donné l'équilibre de la réaction, il est conseillé de consommer un excès d'alcool pour entraîner la réaction dans le sens direct. Il s'agit d'un mono-alcool aliphatique primaire ou secondaire contenant 1-8 atomes de carbone. Le méthanol, l'éthanol, le propanol, le butanol et l'alcool amylique sont des alcools utilisables dans le processus de transestérification. [12]

II.2. Etapes de transestérification

Après la réaction on passe aux étapes suivantes :

II.2.1. Séparation

La réaction génère deux nouveaux produits, le glycérol et le biodiesel (ester) auxquels demeure mélangé l'alcool en excès utilisé lors de la réaction. Le glycérol étant plus dense que le biodiesel, les deux phases peuvent être séparées de façon gravitaire en soutirant le glycérol par le bas du réservoir de décantation. Un décanteur centrifuge peut aussi être utilisé pour accélérer cette séparation. [31]

2.2. Récupération de l'alcool

Une fois que le glycérol et le biodiesel ont été séparés, on élimine l'alcool excessif dans chaque phase par évaporation ou distillation. L'alcool ainsi collecté est ensuite réemployé dans le processus. [31]

2.3. Neutralisation du glycérol

On neutralise le catalyseur en utilisant un acide, ce qui donne naissance à du glycérol brut dont la pureté varie de 80 à 88 %. À cette étape, le glycérol peut être enrichi en eau, en savons, en alcool et en traces de catalyseur non utilisé. Le glycérol est distillé pour satisfaire

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

des exigences spécifiques (marchés pharmaceutiques et cosmétiques) afin d'atteindre un taux de pureté supérieur à 99 %. [31]

2.4. Lavage du biodiesel

D'après la méthode et l'usage final du biodiesel, il est possible de le purifier en utilisant un lavage à l'eau pour éliminer les résidus de catalyseur et les autres impuretés. Le produit de biodiesel est un liquide d'un ambre-jaune avec une viscosité comparable au pétro diesel. [31]

2.5. Séchage

Le séchage aide à éliminer l'eau qui se trouve. Le processus est généralement effectué en chauffant à une température élevée le biodiesel lavé, avec une température de séchage pouvant atteindre 140°C en utilisant une catalyse homogène en continu. [32]

II.3. Caractéristiques du biodiesel

Parmi les propriétés les plus intéressantes du biodiesel, on cite la viscosité, l'indice d'acidité, la teneur en cendre sulfatée, la puissance calorifique supérieure, l'indice d'iode, la teneur en eau et la teneur en ester.

II.3.1. Viscosité

La viscosité d'une huile traduit sa résistance à son écoulement ; elle représente les forces de frottement internes et dépend fortement de la température. Elle est en relation avec les structures et les ramifications des triglycérides et des acides gras.

La viscosité des triglycérides est plus élevée que celle des acides gras qui les constituent et la viscosité est une propriété importante du carburant, car elle influe sur le fonctionnement du système d'injection dans le moteur. En effet, une augmentation de la viscosité affecte la fluidité du carburant. Le Département Systèmes Energétiques et Environnement à l'EMN a utilisé un viscosimètre à vibration de type SV 100 pour évaluer la viscosité et la variation de cette caractéristique physique essentielle de l'huile de lentisque et des biocarburants produits en fonction de la température. [33]

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

II.3.2. Densité

La densité correspond à la quantité de produit présente dans un volume donné, à des conditions de pression et de température spécifiques. La densité joue un rôle essentiel dans la mise en valeur des matières premières liquides, utilisée comme source de production d'un biocarburant.

Au sein du laboratoire des systèmes pyrotechniques de l'EMP, un densimètre calibré (Anton Paar DMA 4500) a été employé dans une plage de températures allant de 5 à 50°C.

Cet appareil dispose d'un système pour éliminer les bulles d'air formées lors du remplissage de la cellule de mesure et qui sont l'une des sources d'erreurs expérimentales. [33]

II.3.3. Indice de cétane

Cette caractéristique est très importante qui reflète la qualité du carburant ou de l'huile et leurs performances énergétiques. Il exprime l'aptitude d'un combustible Diesel à l'auto-inflammation et à la combustion dans un moteur Diesel. Plus l'indice de cétane est élevé, plus le retard est grand et sa combustibilité est courte. L'indice de cétane exprime la possibilité d'un carburant à présenter une structure favorable à l'auto-inflammation dans le moteur d'un véhicule. Ce paramètre a des incidences directes sur l'aptitude et la manière de démarrage à froid, le calage du cycle de combustion, le gradient de pression, la pression maximale, ainsi que le bruit. Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer l'indice de cétane des carburants à moindre coût, à partir de leurs caractéristiques ou de leur structure chimique. [33]

II.3.4. Pouvoir lubrifiant

La définition de la lubricité pour un carburant est «la capacité à réduire la friction entre les surfaces solides en mouvement relatif». La Lubricité du diesel est influencée par sa viscosité, son acidité, sa teneur en eau et les composés soufrés. 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. Par conséquent, un avantage de l'ajout de biodiesel ayant une faible teneur en soufre dans du pétro-diesel conventionnel est d'améliorer sa lubrification [34]

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

II.3.5. Indice de réfraction (IR)

C'est le rapport entre le sinus des angles d'incidence et de réfraction d'un rayon lumineux de longueur d'onde déterminée, passant de l'air dans l'huile maintenue à une température constante. La longueur d'onde choisie pour les appareils dédiés à cette mesure est celle de la moyenne des raies D du sodium ($\lambda_1 = 588,995 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 589,592 \text{ nm}$). Pour les liquides, le réfractomètre le plus utilisé est le réfractomètre d'Abbe. [35]

II.3.6. Indice d'acidité

Est le nombre de milligrammes d'hydroxyde de potassium (KOH) nécessaires pour neutraliser les acides gras libres contenus dans un gramme de matière grasse ; tandis que l'acidité d'un corps gras est le pourcentage d'acides gras libres exprimé conventionnellement en acide oléique [36] L'acidité se déduit de l'indice d'acide et est une expression conventionnelle du pourcentage d'acides gras libres. Ces deux indicateurs chimiques ont été déterminés suivant la norme NFV 03-906. [37]

II.3.7. Indice de saponification

L'indice de saponification (InS) se définit comme le nombre de milligrammes d'hydroxyde de potassium (KOH) nécessaire pour saponifier un gramme de matière grasse. Ce paramètre a été déterminé suivant le protocole décrit par la norme NF T 60-206. [37]

II.3.8. Teneur en eau

La présence de l'eau a un effet nuisible sur le processus réactionnel de la transestérification (elle peut favoriser la saponification, réaction inverse de la transestérification) et même sur le fonctionnement d'un moteur si le biocarburant est utilisé à l'état pur. La mesure de la teneur en eau a été effectuée à l'aide d'un appareil Metrohm, par la titration de l'eau par la méthode coulométrique Karl Fischer. [33]

