



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université SAAD DAHLAB Blida-1

Faculté des sciences

Département de chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en CHIMIE

Option : Chimie analytique

Thème

***Contribution à la production du biodiesel à partir de
l'huile non conventionnelle de
« Jatropha curcas »***

Présenté par : M^{elle} : MALLAOUI Nadjjet

M^{elle} : SAYAD Lamia

Soutenue le 03 juillet 2023

Devant le jury composé de :

Dr. BRAHIMI Sounila

Président

Dr. FODIL Djamila

Examinatrice

Dr. FARADJI Fatma Zohra

Examinatrice

Dr. CHIBI Souaad

Promotrice

Année Universitaire : 2022/2023

ملخص:

بسبب التلوث البيئي وموارد الوقود الأحفوري والغاز الطبيعي المحدودة، أدى ذلك إلى زيادة الطلب على وقود الديزل الحيوي. وبالتالي، فإن البحث عن مصادر بديلة للطاقة المتجددة والمستدامة قد اكتسب أهمية كبيرة في معظم دول العالم، بما في ذلك الوقود الحيوي نظراً لأن زيت الجatroفا لا يمكن استخدامه للأغراض الغذائية دون إزالة السموم، مما يسمح باستخدامه كمصدر للطاقة (الوقود) [1].

هدف هذه الدراسة هو تخليق الديزل الحيوي من زيت الجatroفا كركاس الخام باستخدام تقنية التحويل الاستر. قد يتضمن ذلك توصيف شامل لزيت الجatroفا كركاس، وتحسين معايير إنتاج الديزل الحيوي، وتقييم جودة الديزل الحيوي المنتج وتحليل تأثيره على البيئة. يتراوح إنتاجية تفاعل التحويل الاستر حوالي 93٪، وتم إجراء بعض الخصائص الفيزيوكيميائية لزيت الجatroفا والديزل الحيوي المحصول. في نهاية هذه الدراسة، أظهر مقارنة نتائجنا مع المعايير العالمية أن الديزل الحيوي لدينا يتمتع بخصائص قريبة جداً من تلك المعايير.

كلمات مفتاحية: وقود الديزل، زيت، الوقود الحيوي، أسترة، جatroفا

Résumé :

En raison de la pollution environnementale et de l'épuisement des ressources en combustibles fossiles et en gaz naturel, cela a conduit à une augmentation de la demande de biocarburant diesel. Par conséquent, la recherche de sources alternatives d'énergie renouvelable et durable a acquis une grande importance dans la plupart des pays du monde, y compris les biocarburants, car l'huile de jatropha ne peut pas être utilisée à des fins alimentaires sans élimination des toxines, ce qui permet son utilisation comme source d'énergie (carburant) [1].

L'objectif de cette présente étude est de synthétiser le biodiesel à partir d'huile brute de Jatropha curcas par la technique de transestérification. Cela peut inclure la caractérisation approfondie de l'huile de Jatropha curcas, l'optimisation des normes de production de biodiesel, l'évaluation de la qualité du biodiesel produit et l'analyse de son impact sur l'environnement. Le rendement de la réaction de transestérification est de l'ordre de 93%, quelques propriétés physico-chimiques de l'huile de Jatropha et de biodiesel obtenu ont été effectuée, à la fin de cette étude une comparaison de nos résultats avec les normes mondiales, nous a montré que notre biodiesel à des propriétés très proches avec ceux des normes.

Mots clé : biodiesel, huile, biocarburants, Trans estérification, jatropha

Abstract:

Due to environmental pollution and limited fossil fuel and natural gas resources, there has been an increase in demand for biodiesel fuel. Consequently, the search for alternative sources of renewable and sustainable energy has gained significant importance in most countries around the world, including biofuels. This is because jatropha oil cannot be used for food purposes without removing the toxins, which allows it to be used as an energy source (fuel) [1].

The objective of this study is to synthesize biodiesel from crude *Jatropha curcas* oil using the Trans esterification technique. This may involve in-depth characterization of *Jatropha curcas* oil, optimization of biodiesel production standards, evaluation of the quality of the produced biodiesel, and analysis of its impact on the environment. The yield of the Trans esterification reaction is approximately 93%, and some physicochemical properties of the *Jatropha* oil and obtained biodiesel have been examined. At the end of this study, a comparison of our results with global standards showed that our biodiesel exhibits properties very close to those standards.

Key words: biodiesel, oil, biocarburants, transesterification, jatropha

Remerciements

"En commençant, nous remercions Dieu de nous avoir donné la vie et la force nécessaires pour accomplir ce travail. Nous louons Dieu pour les bienfaits de la santé, de l'énergie et de la volonté qui nous ont permis de mener nos études et nos recherches.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers notre superviseur, le professeur Mme "Chibi Souaad", pour avoir proposé le sujet de cette thèse. Vous trouverez ici une expression de notre immense gratitude pour les conseils, le soutien et l'engagement qu'elle nous a prodigués tout au long de ce travail.

Nous remercions également tous les enseignants du département de chimie, à l'université Saad Dahlab de Blida (1), pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée.

Nos sincères remerciements aux membres du jury de la défense, respectueusement, Mme Fodil Djamila, Mme Faradji Fatma Zohra, et la président du comité, Mme Brahimí Sounila, pour les conseils et avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Enfin, nous adressons nos remerciements spéciaux à nos familles et à nos amis qui ont su nous soutenir, nous encourager et nous aider tout au long de nos années d'études."

Dédicaces

A L'aide De Allah J'ai Pu Réaliser Ce Modeste Travail

Que Je Dédie :

A ma mère, qui a Œuvré pour ma réussite, par son a, amour, son soutien, et tous les sacrifices qu'elle a consentis, pour toute son aide et sa présence.

Dans ma vie.

A mon père qui peut être fier et trouver ici le fruit des nombreuses années de sacrifice qu'il a consenti pour moi.

Je n'oublie pas mon plus le soutien de mes sœurs et de mon frère et de tous ceux qui m'ont encouragé à étudier.

A tous mes amis pour la grande aide à tous les étudiants en master merci, pour les agréables moments passés ensemble je vous aime tous. et mes professeurs qui devraient voir dans ce travail la fierté de leurs connaissances bien acquises

N. Mallaoui

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

A mes frères et mes sœurs.

A mes amies et mes camarades.

*Sans oublier toutes les professeures que ce soit de primaire, du moyen,
du secondaire ou de l'enseignement supérieur*

L. Sayad

TABLE DE MATIERES

Liste des figures.....	01
Liste des tableaux.....	02
Liste des photos.....	03
Liste des abréviations.....	04
Introduction générale.....	06

CHAPITRE I : JATROPHA CURCAS

Introdtion.....	09
I.1. Historique	09
I.2. Description de botanique	10
I.2.1. La plante de Jatropha curcas	10
I.2.2. Les feuilles et les fleurs.....	10
I.2.3. Les fruites.....	11
I.2.4. Les graines.....	12
I.3. Cycle de culture.....	13
I.4. Utilisation de Jatropha curcas.....	13
I.4.1. Usage médicinal.....	13
I.4.2. Production de biocarburant.....	14
I.4.3. Intérêt écologique.....	14
I.4.4. Usage agricole.....	15
I.4.5. Intérêts socio-économique.....	15
I.5. Taxonomie de Jatropha curcas.....	16
I.6. Le tourteau de Jatropha curcas.....	16
I.7. L'huile de Jatropha curcas.....	16
I.7.1. Composition.....	17
I.7.2. Caractéristiques de l'huile de Jatropha.....	17
I.7.3. Propriétés physico-chimiques de Jatropha curcas.....	18

I.8. Les avantages et les inconvénients.....	19
A. Les avantages.....	19
B. Les inconvénients.....	20
Conclusion.....	20

CHAPITRE II : Généralités sur les biocarburants

Introduction.....	22
II.1. Définition des biocarburants.....	22
II.1.1. Les générations de biocarburant.....	22
II.1.1.1. Biocarburants de 1 ^{ère} génération.....	23
II.1.1.2. Biocarburants de 2 ^{ème} génération.....	24
II.1.1.3. Biocarburants de 3 ^{ème} génération.....	24
II.2. Les types de biocarburants.....	25
II.2.1. Le biogaz.....	25
II.2.2. Le bioéthanol.....	26
II.2.3. Le bio-huile (bio-oil)	26
II.2.4. Le biodiesel (biogazole).....	26
II.3. La production mondiale de biocarburant.....	27
II.4. Les avantages et inconvénients des biocarburants.....	27
II.5. Définition de biodiesel.....	28
II.5.1. La production mondiale du biodiesel.....	29
II.5.2. Les caractéristiques physico-chimiques de biodiesel.....	30
II.5.3. Synthèse de biodiesel (réaction de transestérification)	31
II.5.3.1. Le mécanisme de transestérification.....	32
II.5.3.2. But de la réaction de transestérification.....	33
II.5.3.3. Les paramètres influents la cinétique de cette réaction.....	33
1) Le rapport alcool/Huile.....	33
2) La nature et la qualité de l'huile.....	34
3) La nature, la quantité et le type de catalyseur.....	34

4) La température et la pression.....	34
II.6. Étude de l'effet des paramètres réactionnelles sur la réaction de transestérification.....	34
II.6.1. La Catalyse	34
A. Catalyse homogène.....	34
B. Catalyse hétérogène	35
Conclusion	36

CHAPITRE III : Matériel et Méthodes

III.1. Matériel végétale.....	38
III.2. Caractérisation des produits obtenus.....	38
III.2.1. Les propriétés chimiques.....	38
III.2.2. Les propriétés physiques.....	41
III.3. Transestérification (synthèse du biodiesel)	47
III.3.1. Rendement de la production de biodiesel.....	50
III.3.2. Caractéristiques de biodiesel.....	50
III.3.2.1. Analyse par le spectrophotomètre infrarouge (FTIR).....	50
1. Principe de la technique.....	50
2. Spectre infrarouge.....	50
3. Préparation de l'échantillon pour analyse IR.....	51

CHAPITRE IV : Résultats et Discussions

IV.1. Caractérisation physiques et chimiques de l'huile de <i>Jatropha curcas</i>	53
IV.2. Calcule de rendement de biodiesel.....	54
IV.3. Variation de densité.....	57
IV.4. Analyse par le spectrophotomètre d'infrarouge.....	60
Conclusion générale	64
Références Bibliographiques	67

Annexes

Liste des figures

Figure I.1	Distribution de <i>Jatropha curcas</i>	9
Figure I.2	Plante de <i>Jatropha curcas</i>	10
Figure I.3	Les feuilles de <i>Jatropha curcas</i>	11
Figure I.4	Les fleurs de <i>Jatropha curcas</i>	11
Figure I.5	Fruits de <i>Jatropha curcas</i>	11
Figure I.6	Les graines de <i>Jatropha curcas</i>	12
Figure I.7	Cycle de culture de <i>Jatropha</i>	13
Figure II.1	Filières de conversion de la biomasse en biénergies selon les différents procédés.....	25
Figure II.2	Techniques d'obtention du biodiesel.....	29
Figure II.3	Evolution de production de biodiesel dans le monde.....	29
Figure II.4	Réaction de transestérification entre un triglycéride et de méthanol.....	31
Figure II.5	Mécanisme de la réaction de Transestérification d'huile végétale par l'alcool catalysée par un base.....	32
Figure III.1	La réaction de saponification.....	39
Figure III.2	Principe de fonctionnement simplifié du procédé de synthèse de biodiesel...	49
Figure IV.1	Le rendement du biodiesel en fonction de type de catalyseur (KOH, NaOH)	55
Figure IV.2	Analyse par le spectrophotomètre d'infrarouge.....	60