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

II.3.9. 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 ». [38]

II.4. Les paramètres influençant sur la réaction de transestérification

Plusieurs études montrent les paramètres qui influencent cette réaction à savoir : la nature du catalyseur (acide ou basique), la nature de l'alcool et de l'huile, le rapport molaire alcool/triglycérides, la température, la présence des acides gras libres et d'eau, la vitesse de l'agitation et le temps de la réaction. [4]

II.4.1. Rapport molaire alcool/huile

Le rapport molaire alcool/huile est l'une des variables les plus importantes affectant le rendement des esters alkyliques [14]. La stœchiométrie de la réaction de transestérification implique l'utilisation de trois moles d'alcool pour une mole de triglycéride afin d'obtenir une mole de glycérol et 3 moles d'esters d'acides gras, un grand excès d'alcool est exigé pour diriger la réaction dans le sens de formation des esters [5]. Refaat et al, ont obtenu un rendement en biodiesel de 98.2% lors de la transestérification d'une huile de cuisson usée à 65°C avec un rapport molaire méthanol / huile de 6 :1 et 1% en masse de KOH pendant 1 heure de réaction. [39]

II.4.2. Nature de l'alcool

Le type d'alcool communément utilisé dans le processus de transestérification est un mono alcool aliphatique primaire ou secondaire ayant 1-8 atomes de carbone, parmi ce type on trouve le méthanol, l'éthanol, le propanol, le butanol et l'alcool amylique. Le méthanol est l'alcool le plus couramment utilisé en raison de son faible coût. [13]

Les alcools utilisés le plus fréquemment sont le méthanol et l'éthanol et spécialement le méthanol vu son coût bas et ses avantages physiques et chimiques (chaîne d'alcool plus courte

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

et plus polaire). [12] Effectivement, dans le domaine industriel, le méthanol est fabriqué à partir d'un gaz de synthèse contenant du (CO), du dihydrogène (H₂) et de petites quantités de (CO₂). La phase gazeuse est utilisée pour conduire le processus à des pressions et des températures élevées, en utilisant des catalyseurs cuivrés comme Cu/ZnO/Al₂O₃ et Cu/ZnO/Cr₂O₃. [40]

L'éthanol a toutefois l'avantage de venir d'une source renouvelable par fermentation du sucre de la canne à sucre ou de la betterave comme source. L'obtention du biodiesel est entièrement biologique et présente moins de risques que le méthanol. [12]

L'éthanol est produit soit par fermentation de sucres (glucose ou fructose (C₆H₁₂O₆) extraits de plantes sucrières (betterave, canne à sucre...) à l'aide de levures ou bien par hydrolyse enzymatique (amylase) de l'amidon contenu dans les céréales (blé, maïs,...) précédant l'étape de fermentation. [41]

II.4.3. Type du catalyseur

En général, les catalyseurs utilisés dans la transestérification des huiles végétales et des graisses animales peuvent être classés en trois catégories : catalyseurs homogènes, hétérogènes et enzymatiques. La réaction de transestérification catalysée par une base est plus avantageuse car elle est plus rapide et le procédé réduit la teneur en acides gras libres de l'huile à moins de 1% en poids, ce qui conduit à des rendements plus élevés en biodiesel, contrairement à celle catalysée par un acide qui est généralement lente (nécessitant des temps de réaction plus longs). [42]

II.4.3.1. Catalyseurs homogènes

A. Catalyseurs homogènes basiques

Les recherches concernant la fabrication des biodiesels ont été réalisées en utilisant généralement la catalyse basique. On utilise principalement l'hydroxyde de potassium et l'hydroxyde de sodium. Ces catalyseurs sont employés dans le secteur industriel pour différentes raisons :

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

Leur capacité à catalyser à des températures basses et à une pression atmosphérique. L'importance des taux de conversion atteint en un temps réduit, leur disponibilité étendue et leur prix abordable.

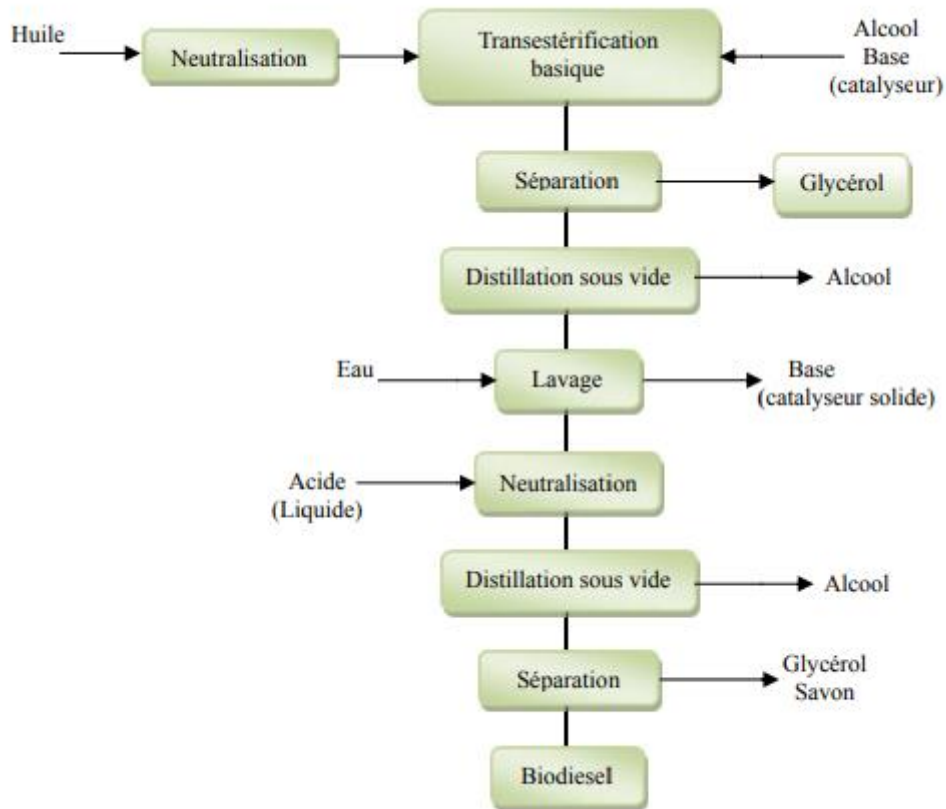


Figure II.1: Procède de la transestérification basiques [14]

B. Catalyseurs homogènes acides

La méthode appliquée pour la catalyse acide est identique à celle employée pour la catalyse basique, mais en substituant les bases fortes par des acides forts. L'acide sulfurique, l'acide chlorohydrique et l'acide phosphorique sont les acides les plus couramment employés.

L'acide est très lent. la réaction à catalyse basique est 4000 fois plus lente et elle requiert des quantités d'alcool élevée et des températures plus élevée pour des périodes du temps plus longues.