Liste des tableaux

Tableau I.1	Composition de la graine de <i>Jatropha curcas</i>	12
Tableau I.2	Composition en acides gras de l'huile de <i>Jatropha</i>	17
Tableau I.3	Comparaison entre les propriétés d'huile de <i>Jatropha</i> , de l'ester méthylique, d'huile de <i>Jatropha</i> et du carburant diesel	17
Tableau I.4	Propriétés variables de l'huile de <i>Jatropha</i>	18
Tableau II.1	Avantages et inconvénients des biocarburants.....	28
Tableau II.2	Propriétés physiques comparées entre les huiles, leurs esters correspondants et du gazole.....	30
Tableau II.3	Avantage et inconvénients des catalyseurs basiques et acides.....	35
Tableau II.4	Comparaison des catalyses homogènes et hétérogènes.....	36
Tableau IV.1	Propriétés morphologiques d'huile de <i>Jatropha curcas</i>	53
Tableau IV.2	Récapitulation des résultats sur la caractérisation de l'huile de <i>Jatropha</i>	53
Tableau IV.3	Rendement de biodiesel en fonction de catalyseur.....	55
Tableau IV.4	Caractéristiques physico-chimiques de biodiesel obtenu.....	56
Tableau IV.5	Variation de la densité de l'huile de <i>Jatropha curcas</i> et leur ester correspondant à différente température.....	57
Tableau IV.6	La limite des catalyseurs utilisée dans la réaction de transestérification.....	58
Tableau IV.7	Principales liaisons chimiques identifiés avec FTIR pour les biodiesels obtenus.....	62

Liste des photos

Photo III.1	Montage de la réaction saponification (a) et le titrage de l'excès de potasse(b).....	39
Photo III.2	PH-mètre.....	41
Photo III.3	Mesure de la densité.....	42
Photo III.4	Le refractomètre numérique d'ABBE.....	44
Photo III.5	Le mélange réfrigérant et la détermination de la température de solidification.....	44
Photo III.6	La détermination du point d'ébullition.....	45
Photo III.7	Mesure de la masse volumique.....	45
Photo III.8	Montage de chauffage à reflux pour la synthèse du biodiesel.....	47
Photo III.9	Etape de la décantation(a) ; Etape de la purification du biodiesel(b)	48
Photo III.10	Le biodiesel synthétisé à partir d'huile de Jatropha curcas.....	49
Photo III.11	Spectroscopie infrarouge.....	51

Liste des abréviations

C	Concentration en mol. l ⁻¹
Cm	Centimètre
D20	Densité à 20°C
EMHV	Esters méthyliques d'huiles végétales
FTIR	Fourier Transforme InfraRed
Hcl	Acide chlorhydrique
IA	L'indice d'acide
Ii	L'indice d'iode
IR	Infrarouge
IS	L'indice de saponification
KOH	Hydroxyde de potassium
LFACP	Laboratory of Functional Analysis of Chemical Processes, Faculty of Technology
Mg KOH/g	Milligramme d'Hydroxyde Potassium par gramme
MJ. Kg-1	Méga joule par kilogramme
N	Normalité en mol. L-1
NaCl	Chlore de sodium
NaOH	Hydroxyde de sodium
T	Température en °C
V	Volume
g	Gramme
m	Masse en g
mg	Milligramme
mm	Millimètre
ml	Millilitre
pH	Potentielle d'Hydrogène
%	Pourcentage



Introduction générale

Introduction générale

Dans notre monde, avec le développement continu de l'industrie et des transports, la demande en énergie ne cesse d'augmenter jour après jour. Les coûts croissants des hydrocarbures d'origine fossile (gaz naturel, charbon et pétrole) et la possibilité d'épuisement programmé des sources d'énergie non renouvelables, ainsi que le phénomène du changement climatique attribué aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ont incité les pays à réfléchir au développement de nouvelles sources d'énergie propre et économiquement rentables.

Les biocarburants, considérés comme des sources d'énergie renouvelables, sont une alternative appropriée pour alimenter les moteurs à combustion interne au lieu du diesel. En raison de leur utilisation dans toutes les zones pouvant être transportées et stockées, ainsi que de leurs caractéristiques proches de celles du carburant diesel, ils constituent un meilleur substitut aux moteurs diesel actuellement utilisés.

Le biodiesel peut être facilement produit à partir de sources biologiques renouvelables, telles que les huiles végétales et les graisses animales. Le *Jatropha curcas* est l'une des cultures importantes pour la production de biodiesel. Le *Jatropha curcas* est un arbuste originaire d'Amérique centrale, qui s'est répandu en Afrique et en Asie. Il est réputé pour sa capacité à prospérer dans des conditions de sol difficiles et à résister aux conditions climatiques sèches, ce qui en fait une culture attrayante pour les régions où d'autres cultures agricoles peuvent être limitées. Ses graines, riches en huile, peuvent être extraites pour produire du biodiesel par une réaction chimique appelée estérification. Les réactifs initiaux sont de l'huile (végétale ou animale) et de l'alcool (méthanol ou éthanol) dans un catalyseur (homogène ou hétérogène), aboutissant à un mélange d'esters (biodiesel) et de glycérol [2].

Ce mémoire se compose des chapitres suivants :

- Une étude bibliographique (chapitre 1), l'étude théorique du *Jatropha curcas*.
- Tandis que (Chapitre 2), des informations générales sur les carburants en général et le biodiesel en particulier, ainsi que l'estérification.
- La partie expérimentale (chapitre3), rassemble différentes techniques de caractérisation physiques et chimiques utilisées.
- Le dernier chapitre (chapitre4), présente les résultats obtenus et leur interprétation, concluant par une conclusion générale regroupant toutes les découvertes.

L'objectif de cette étude est de contribuer à la promotion de sources d'énergie renouvelables, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et atténuant les effets néfastes sur l'environnement. En développant la production de biodiesel à partir de l'huile de *Jatropha curcas* non conventionnelle, nous espérons ouvrir de nouvelles voies pour une utilisation plus large des biocarburants et une transition vers un avenir énergétique plus durable.

Quels sont les aspects économiques et environnementaux liés à la production de biodiesel à partir de l'huile de *Jatropha curcas*, et comment peuvent-ils être améliorés pour garantir la viabilité du processus à grande échelle ?