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

Cependant cette technique ne dépend pas de l'acidité de l'huile et elle est relativement moins sensible à l'humidité que la réaction à catalyse basique. Cette réaction présente également un autre avantage. Puisque l'estérification des acides gras libres et la transestérification de la graisse se produisent simultanément. La réaction à catalyse acide est recommandée par la plupart des études comme prétraitement de l'huile de forte teneur en acides gras libres. Effectivement, lors du prétraitement, les acides gras libres sont estérifiés en présence d'alcool et d'un acide fort. Cette réaction est assez rapide et efficace, et elle a pour objectif de réduire l'acidité jusqu'aux seuils tolérés grâce aux réactions à catalyse basique. Après avoir effectué ce prétraitement, on appliquera une catalyse basique à l'huile prétraitée.

Cependant, sur le plan économique, Zhang et ses collègues (2003) ont démontré que la réaction à catalyse acide a une seule étape et moins coûteuse que la réaction en deux étapes.

II.4.3.2. Catalyseurs hétérogènes

A. Catalyseurs hétérogènes basiques

Les zéolites basiques, les oxydes métalliques alcalinoterreux et les hydrotalcites sont des composés chimiques basiques insolubles dans l'alcool. Les oxydes des métaux alcalinoterreux sont les plus captivants, comme le CaO qui possède une forte basicité et qui peut être utilisé comme combustible.

Fabriqué à partir des matières premières plus abondantes telles que le calcaire ou l'hydroxyde de calcium. Les huiles riches en acides gras libres ont tendance à se combiner de savon et le neutraliser. Selon des recherches, il a été démontré que le biodiesel contient une partie soluble de CaO, ce qui requiert une nouvelle étape de purification. On peut fabriquer de MgO en utilisant du magnésium. Il est extrêmement efficace à une température de 150°C, mais il perd son efficacité à des températures plus basses. On développe actuellement d'autres types de catalyseurs basiques hétérogènes, mais il est nécessaire de mener davantage d'études pour comprendre l'impact des concentrations élevées en acides gras libres sur leur fonctionnement.

Chapitre II : Processus de fabrication du biodiesel

B. Catalyseurs hétérogènes acides

Il est possible de substituer facilement et potentiellement les catalyseurs acides liquides par des catalyseurs solides. Les bénéfices de l'emploi des catalyseurs acides solides sont nombreux, tels que : leur aptitude à transformer les triglycérides en acides libres et à les transestérifier.

Pour accroître la productivité, il est nécessaire de supprimer l'étape de lavage du biodiesel, de faciliter la séparation du catalyseur du milieu réactionnel, de garantir une contamination minimale du produit et enfin, de régénérer et de réutiliser le catalyseur tout en réduisant le problème de corrosion, même en présence de l'espèce acide.

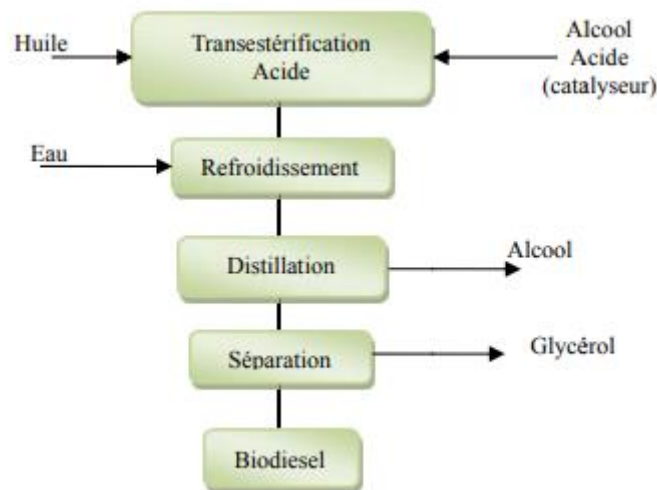


Figure II.2: procédé de transestérification acide [14]

II.4.4. Température

La vitesse de la réaction est fortement influencée par la température de réaction. Pour réduire les coûts, la transestérification doit être effectuée de préférence à des températures ambiantes près du point d'ébullition de l'alcool à la pression atmosphérique. [9]

II.4.5. Temps

L'achèvement du processus de transestérification catalysé par la base dépend du temps de réaction. Il est suggéré qu'un temps de réaction trop long n'est pas bénéfique car il favorise la réaction d'hydrolyse des esters menant à une réduction du rendement du produit. [43].

Chapitre III: Etude expérimentale

Chapitre III: Etude expérimentale

Dans ce chapitre, nous exposons tout d'abord les diverses matières premières employées dans la fabrication du biodiesel. Différentes matières premières ont été employées afin d'obtenir des biodiesels avec des caractéristiques physicochimiques différentes. Ensuite, nous présentons les réactifs utilisés dans le laboratoire de génie des procédés pour produire le biodiesel, ainsi que les techniques et appareils d'analyse employés pour évaluer caractéristiques physico-chimiques du biodiesel conformément aux normes internationales.

III.1. Matériels et méthodes

III.1. Réactifs chimiques

L'huile de friture usagée utilisée dans cette étude a été collectée à partir de restaurant de l'université de chérif msaadia Souk Ahras, puis elle a subi une filtration sur papier pour éliminer les impuretés.

Tableau III.1 : Réactifs et Equipements

Réactifs chimiques	Equipements de laboratoire
Huile usagée (80% Soja + 20% Tournesol) Méthanol Hydroxyde de potassium Hydroxyde de sodium	Ballon de 250 ml Ampoule à décanter Eprouvette gradué Plaque chauffante avec agitateur intégré Béchers Balance Thermomètre Erlenmeyer

III.2. Calculs de la quantité de réactifs

D'après les coefficients stœchiométriques de la réaction, la transestérification exige trois moles d'alcool pour une mole de triglycérides afin de former trois moles d'esters gras et une mole de glycérol. Cependant, la transestérification étant une réaction équilibrée, un excès important d'alcool permet de déplacer la réaction dans les sens de formation des esters et de glycérol. Pour une conversion maximale en ester méthylique [40], nous avons pris le rapport molaire méthanol/huile égale à 1/6 et le catalyseur KOH 1% en masse de l'huile.

On a pris le rapport molaire 1/6 pour observer l'excès du méthanol à la fin de l'expérience. La masse d'huile usagée utilisée est de 200g.

Chapitre III: Etude expérimentale

Pour le catalyseur (KOH) : 1% de la masse d'huile. Donc : $m(\text{KOH}) = 200 \times 1 / 100 = 2 \text{ g}$.

Pour l'alcool (méthanol) : $m(\text{méthanol}) = \text{rapport} \times n(\text{huile})$

La masse $m(\text{méthanol}) = 6 \times 200 / 943 = 1,272$ Donc : $m(\text{méthanol}) = M \times n$ donc :

La masse $m(\text{méthanol}) = 32,04 \times 1,272 = 40,75 \text{ g}$.