Chapitre I :
Jatropha curcas

Introduction

Les plantes oléagineuses 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, le Jatropha et le tournesol. En général toutes les graines contiennent de l'huile. Et puisque les plantes sont une source importante pour les humains dans divers domaines tels que la médecine, les industries pharmaceutiques, les chimies industrielles, les industries alimentaires et autres. Pour cela, des huiles végétales sont extraites de ces graines pour être utilisées dans l'un de ces domaines. Avant d'entamer tout détail pratique concerne cette étude, une synthèse bibliographique est présenté dans ce chapitre. Le Jatropha curcas constitue la matière première utilisée dans ce travail.

I.1. Historique

Le Jatropha curcas est une source d'énergie provenant de la biomasse et occupe une place privilégiée en raison de ses avantages par rapport aux huiles de navet, de tournesol, de soja ou de palme. Contrairement à ces dernières, sa culture et son exploitation ne présentent aucun inconvénient. Son huile, non comestible, possède des propriétés similaires au biodiesel, d'où son surnom "or vert" [2].

Originnaire d'Amérique latine, la Jatropha est une plante sauvage appartenant à la famille des plantes euphorbiacées. Elle tire son nom de "curcas" et son fossile a été découvert à Belen (Pérou) il y a 70 millions d'années. Les commerçants portugais et arabes l'ont ensuite transportée vers d'autres continents en tant que plante médicinale. Le botaniste Carl Von Linne Luis lui a attribué le nom de "Jatropha" qui provient de deux mots grecs : "jatos" signifiant "docteur" et "trophe" signifiant "nutrition" [3][4].



Figure I.1 : Distribution de Jatropha curcas. L [5].

I.2. Description de botanique

I.2.1. Plante de *Jatropha curcas*

Jatropha curcas est une plante appartenant au groupe des angiospermes et des dicotylédones. Il s'agit d'une plante succulente pérenne qui peut vivre plus de 50 ans et atteindre une hauteur de 8 mètres. Les feuilles de cette plante sont coriaces, de couleur vert foncé et trilobées, parfois simples, avec une largeur d'environ 17 cm et une longueur d'environ 15 cm. Chaque pied de la plante possède de 5 à 7 lobes foliaires superficiels disposés de manière alternative. Les feuilles peuvent produire des teintures indélébiles de couleur rouge ou noire, tandis que l'écorce peut fournir un colorant de couleur marron. Parfois, les feuilles apparaissent regroupées en bouquet au sommet du tronc et sont portées par un long pétiole charnu. [6]



Figure I.2 : Plante de *Jatropha curcas*. L [7].

I.2.2. Les feuilles et les fleurs

Les caractéristiques des feuilles de *Jatropha curcas* comprennent leur couleur verte, leur disposition alternée, leur simplicité, de minuscules stipules, un pétiole lisse mesurant de 3 à 20 cm de longueur. Le limbe des feuilles présente une forme ovale, une base en forme de cœur, un apex pointu et des bords lisses, sans poils, avec de 5 à 7 nervures partant de la base. Le système racinaire se compose d'une racine centrale pivotante et de racines latérales sans cils qui ressemblent aux feuilles de la vigne. [8][9]

Les fleurs du *Jatropha curcas* sont inégales. Elles se regroupent en deux ensembles distincts de cinq fleurs chacun dans une seule colonne de landrocium, et ces deux colonnes se rapprochent l'une

de l'autre dans le gynécée. Les trois sous-espèces sont liées entre elles sur environ un tiers de leur longueur. [5]



Figure I.3 : Les feuilles de *Jatropha curcas* [10]



Figure I.4 : Les fleurs de *Jatropha curcas* [11]

I.2.3. Les fruits

Le *Jatropha curcas* produit un fruit sous la forme d'une capsule presque sphérique, mesurant environ 4 cm de longueur et 3 cm d'épaisseur, qui est divisée en trois loges distinctes (les carpelles), chacune contenant une graine. Lors de sa formation, le fruit est de couleur verte, puis il prend une teinte jaune et devient finalement rouge-noir, ridé et rugueux.

À l'intérieur de la capsule, on trouve généralement une, deux ou trois graines séparées les unes des autres par des cloisons. Lors d'une observation de 50 fruits au Cap-Vert, il a été constaté que 26 d'entre eux contenaient trois graines, 15 en contenaient deux et 9 n'en avaient qu'une seule.

Les fruits secs et mûrs restent souvent attachés à la plante et libèrent rarement les graines, même en tombant au sol, car les carpelles restent soudés du côté de la tige des graines. En moyenne, les fruits mûrs pèsent environ 2,16 g. [12]



Figure I.5 : Fruits de *Jatropha curcas*. L [7].

I.2.4. Les graines

Les graines du *Jatropha curcas* se présentent sous forme de marbrures noires ou brun foncé. Elles ont une longueur comprise entre 1,5 cm et 2,5 cm, avec une épaisseur variant de 0,8 cm à 1,2 cm [13]. Chaque fruit contient généralement de 1 à 3 graines, qui présentent certaines similitudes avec les graines de ricin. Elles ont une forme ovale allongée et sont enveloppées d'une coque externe très dure qui se brise nettement. Sous cette coque, on trouve une pellicule blanche (Tégument intérieur) Qui recouvre l'amande. Cette amande est composée d'un albumen huileux blanchâtre contenant l'embryon, qui est pourvu de 2 larges cotylédons aplatis. Les graines représentent environ 53% à 62% du poids du fruit sec et environ 15% du poids du fruit frais. [14] Elles contiennent environ 20% d'acides gras saturés et 80% d'acides gras insaturés, et elles donnent environ 25% à 40% d'huile par poids [15]. Environ 37% du poids des graines est constitué de l'écorce, tandis que le noyau représente environ 63%. En plus de cela, les graines de *Jatropha* présentent des compositions spécifiques (voir tableau I.1) [16].



Figure I.6 : Les graines de *Jatropha curcas* [7].

Tableau I.1 : Composition de la graine de *Jatropha curcas* [2].