III.3. Synthèse du biodiesel

III.3.1. Dispositif expérimental

La réaction de transestérification est réalisée dans le dispositif expérimental présenté dans la (Figure III.6) ci-dessous, cette réaction se déroule dans un ballon à fond rond. L'agitation et le chauffage sont conduits par un agitateur magnétique chauffant, le chauffage est effectué en utilisant un bain marie. Le contrôle de la température de la réaction est effectué à l'aide d'un thermomètre.

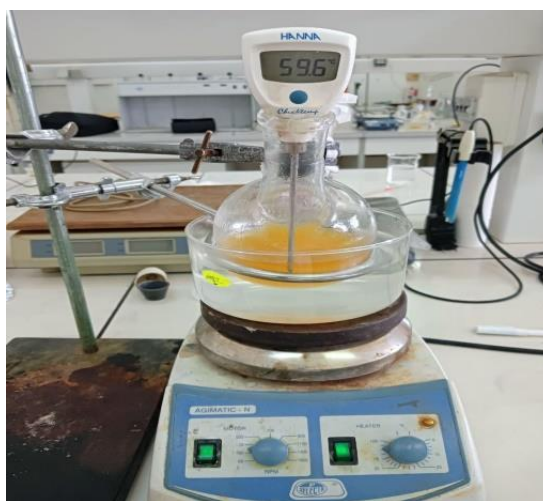


Figure III.6: Dispositif de la réaction de transestérification

Chapitre III: Etude expérimentale

III.3.2. Etapes de la réaction

A l'aide d'une balance numérique on pèse 200g d'huile usagée, cette dernière est versée dans un ballon à fond rond de 250 ml de volume. Par la suite, on chauffe le ballon dans un bain marie à l'aide de la plaque chauffante jusqu'à ce que la température atteigne 60 C°, pendant 90 minutes.

Après, on pèse 2 g du KOH (hydroxyde de potassium) et 40 g de méthanol à l'aide de la balance numérique, et on mélange ces deux réactifs dans un bécher de 100 ml, ce mélange est mis sous agitation à l'aide d'un agitateur magnétique jusqu'à la dissolution complète du KOH.

Ensuite, la solution (méthanol + KOH) est versée dans le ballon contenant de l'huile chauffée, et le mélange obtenu est agité de nouveau avec un agitateur magnétique pendant une heure et trente minutes.

III.3.3. Etape de décantation

A la fin de la réaction, le mélange est transféré dans une ampoule à décanter (Figure III.7). Le produit de la transestérification est maintenu au repos pendant 24 h afin de séparer le glycérol du biodiesel. Par la suite le glycérol, qui est de couleur marron en bas de l'ampoule, est récupéré dans un flacon séparé pour obtenir le biodiesel.



Figure III.7: La décantation du mélange

Chapitre III: Etude expérimentale

III.3.4. Etape du lavage

L'étape de lavage du biodiesel est destinée à éliminer les impuretés du biodiesel telles que la glycérine résiduelle, l'excès du méthanol, les traces du catalyseur, les savons et les sels créés lors de la catalyse. Les lavages sont répétés plusieurs fois jusqu'à ce que l'eau du lavage soit claire.

Il est important de réaliser cette opération de manière très douce, en minimisant l'agitation, car l'agitation entraîne la formation d'une émulsion qui réduit le rendement de la synthèse.



Figure III.8: Lavage du biodiesel

III.3.5. Etape du séchage

Après le lavage du biodiesel à l'eau, l'opération de séchage permet d'éliminer l'eau présente. Elle est généralement réalisée en chauffant le biodiesel lavé à une température élevée, pouvant atteindre 140°C.

La figure suivante montre le produit final après séparation, lavage et séchage :

Chapitre III: Etude expérimentale



Figure III.9: Produit final de biodiesel

III.3.6. Rendement en biodiesel

Le rendement de la réaction se calcule par la formule suivante :

$$R (\%) = M_{\text{ester}} / M_{\text{huile}} \times 100$$

Avec : **R(%)** : rendement en biodiesel.

M_{ester} : la masse d'ester.

M_{huile} : la masse d'huile usagée utilisée.

4. Paramètres étudiés

La variation des paramètres opératoires de la réaction de transestérification est donnée par le tableau (III.2).

Tableau III.2 : Paramètres étudiés

Paramètres	Variations du paramètre
Temps de la réaction (min)	30 ; 45 ; 75 ; 90
Quantité de catalyseur (g)	1 ; 1,5 ; 2 ; 3
Ratio massique (méthanol : HFU) (g)	[1 : 4] ; [1 : 6]

Chapitre III: Etude expérimentale

III.5. Caractéristiques physico-chimiques du biodiesel

III.5.1. Analyses physiques

III.5.1.1. Densité

A. Définition

La densité (aussi appelée "masse spécifique"; d'où son terme anglais "specific gravity") est le rapport de la masse volumique d'une substance (le rapport de sa masse à son volume) à celle d'une autre substance choisie comme référence (l'eau dans le cas des liquides et des solides) la densité est un nombre sans unité.

B. Mode opératoire

Après la séparation du biodiesel, On pèse la masse équivalente à un volume de 50 ml de biodiesel dans une éprouvette graduée, puis on calcule la masse volumique de biodiesel d'après la loi : $\rho = \text{Masse} / \text{Volume}$

On détermine la densité de biodiesel grâce à la loi : $d = \rho_{\text{biodiesel}} / \rho_{\text{de l'eau}}$

III.5.1.2. Viscosité

La viscosité d'une huile traduit sa résistance à son écoulement ; elle représente les forces de frottement internes et dépend fortement de la température. Elle est en relation avec les structures et les ramifications des triglycérides et des acides gras. [33]

La viscosité du carburant est la caractéristique principale qui joue un rôle important dans la combustion de ce dernier. La facilité de combustion et l'efficacité thermique du moteur sont influencées par l'injection directe du carburant dans la chambre de combustion ouverte par la buse et le motif de pulvérisation du carburant. Un faible niveau de viscosité peut provoquer une fuite excessive de la pompe interne, tandis que la pression du système atteint un niveau inacceptable et impacte l'injection lors de l'atomisation de la solution spray. La viscosité joue un rôle essentiel à basse vitesse dans des conditions de charge faible.

Un viscosimètre à vibration de type SV 10, sis au département du génie des procédés a servi à la détermination de la viscosité des échantillons.

Chapitre III: Etude expérimentale

Un viscosimètre vibrant, le SV-10, est équipé de pales vibrantes pour évaluer la viscosité des échantillons. La solution à mesurer est remplie de deux disques plaqués or identiques sur des tiges de support, disposés comme un diapason.

Les supports des pales sont touchés par un dispositif d'actionnement qui les fait vibrer à une fréquence et selon un déplacement spécifique des pales. Cette vibration est atténuée par la viscosité de la solution, et un capteur enregistre cette diminution du déplacement. Par la suite, l'actionnement frappe de manière continue les pales pour maintenir un déplacement constant. On mesure le courant nécessaire au dispositif d'actionnement et on le calibre pour obtenir la viscosité.