Composés	Graines avec écales (%)	Graines sans écales (%)
Matière sèche	94.23	92.00
Eruption	3.17	3.96
Matière sèche organique	91.06	88.16
Protéine	17.08	22.24
Huile brute	34.39	54.38
Fibre brute	22.96	2.21
Amidon	0.04	0.15
Sucre	2.67	3.30
Hémicellulose	3.22	0.18
Cellulose brute	13.98	2.91
Lignine	14.25	0.17

I.3. Cycle de culture

Cette plantation pérenne que l'arbre commence à produire au cours de la première année fleurit après 120 jours de semis au début de la saison des pluies, et s'étend indéfiniment et les fruits apparaissent après 180 jours et mûrissent après 60 jours de floraison, preuve que la plante est capable de produire pendant 30 ans. Certains rapports indiquent également que la productivité oscille environ 2000 et 5000 kg de grains /ha/an présente le cycle de la culture de Jatropha [17].



Figure I.7 : Cycle de culture de Jatropha [18].

I.4. Utilisation de Jatropha curcas

I.4.1. Usage médicinal

Il est rapporté que le Jatropha curcas possède de nombreuses vertus thérapeutiques. [19] [20], l'huile extraite des graines de Jatropha curcas peut être utilisée pour fabriquer un savon aux propriétés antiseptiques en raison de la présence de glycérine. Les feuilles de Jatropha curcas, lorsqu'infusées, sont mentionnées par [21] comme étant efficaces contre les dermatoses et pour apaiser les rhumatismes, tandis que les racines infusées seraient utilisées pour traiter la diarrhée. Plusieurs auteurs [22] [23] ont rapporté que le latex de Jatropha curcas peut avoir des effets coagulants et anticoagulants, tandis que la sève peut favoriser la cicatrisation.

De plus, [24] a démontré l'effet cytotoxique et antitumoral de la curcine à des concentrations très faibles sur des cellules cancéreuses. En outre, l'effet anti-inflammatoire des feuilles et des racines de *Jatropha curcas* a été prouvé par Mujumbar et Misar [25].

I.4.2. Production de biocarburant

Les graines de *Jatropha curcas* contiennent environ 19% d'huile, 4,7% de polyphénols et 3,9% d'hydrocarbures [26]. Cette huile est principalement composée d'acides gras insaturés tels que l'acide oléique et l'acide linoléique, qui représentent environ 80% de sa composition, ainsi que d'acides gras saturés tels que l'acide palmitique [27]. En raison de sa forte teneur en acides gras insaturés, l'huile est sujette à l'oxydation et à l'acidification, ce qui la rend instable [21]. Cette huile non comestible extraite des graines de *Jatropha curcas* est considérée comme une alternative au diesel [28] et respecte les normes internationales [29]. Les biodiesels, qui sont des esters d'acides gras mono-alkyles à longue chaîne, sont produits à partir de ressources biologiques renouvelables telles que les huiles végétales et les graisses animales [30].

Les biodiesels sont non dégradables, non toxiques et ont un impact environnemental moindre que les pétro diesels, et peuvent être utilisés dans les moteurs diesel [31]. L'huile de *Jatropha curcas* atteint des propriétés similaires à celles du carburant diesel au-dessus de 110°C [32]. La Trans estérification permet de réduire la viscosité des huiles végétales, améliorant ainsi leur qualité pour atteindre des proportions comparables voire meilleures que le diesel [33].

Des expérimentations menées dans plusieurs pays ont démontré que les moteurs diesel tels que les motopompes et les groupes électrogènes peuvent fonctionner à 100% avec de l'huile de *Jatropha curcas* purifiée, sans rencontrer de problèmes de combustion [34] [35].

I.4.3. Intérêt écologique

L'utilisation de l'huile de *Jatropha curcas* pourrait contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant des combustibles fossiles [36]. La coque séchée des graines, qui est inflammable, peut servir de substitut au bois de chauffage, offrant ainsi une solution à la déforestation en milieu rural. Le *Jatropha curcas* peut également jouer un rôle dans le reverdissement des zones dénudées et la restauration des sols grâce à ses feuilles, au tourteau des graines et aux coques de ses fruits [37]. De plus, le *Jatropha curcas* peut être planté le long des berges des rivières pour les stabiliser et limiter les risques d'inondation [38].

I.4.4. Usage agricole

Le *Jatropha curcas* peut être utilisé pour former des haies vives ou des clôtures autour des fermes, des champs ou pour délimiter des propriétés adjacentes ou indiquer des droits fonciers [35]. Grâce à son système racinaire profond, il contribue à prévenir l'érosion des sols pendant les fortes pluies [34] [39] [21]. De plus, sa résistance à la sécheresse est soutenue par son système racinaire mixte, sa protection cubique et la perte de feuillage pendant la saison sèche, ce qui réduit les pertes par transpiration [40] [41].

Les feuilles mortes de *Jatropha curcas* enrichissent le sol en matière organique [38] et améliorent ses propriétés chimiques [42]. Le tourteau qui reste après l'extraction de l'huile est un substrat organique de grande valeur agronomique (N = 4,4% ; P = 2,1% et K = 1,7%) qui peut être utilisé comme engrais organique après compostage [43] [44] [45] [46]. De plus, le *Jatropha curcas* dégage une odeur persistante qui repousse les animaux errants, ce qui en fait un choix approprié pour les haies vives [47]. Les extraits d'huile des graines de *Jatropha curcas* sont connus pour leurs propriétés molluscicides, fongicides et nématocides, selon [8]. En effet, plusieurs auteurs ont confirmé les propriétés biocides de l'huile de *Jatropha curcas*, notamment ses effets insecticides [48] [49], larvicides et antifongiques [50].

I.4.5. Intérêt socio-économique

Le *Jatropha curcas* joue un rôle important dans le développement d'un véritable tissu économique local [20]. En effet, sa culture contribue à la lutte contre la pauvreté en milieu rural de plusieurs façons :

- ✓ Elle crée de nouvelles activités génératrices de revenus supplémentaires, en particulier pour les populations les plus vulnérables, telles que les femmes et les jeunes.
- ✓ Elle offre une source de revenus aux ménages grâce à la production et à la commercialisation de savons ainsi qu'à la vente des graines de *Jatropha curcas*.
- ✓ Elle contribue à l'indépendance énergétique du pays en réduisant les dépenses liées à l'achat de carburant étranger.
- ✓ Elle améliore le rendement des cultures en favorisant la fertilité des sols et en luttant contre la dégradation des terres. Le *Jatropha curcas* protège également les cultures contre les dommages causés par les animaux et sert de moyen de délimitation des exploitations, contribuant ainsi à la réduction ou à la prévention des conflits sociaux entre les agriculteurs et entre les agriculteurs et les éleveurs [37].

I.5. Taxonomie de *Jatropha curcas*

Le *Jatropha curcas* L., communément appelé *Jatropha* dans le reste du texte, est une plante appartenant au sous-règne des Phanérogames, à l'embranchement des Angiospermes, à la classe des Magnoliopsidae, à la sous-classe des Rosidae, à l'ordre des Euphorbiales et à la famille des Euphorbiaceae. Cette plante fait partie de la sous-famille des Crotonoïdeae [51] et du genre *Jatropha*, qui compte environ 170 espèces connues [52]. Une récente étude a réexaminé la subdivision proposée par [53] du genre *Jatropha* et a identifié deux sous-genres distincts : le *Jatropha* et le *Curcas*. Ce qui est nouveau, c'est leur hypothèse selon laquelle le *Jatropha curcas* représente la forme primitive du genre *Jatropha*.

I.6. Le tourteau de *Jatropha*

Le terme "tourteau" fait référence au résidu obtenu lors de la pression des graines de *Jatropha curcas* L. Il représente la plus grande partie des produits finaux après transformation : pour chaque tonne de graines pressées de *Jatropha curcas*, on obtient entre 500 et 800 kg de tourteau et entre 240 et 300 kg d'huile [54]. Étant donné que les graines sont décortiquées avant d'être pressées, les coques fibreuses constituent un autre résidu. Plus de 85 % de la biomasse des graines de *Jatropha* n'est donc pas utilisée dans la production de biocarburant.

Le tourteau de *Jatropha* est riche en protéines et en éléments minéraux. Il pourrait donc être valorisé en tant que fertilisant ou aliment pour le bétail, contribuant ainsi de manière significative à l'économie de la filière, tout comme cela se fait dans d'autres filières oléagineuses telles que le soja et le colza. Cependant, ce coproduit est actuellement peu ou pas valorisé. En effet, l'attention de la communauté scientifique et du secteur du développement s'est principalement portée sur l'huile de *Jatropha* et sa transformation en biodiesel, négligeant ainsi les autres coproduits de cette plante. Cela représente actuellement une perte financière importante pour tous les acteurs de la filière, en particulier les producteurs.

I.7. L'huile de *Jatropha*

Beaucoup le considèrent comme une importante source potentielle de biodiesel idéal. L'huile de *Jatropha curcas* filtrée peut être utilisée comme biocarburant dans des nombreux véhicules équipés d'un moteur diesel, nécessitant seulement des modifications mineures. De plus, elle peut être utilisée comme substitut du kérosène comme biocarburant pour le chauffage et l'éclairage [2].

I.7.1. Composition

L'huile de Jatropha contient plus de 75% d'acides gras insaturés, qui se reflètent dans le point de coulée et le point de nuages d'huile. Les acides gras d'huile sont constitués d'acide oléique (C18 : 1) et d'acide linoléique (C18 : 2). La composition en acides gras comme dans le (tableau I.2) [2].

Tableau I.2 : Composition en acides gras de l'huile de Jatropha [55].

Acide gras	Nom chimique des acides gras	Structure	Formule	W _t
Palmitique	Hexadecanoic	16 :0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	14.2
Stéarique	Octadecanoic	18 :0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	6.9
Oléique	Cis-9-Octadecenoic	18 :1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	43.1
Linoléique	Cis-9, cis-12-Octadecadienoic	18 :2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	34.4
Linoléinique	Cis-9, cis-12, cis-15-Octadecatrienoic	18 :3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	0.2

I.7.2. Caractéristiques de l'huile de Jatropha

Le tableau (I.3), présente une comparaison entre les propriétés d'huile de Jatropha, de l'ester méthylique, d'huile de Jatropha et du carburant diesel.

Tableau I.3 : Comparaison entre les propriétés d'huile de Jatropha, de l'ester méthylique, d'huile de Jatropha et du carburant diesel [56] [57] [58] [31].

Propreté	Unité	Huile de Jatropha	MEHJ	Diesel	ASTM D6751-02	EN 14214
Densité à 15°C	Kg/m ³	920	864	850	875-900	860-900
Viscosité à 40°C	mm ² /s	35.4	4.84	2.60	1.9-6.0	3.5-5.0
Flash point	°C	225	135	70	> 403	> 393
Pour point	°C	-6	-6 à 2	-20	-	-
L'eau contient	%	5	Nil	0.02	< 0.03	< 0.05
Ash contient	%	0.7	Nil	0.01	< 0.02	< 0.02
Carbone résidu	%	0.3	0.025	0.17	-	< 0.3
Sulfate contient	%	0.02	Nil	-	0.05	-
Valeur d'Acide	mg KOH/g	11	0.496	0.062	< 0.08	< 0.5
Valeur de Iode	-	101	108.4	-	-	-
Valeur de Saponification	-	195	202	-	-	-
Valeur calorifique	MJ/kg	38.65	40-42	42-46	-	-
Nombre de cétane	-	23	51	40-55	-	-

I.7.3. Propriétés physico-chimiques de l'huile de Jatropha

Afin d'être utilisée comme carburant dans les moteurs, l'huile de Jatropha doit répondre à des critères de qualité spécifiques. Actuellement, il n'existe pas de norme dédiée à l'utilisation de l'huile végétale pure de Jatropha comme carburant. Par conséquent, deux options sont possibles : se référer à la norme allemande DIN 51605 (Annexe 2) ou suivre les recommandations des chercheurs pour des utilisations spécifiques. La norme DIN 51605 définit les normes de qualité auxquelles l'huile végétale pure de colza doit se conformer pour être utilisée comme carburant dans les moteurs.