A. Mode opératoire

- Installer l'appareil sur une surface stable et horizontale.
- Effectuer la calibration initiale.
- Stabiliser la température de l'échantillon.
- Bien mélanger l'échantillon.
- Placer l'échantillon dans un récipient approprié.
- Immerger les sondes dans l'échantillon sans toucher le fond ou les parois.
- Démarrer la mesure et attendre la stabilisation des valeurs.
- Lire la viscosité affichée et nettoyer les sondes après chaque utilisation.



Figure III.3: Viscosimètre à vibration SV-10

Chapitre III: Etude expérimentale

III.5.2. Analyse chimique

III.5.2.1. Mesure du pH

Le pH en solution traduit la balance entre acide et base sur échelle de 0 à 14.

La solution est acide si son pH est inférieur à 7, neutre s'il est égale à 7 ; basique s'il est supérieur à 7, un pH-mètre est constitué d'une sonde reliée à un voltamètre. Il permet de mesurer le degré d'acidité ou de basicité d'une solution.

A. Mode opératoire

- Mettez en marche le pH-mètre
- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée
- Appuyer sur CAL, l'appareil demande le standard 1 (le neutre pH 7)
- Insérer l'électrode dans le flacon contenant l'échantillon
- Appuyer sur CAL et attend un bon moment
- Après avoir stabilisé, lire la valeur du pH
- Enlever l'électrode et rincer avec de l'eau distillée abondamment.



Figure III.4: pH mètre Hanna

Chapitre IV. Résultats et discussions

Chapitre IV. Résultats et discussions

Cette section est dédiée à la discussion des résultats de l'étude des effets des paramètres opératoires du procédé sur le rendement de la réaction de transestérification des huiles de friture par les alcools comme le méthanol dans un milieu catalytique basique dans le but de déterminer le rendement optimal de ce procédé de production du biodiesel.

Les trois paramètres étudiés sont : la durée de la réaction, la quantité du catalyseur et le rapport massique [Méthanol : HFU].

IV.1. Effet de la durée de la réaction de transestérification

L'optimisation de la durée de la réaction de transestérification a été réalisée expérimentalement en changeant le temps de contact des réactifs dans le but de déterminer le temps optimal avec lequel on obtient le meilleur rendement en biodiesel. Le temps de cette réaction varie entre 30 minutes et 90 minutes comme indiqué sur le graphe ci-dessous (figure IV.12) :

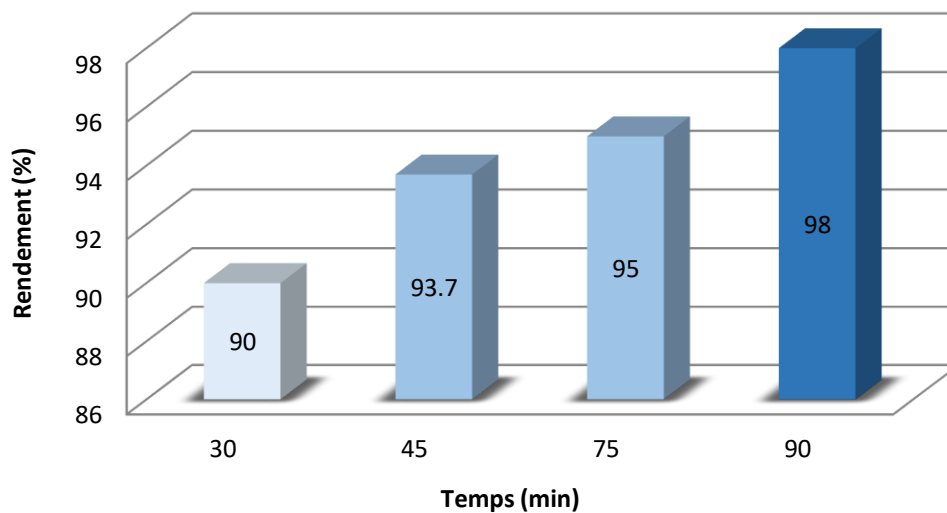


Figure IV.12: Effet de la durée de la réaction sur le rendement en biodiesel

La Figure IV.12 montre qu'une augmentation du temps de la réaction de 30min à 90min, implique une augmentation du rendement en biodiesel produit jusqu'à atteindre un rendement maximal de 98 % avec un temps de contact de 90 minutes.

Chapitre IV. Résultats et discussions

Donc le rendement maximal en biodiesel (98%) est obtenu après une heure et trente minutes de réaction.

IV.2. Effet de la quantité du catalyseur

L'optimisation de la quantité du catalyseur a été réalisée expérimentalement en changeant la quantité d'Hydroxyde de potassium ajoutée dans le réacteur dans le but de déterminer la quantité optimale avec laquelle on obtient le meilleur rendement en biodiesel. Les quantités du catalyseur (KOH) ajoutées varient de 1 à 3 grammes comme illustrer sur le graphe ci-dessous : (figure IV.13)

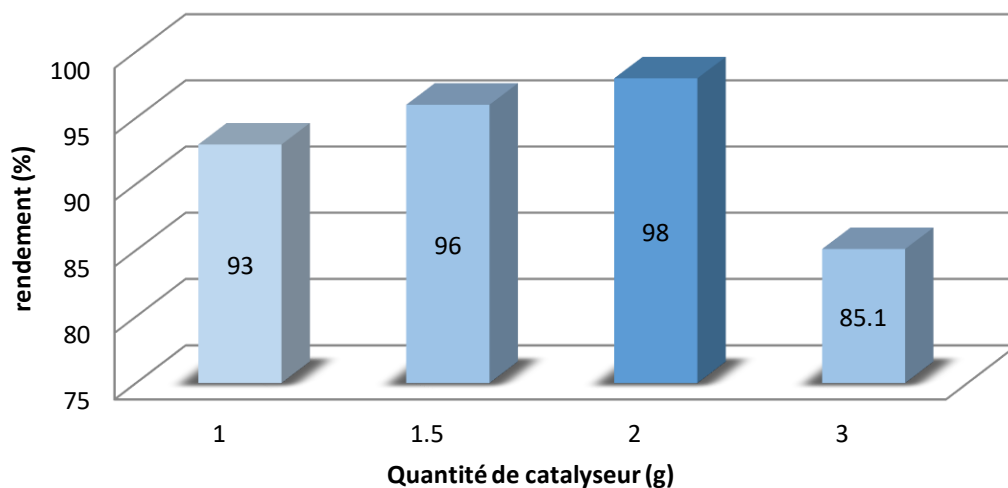


Figure IV.13: Effet de la concentration du catalyseur sur le rendement en biodiesel

La figure IV.13 montre que l'augmentation du taux du catalyseur dans la réaction de transestérification entraîne une augmentation du rendement de cette dernière jusqu'à l'obtention d'un rendement maximal avec une masse du KOH de deux grammes, au-delà de cette quantité le rendement en biodiesel diminue.

L'augmentation de la quantité de catalyseur de 1 à 2 g a permis d'augmenter la conversion en biodiesel de 93 % à 98 %. Le meilleur rendement est de 98 % obtenu pour une réaction avec 2g en masse de catalyseur, tandis que la quantité de 3g en masse de catalyseur a diminué la conversion en biodiesel, ce qui est dû à la formation du savon causée par la réaction de saponification, ou la grande quantité d'hydroxyde de potassium conduit à une saturation de la

Chapitre IV. Résultats et discussions

solution, ce qui provoque l'agrégation des particules, entraînant un manque de surface de contact, réduisant ainsi le rendement de transestérification.

IV.3. Effet du rapport massique

Dans cette section, l'optimisation du ratio massique de la réaction a été réalisée expérimentalement pour déterminer le ratio massique optimal.

Deux rapports (méthanol : HFU) ont été testés. (1 : 4 et 1 : 6 sont les rapports choisis), les autres conditions opératoires restent inchangées et maintenues à leur optimum, les deux expériences sont réalisées avec un temps de réaction de 90 min, à une température de 60°C et avec une masse du catalyseur basique de 2% de la masse de la matière grasse.

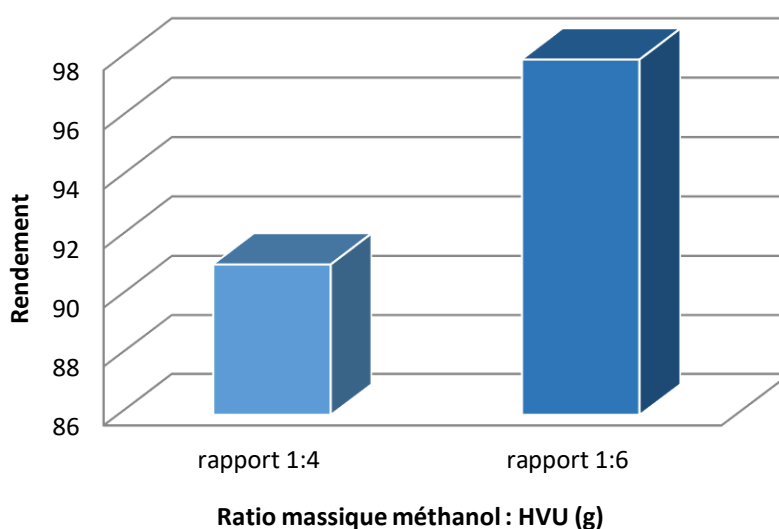


Figure IV.14: Effet de ratio massique sur le rendement en biodiesel

La figure IV.14 montre que la conversion maximale en esters méthyliques est obtenue avec le rapport massique égal à (1:6), L'augmentation du rapport massique réduit le temps de réaction de transestérification. En d'autres termes, un rapport massique élevé induit une conversion plus rapide.

Chapitre IV. Résultats et discussions

IV.4. Influence du type de catalyseur

Dans le but d'étudier l'influence du type du catalyseur basique sur le procédé de transestérification par catalyse homogène basique, deux catalyseurs basiques ont été testés tels que l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH).

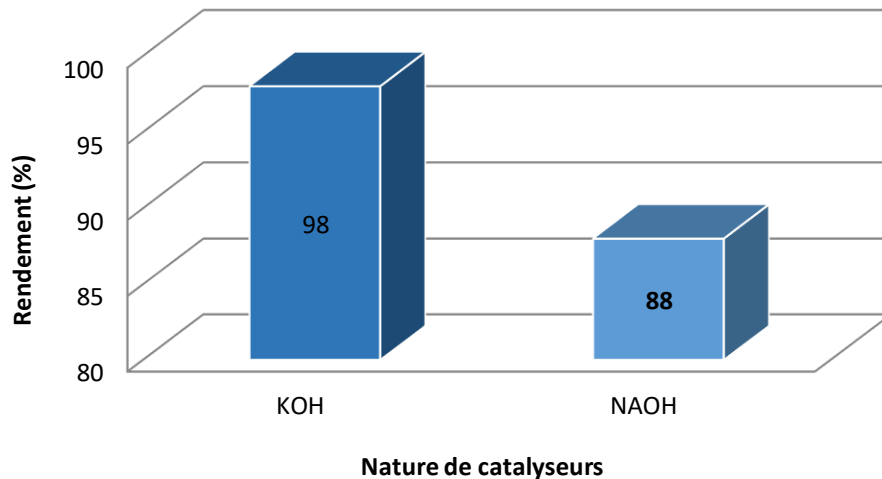


Figure IV.15: Effet de la nature des catalyseurs sur le rendement de transestérification

La nature du catalyseur est un paramètre important dans la réaction de transestérification pour des quantités variant entre 0,5 et 2% de la masse de l'huile. Ce résultat a été confirmé dans le cadre de ce travail, l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH) ont été utilisés, les deux catalyseurs les plus usuels dans la synthèse par transestérification des biodiesels à partir des huiles végétales. [33]

La figure (IV.15) montre que le rendement le plus élevé (98 %) est obtenu en utilisant l'hydroxyde de potassium (KOH) comme catalyseur dans la réaction d'estérification par catalyse homogène basique.

IV.5. Caractérisation du biodiesel

IV.5.1. Densité

La densité constitue une caractéristique importante, principalement pour les biocarburants, car elle conditionne le dimensionnement et les particularités technologiques des organes d'alimentation (pompes, injecteurs), de plus, sur un système installé, une utilisation de

Chapitre IV. Résultats et discussions

biocarburants de densité largement différentes, entraînerait des modifications de réglages de combustion avec des répercussions sur la puissance maximale, le rendement et les émissions de polluant

Tableau IV.1: Résultats d'analyse la densité

Expériences		Quantité du catalyseur	Temps de réaction	Densité (20°C)
N 01		2	90	0.86
N 02		1.5	90	0.8508
N 03		1	90	0.85
N 04		3	90	0.8524
N 05		2	75	0.852
N 06		2	45	0.862
N 07		2	90	0.8524
N 08		2	30	0.858
Norme EN Européenne	Biodiesel	—	—	0,860 - 0,900
	Gasoil HM			0,820 - 0,845

On remarque que Les résultats des densités obtenues après transestérification sont inférieures à celle de l'huile friture de départ 0.92 ce qui nous indique que la réaction de transestérification a bien réduit la longueur des chaînes moléculaire des triglycéride. Les valeurs sont presque identiques à celles des normes européennes, dont la valeur varie entre [0.86-0.9] g/cm³, les valeurs de la densité des biodiesels sont inférieures à ceux des huiles végétales. La densité du biodiesel synthétisé est proche de celle du diesel, nous avons donc presque la même mesure de poids (masse volumique) des deux fluides.