Cette norme stipule une quinzaine de caractéristiques chimiques et physiques, chacune étant définie par des valeurs limites à respecter (Annexe 2). Les caractéristiques chimiques comprennent l'indice d'iode, l'indice d'acide, le contenu en phosphore, le contenu en soufre, le contenu en magnésium et en calcium, la teneur en eau, la stabilité à l'oxydation et la teneur en particules. Les propriétés physiques de l'huile de Jatropha incluent la densité, le point éclair, la valeur calorifique, la viscosité, l'indice de cétane et le carbone résiduel. Certaines de ces propriétés sont spécifiques au type d'huile végétale [59], tandis que d'autres dépendent de facteurs tels que la qualité des graines (en particulier la teneur en eau), le processus de trituration (pression dans la presse et température d'extraction), le traitement physique (filtration, décantation) et le raffinage chimique, ainsi que les conditions de stockage.

Tableau I.4 : Propriétés variables de l'huile de Jatropha [59]

Propriétés variables	Unité
Teneur en particules	mg/kg
Indice d'acide	mg KOH/g
Stabilité à l'oxydation à 110°C	heures
Contenu en phosphore	mg/kg
Contenu en magnésium et en calcium	mg/kg
Contenu en cendre	%
Contenu en eau	%

I.8. Les avantages et inconvénients

A. Les avantages

- Possède une longévité, est tolérante à la sécheresse, mais semble être négligée et adaptée à l'enfouissement ;
- Peut pousser dans presque tous les types de sol, même sablonneux, salé ou autre, même dénudé ;
- Peut stabiliser les dunes, servir de brise-vent et prévenir la désertification ;
- Éloigne les animaux et les insectes de la nature ;
- N'appauvrit pas les nutriments du sol ;
- Aucune rotation coûteuse des cultures n'est nécessaire ;
- N'a pas besoin d'engrais ;
- Croissance rapide et facile à établir ;
- Rendements élevés (environ 1000 barils d'huile par mile carré par an, avec une teneur en huile de graines de 55 à 60%) ;
- Avantages importants pour les pays en développement en termes d'énergie et de création d'emplois ;
- La glycérine, sous-produit du biodiesel, présente ses propres avantages ;
- La plupart des déchets après l'extraction de l'huile peuvent être utilisés comme engrais ;
- L'usine recycle 100% du CO₂ émis par la combustion du biodiesel ;
- Peut être utilisée comme haie pour prévenir et contrôler l'érosion et améliorer la qualité des sols ;
- L'huile de Jatropha a un indice de saponification élevé et est souvent utilisée dans la fabrication du savon dans certains pays. Utilisée comme source de lumière, elle ne produit pas de fumée lorsqu'elle est brûlée ;
- Le latex de J. curas contient un alcaloïde appelé "Jatrophine" qui est supposé avoir des propriétés anticancéreuses ;
- L'écorce de J. curas est utilisée pour fabriquer un colorant bleu foncé utilisé pour teindre les tissus, les filets de pêche, etc.. ;
- Les sous-produits des graines de J. curas contiennent des niveaux élevés d'azote, de phosphore et de potassium, et sont utilisés comme alimentation animale et comme engrais ;
- Le tourteau peut être utilisé pour produire du biogaz, qui peut être utilisé localement comme combustible pour la cuisine domestique [31].

B. Les inconvénients

- N'est pas résistant à la sécheresse ;
- Le *Jatropha* ne donne pas de bons rendements dans des conditions défavorables [18] ;
- Les graines et les feuilles sont toxiques pour les humains et les animaux ;
- La toxicité est attribuée à plusieurs composants (esters de phorbol, curcaïne, inhibiteurs de la trypsine, etc.), ce qui rend le processus de détoxification complet difficile ;
- Il y a une concurrence avec la production alimentaire pour l'utilisation des terres [60].

Conclusion

D'après les informations précédentes, nous pouvons tirer la conclusion que la plante de *Jatropha curcas* présente de nombreux avantages et applications. Les huiles obtenues à partir de ses graines sont utilisées dans divers domaines tels que la médecine et les cosmétiques. De plus, grâce à des techniques et procédés chimiques, elles peuvent être transformées en pesticides, savons et biocarburants renouvelables.

D'un autre côté, il convient de souligner que la plante de *Jatropha curcas* n'est pas utilisée directement à des fins de consommation humaine. Toutefois, elle trouve de nombreuses applications dans l'industrie.



Chapitre II :
Généralité sur les
Biocarburants

Introduction

La production mondiale d'agrocarburants qui a atteint 65.35 millions de tonnes équivalent pétrole en 2013 est le résultat d'un véritable boom observé à l'échelle mondiale durant ces quinze dernières années. Tirée par les soutiens publics accordés aux bioénergies dans le cadre de la promotion des énergies renouvelables, la production de biocarburants a connu une nette progression [61]. Par conséquent dans ce chapitre, nous avons traité de l'étude des biocarburants en identifiant leurs générations et ses types, ou nous sommes concentrés sur le troisième type : le biodiesel, en mentionnant ses propriétés physico-chimiques et la méthode la plus courants pour production, représentée par la Trans estérification à l'aide d'alcool et d'un catalyseur approprié.

II.1. Définition des biocarburants :

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux produits à partir de matières végétales et de résidus agricoles, de déchets municipaux. Les biocarburants peuvent remplacer les carburants traditionnels dans les moteurs de voiture. Combustible liquide ou gazeux utilisé dans les transports, fabriqué à partir de la biomasse. Biomasse "La fraction biodégradable des produits, déchets et résidus dérivés des déchets agricoles, forestiers, industriels et municipaux ; [62] [63].

Le terme biocarburant est similaire au terme anglais biofuel, qui désigne à la fois les biocarburants solides et les biocarburants liquides ainsi que le biogaz [63].

Les carburants comprennent les dérivés industriels obtenus après transformation de produits d'origine végétale ou animale, tels que les gaz, les alcools, les éthers, les huiles et les esters [64]. Le nom d'agro carburant existe aussi et est utilisé plus fréquemment dans le domaine de l'écologie, à ne pas confondre avec le nom "BIO", qui est associé à l'agriculture biologique.