IV.5.2. Viscosité

Les acides gras et les triglycérides présentent une viscosité qui est influencée par leurs structures, notamment par la longueur des chaînes (longueur de la chaîne et saturation). [44]

On ne peut pas utiliser les huiles végétales directement dans les moteurs diesel en raison de leur viscosité élevée, grâce à la réaction de transestérification, on peut réduire la viscosité pour qu'elle soit conforme aux normes européennes (EN 14214). [46]

Chapitre IV. Résultats et discussions

Tableau IV.2 : Résultats d'analyse la viscosité

Expériences		Quantité de catalyseur (g)	Temps de réaction (min)	Viscosité (mpas) T =20°C
N 01		2	90	7.56
N 02		1.5	90	9.48
N 03		1	90	9.65
N 04		3	90	8.35
N 05		2	75	7.8
N 06		2	45	7.1
N 07		2	90	16.3
N 08		2	30	6.7
Norme EN Européenne	Biodiesel	—	—	6,3 - 8,1
	Gasoil HM			1,2 - 10

D'après les résultats présente sur le tableau on peut dire que :

La viscosité du biodiesel produit ne dépasse pas les normes européenne, la viscosité diminue de l'ordre de 10 -11 fois pour tous les huiles, Cette baisse est un atout puisqu'elle permet une meilleur atomisation par l'injecteur et donc une meilleur combustion. [45]

L'essai (N°7) présentent une valeur de viscosité très grande est ceci expliqué par le fait que la réaction de transestérification n'est pas complète.

La viscosité de n'importe quelle espèce étudiée diminue avec l'augmentation de la température (de 20°C à 40°C).

Une viscosité élevée peut poser des problèmes pour l'alimentation des moteurs en carburant (pression à la pompe à injection, diamètre des durites trop petit) et à l'injection (taille des gouttelettes trop grosse, à l'origine d'une mauvaise combustion et donc d'imbrûlés à l'échappement). Par contre, une viscosité trop faible peut provoquer des fuites dans l'injecteur ainsi qu'une perte de charge élevée dans la pompe d'injecteur.

Chapitre IV. Résultats et discussions

IV.5.3. Potentiel d'hydrogène pH

Le pH est un paramètre qui permet de mesurer l'acidité ou la basicité du biodiesel

Nous avons mesuré le Ph du biodiesel avec le Ph mètre Hanna. Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : Résultats d'analyse le potentiel d'hydrogène

Expériences	Quantité de catalyseur (g)	Temps de réaction (min)	PH
N 01	2	90	10.3
N 02	1.5	90	10.79
N 03	1	90	9.97
N 04	3	90	8.3
N 05	2	75	8
N 06	2	45	10.56
N 07	2	90	9.73
N 08	2	30	10.9

D'après les résultats du tableau, le biodiesel issu de la catalyse basique proche du pH du diesel commercial, toutes les valeurs du PH est supérieures à 7 car après la transestérification il reste des traces de glycérol ou traces des catalyseurs basiques, des savons et des sels formés par le catalyseur.

Tous les résultats obtenus pour l'huile usagée et le biodiesel obtenu sont regroupés dans le tableau suivant (Tableau IV.4) :

Tableau IV.4: Paramètres physico-chimiques du biodiesel.

Paramètre	Symbole	biodiesel	Normes Européenne (Biodiesel)
Densité	d^{20}	0.86	0.860 - 0.900
Viscosité	St	7.56	6,3 - 8,1
Potentiel d'hydrogène	pH	10.3	–

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le coût des carburants ne cesse d'augmenter en raison de leur nature non renouvelable et polluante. En conséquence, Les biocarburants émergent de plus en plus comme des alternatives viables.

Dans notre étude, un sujet très sensible est abordé, le développement d'une nouvelle méthode de valorisation des huiles végétales usagées en tant que biocarburant biodégradable. L'objectif est synthétiser du biodiesel par transestérification des huiles végétales usagées à l'aide d'une catalyse basique, qui est la technique la plus couramment utilisée pour la production de biodiesel, afin de préserver l'environnement et répondre aux besoins énergétiques mondiaux.

L'utilisation à partir d'huiles de friture usagées comme matière première présentes des avantages économiques et environnementaux considérables.

La réaction de transestérification des huiles de friture usagées (HFU) a été effectuée en catalyse basique homogène (KOH) en présence du méthanol. Les paramètres affectant le rendement tels que le pourcentage massique du catalyseur / huile, le temps d'agitation et le ratio massique alcool / huile ont été étudiés.

Les résultats de différentes analyses nous ont permis de tirer les points suivants :

- ✚ Les résultats obtenus ont montré que le rendement maximum de biodiesel était 98% dans les conditions opératoires optimales suivantes : 2g de quantité de catalyseur KOH, un rapport massique (méthanol : HFU) correspondant à [40 : 200], température 60°C et à temps de réaction 90min.
- ✚ Les résultats montrent aussi que KOH était le meilleur catalyseur dans la réaction de production de biodiesel avec un rendement de 98%.
- ✚ La pureté de biodiesel produit doit être vérifiée pour garantir sa conformité aux normes internationales telles que la norme EN 14214 en Europe. Cela inclut des tests de teneur en esters, la viscosité, la densité, le point d'éclair....

En définitive, le développement de ce secteur bénéficiera à la préservation de l'environnement et l'utilisation durable des ressources énergétiques naturelles, sans oublier les coproduits générés lors de la production du biodiesel pourront être valorisés dans divers domaines, tels que l'industrie pharmaceutique, cosmétique, alimentaire.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] M. Hook and X. Tang, Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change, a review, *Energy Policy*, vol. 52, pp. 797-809, Jan 2013.
- [2] A. Demirbas, Ed. Biodiesel, in *Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines*, London : Springer, 2008, P.7.
- [3] S. Kloff and C. Wicks, *Gestion environnementale de l'exploitation de pétrole offshore et du transport maritime pétrolier*. Fondation internationale du Banc d'Arguin, 2005.
- [4] B. Hamad, *Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique*, Phdthesis, Université Claude Bernard – Lyon I, 2009.
- [5] I. E. A. Staff, *CO2 emissions from fuel combustion : 1972*. Organisation for economic, 2008.
- [6] TOUATI Lounis, « Valorisation des grignons d'olive Etude de cas : Essai de valorisation en Biocarburant », Mémoire de Magister, Université m'Hamed bougara-boumerdes, 2013.
- [7] D. Puppan, *Environmental evaluation of biofuels*, *periodica polytechnica social and management sciences*, vol. 34, no. 7, pp. 863-876. 2006.
- [8] M. H. Abdelmalek et M. M. Abdesami, *Caractérisations physico- chimiques d'un biodiesel préparé à partir des huiles végétales usagées*.
- [9] J. C. Bart, N. Palmeri, and S. Cavallaro, *Biodiesel science and technology : from soil to oil*. Elsevier, 2010.
- [10] Y. Dahman, K. Syed, S. Begum, P. Roy, and B. Mohtasebi, *Biofuels : their characteristics and analisis, in biomass, biopolymer-based materials and bioenergy*, Elsevier, 2019, pp. 365-376.
- [11] Slimane GHANEM F., « Étude des biocarburants dans le monde », Mémoire du Master Ecole Nationale Polytechnique Département de Génie Chimique Ouargla, Algérie, Juin 2015
- [12] HAMAD Berna, « THESE : Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique », UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1, 2009.
- [13] Y. Chisti, *Biodiesel from microalgae*, *Biotechnology advances*, vol. 25, no. 3, pp. 294-306, 2007.
- [14] MARIA DEL PILAR RODRIGUEZ, « Mémoire : production de biodiesel à partir d'une huile modèle de micro algues par voie de catalyse enzymatique hétérogène », université de Sherbrooke (Québec - canada), 2014.

Références Bibliographiques

- [15] ABOÏNA GERARD TCHAKBLO, « Production de biodiesel par transesterification alcoolique : étude sur réacteur pilote », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2009.
- [16] L Demri « Les biocarburants : La production, la composition et les propriétés du biodiesel synthétisé à partir des huiles végétales », Université M'hamed Bougara de Boumerdès ,2019/2020
- [17] BENDIAF HADJER « Développement d'un système de production du Biodiesel à partir d'Huile utilisée », Mémoire Master physique énergétique et énergies renouvelables, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2018.
- [18] Mr. SEKAI Mohamed Mr. OUFELLA Racim , Optimisation de la production du biodiesel par la transestérification des huiles végétales usagées ,2021
- [19] F. Fitta, « Synthèse du biodiesel par transestérification des huiles de friture usées (HFU) Mémoire de Master en génie des procédés », Université de Ouargla, Algérie. (2017).
- [20] Guide de recommandations à l'usage des conseillers des entreprises(2007), Gestion des eaux usées issues des métiers de bouche, CNIDEP (Centre National d'Innovation pour le Développement durable et l'Environnement dans les Petites entreprises).
- [21] Groupe Conseil Nutshimit Inc, Production de biocarburants et de bioproduits, avantages et impacts pour le secteur agricole - Rapport préliminaire Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois Novembre 2007 / P558002.
- [22] AROUDJ H, BESSAOU S, Thèse : Ingénieur d'Etat En Ecologie et Environnement, Biocarburants : Avantages et Inconvénients, Université A.MIRA de Bejaïa, 2012.
- [23] Lakshmana Naik R, N. Radhika, and K. Sravanix, Optimized parameters for production of biodiesel from fried oil, international advanced research journal in science, engineering and technology, Vol. 2, no. 6, pp. 62-65, Jun. 2015.
- [24] K. Aouchar and B. Guermache, « Valorisation des huiles de fritures usagées en biodiesel par la réaction de transestérification», Thèse Master, 2017.
- [25] D. C. Panadare, Applications of waste cooking oil other than biodiesel : a review, Iranian journal of chemical engineering, vol. 12, no. 3, pp. 55-76, 2015 .
- [26] L, Khoudrane, « Optimization and Modelling of Biodiesel production from waste cooking oil using design of Experiment », KASDI-MERBAH Ouargla university, 2020
- [27] A, DJERIFILI., A, GSASSI., & Y, BAKACHE. (2020). Production le biodiesel : modélisation et optimisation (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR), 2020.

Références Bibliographiques

- [28] Abd-Alla, G. H., Soliman, H. A., Badr, O. A., & Abd-Rabbo, M. F. Effects of diluent admissions and intake air temperature in exhaust gas recirculation on the emissions of an indirect injection dual fuel engine. *Energy Conversion and Management*, 42(8), 1033-1045, 2001.
- [29] Schuchardt, U., Ricardo Sercheli, R., Vargas, R.M. Transesterification of vegetable oils: a review. *J Braz Chem Soc* 9.1998:199–210.)
- [30] F BEN CHEIKH. « Contribution à la synthèse d'un biodiesel », Mémoire Master académique, Université kasdi marbah ouargla, 2017
- [31] F, CHAIB, A, KHENFER, « Synthèse de biodiesel par la transestérification des huiles commercialisées », Mémoire Master académique, Université kasdi marbah ouargla, 2013
- [32] KHALFOUN Seloua, «Valorisation des huiles de friture usagées en biodiesel par la réaction de transesterification.», Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj Bouira, 2019/2020
- [33] K. Khiari . «Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques des biocarburants de seconde génération et leur influence sur le comportement des moteurs. » Thèse Doctorat. (2016).
- [34] [DUN, 01] :Dunn, R. O. 2001. Alternative jet fuels from vegetable-oils. *Trans ASAE* 44:1151-757. [26] -[SPO et al., 06] : Spolaore, P, Joannis-Cassan, C, Duran, E., Isambert, A., *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2006.
- [35] J. DENIS, J. BRIANT, J-C. HIPEAUX. *Physico-Chimie des lubrifiants : analyses et essais*. Paris : Edition Technip, 1997.
- [36] Houmba GNR, GANDONOU CB, Houssou AP, Capo-Chichi M, Houngbeme A et Gbaguidi F. 2016. Evolution des caractéristiques physico-chimiques de la graine et de l'huile de pourghère (*Jatropha curcas*) en fonction du degré de maturité des fruits. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 10(2) : 599-608.
- [37] AFNOR (Association Française pour la Normalisation). 1984. *Recueil des normes françaises : corps gras, graines oléagineuses et produits dérivés (3)*. AFNOR : Paris ; 459 p.
- [38] Koulidiati, J., vaitilingom, 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.
- [39] A. A. Refaat, N. K. Attia, H. A. Sibak, S. T. El Sheltawy, and G. I. El Diwani, Production optimization and quality assessment of biodiesel from waste vegetable oil, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* Vol. 5, no. 1, pp. 75-82, Dec. 2008.

Références Bibliographiques

- [40] ROMAIN RICHARD, «Transestérification éthanolique d'huile végétale dans des microréacteurs : transposition du batch au continu », thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [41] MACTAR DIOP, projet de fin d'études, Production De Biodiesel A Partir De L'huile De jatropa, Université Cheikh Anta Diop De Dakar, juillet 2009.
- [42] M. Chamouni, Optimisation de la production du biodiesel à partir d'huile de micro algues et des huiles usées. Thèse Master, 2014.
- [43] A. Bahlouli and L. Mahdavian, Catalysts used in biodiesel production: a review, *Biofuels*, pp 1-14, Feb. 2019.
- [44] ABDELILAH BOUTAYEB, « Mémoire: Etude bibliographique sur les huiles essentielles et végétales », Université Ibn Tofail, 2013
- [45] Z. Bettahar, B. Cheknane, and K. Boutemak, « Etude de la transestérification d'un mélange des huiles usagées pour la production du biodiesel, » Dec. 2016.
- [46] Pétroliers Liquides - Esters Méthyliques d'Acides Gras (EMAG) pour Moteurs Diesel et comme Combustible de Chauffage', - Exigences et méthodes d'essai - Carburants pour automobiles, 2013