II.1.1. Les générations de biocarburant

En générale, les biocarburants sont classés en trois catégories des produits dits primaires et secondaires. Les biocarburants primaires, comme le bois, sont utilisés sous leur forme brute : ils ne subissent aucun traitement et ils sont dédiés principalement à la production de la chaleur (chauffage) ou de l'électricité. Les biocarburants secondaires tels que l'éthanol et le biodiesel, sont produits à partir du traitement de la biomasse et ont un large éventail d'applications, à l'instar du transport et des procédés industriels opérant à hautes températures [65].

On distingue généralement trois générations des biocarburants, qui se différencient par la nature de la biomasse mobilisée pour leur production.

II.1.1.1. Biocarburants de 1^{ère} génération

Un biocarburant de première génération est un agro-carburant produit à partir des 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.

Le biocarburant de première génération le plus répandu est l'éthanol, dont la production est largement dominée par le Brésil et les Etats-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.

Un autre biocarburant de première génération, le plus connu et le plus consommé, est le biodiesel produit à partir des plantes oléagineuses par Trans estérification ou craquage, à l'exemple du biodiesel synthétisé à partir d'huile de colza en Allemagne et à partir d'huile de palme en Malaisie.

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 d'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 les 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 termes 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 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 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 [65].

II.1.1.2. Les biocarburants de 2^{ème} génération

Un biocarburant de deuxième génération est obtenu à partir d'une biomasse dédiée a 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) 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. 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 dualité 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 [65].

II.1.1.3. Les biocarburants de 3^{ème} génération

Les biocarburants dits de troisième génération, dérivés de microbes et de microalgues, 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 microalgues, peuvent être utilisées pour produire du biodiesel, du fait que ces organismes peuvent biosynthétiser 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'intéressant à déterminer les conditions optimales de la production d'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 microalgues reste toutefois à confirmer [65].

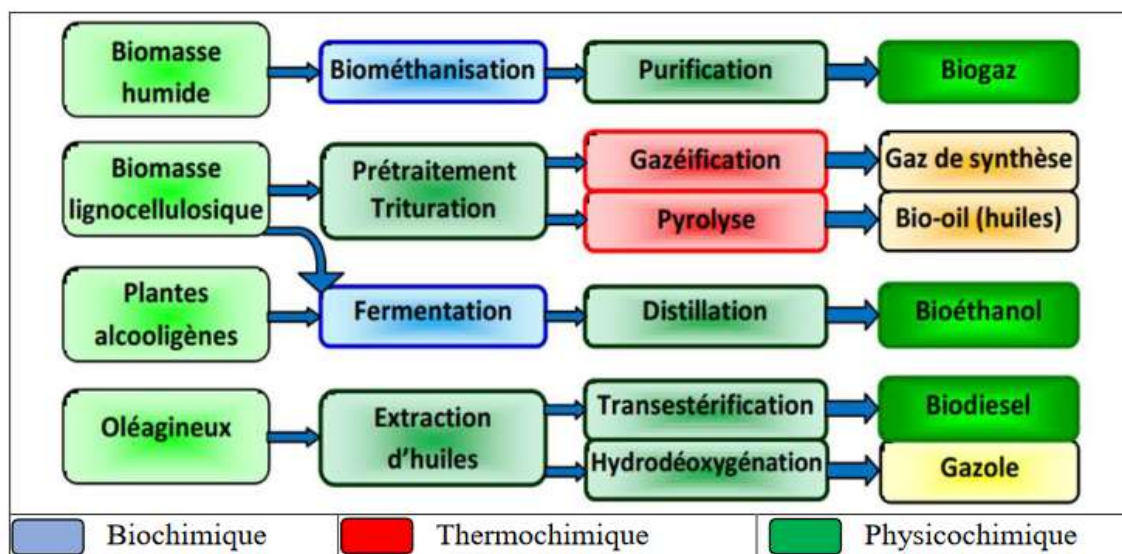


Figure II.1 : Filières de conversion de la biomasse en biénergies selon les différents procédés [66]

II.2. Les types de biocarburants

II.2.1. Le 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, soit par gazéification (craquage thermique) du bois. 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 d'énergie ; ces sources de biogaz sont les déchets solides des sites d'enfouissement sanitaire ou technique (dépotiers) ou encore les boues des stations d'épuration.

II.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 des 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, sans aucune modification nécessaire des moteurs.

II.2.3. Le 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). Le bio-huile est un mélange complexe qui contient une grande variété de composés de différentes classes chimiques, tels que 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.

II.2.4. Le biodiesel (biogazole)

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 microalgues (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 [65].

II.3. La production mondiale de biocarburant :

La production mondiale de biocarburant était de 22 millions de tonnes en 2010, soit plus de 700 kg par seconde, selon l'OCDE (Organisation Economique de commerce et de développement). Le marché mondial des biocarburants est en constante augmentation surtout dans les pays occidentaux où la production de biocarburant est inférieure à la demande. Cela laisse prévoir de très importantes suites pour les investissements dans ce secteur, d'autant plus que les pays occidentaux incitent à la consommation de biocarburants par le biais de la loi : l'Union européenne s'est par exemple fixé l'objectif de parvenir à 10% d'agrocultures dans sa consommation totale.

Les Etats Unis dominent le classement mondial réalisé pour le biodiesel avec des capacités de production en service de 5,9 milliards de litres. Ils sont serrés par l'Allemagne, dont les capacités sont estimées à un peu plus de 5 milliards de litres. Viennent ensuite l'Espagne à 5 milliards de litres, puis l'Indonésie [2].

Il convient de souligner que 10% seulement des capacités de production de biodiesel aux Etats-Unis sont actuellement exploitées précise Tammy Klein, vice-président adjoint chez Hart Energy Consulting, en 2010. [2]

II.4. Les avantages et inconvénients des biocarburants :

Le tableau (II.1) récapitulant les principaux avantages et inconvénients des biocarburants :

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des biocarburants [2]

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none">❖ Réduisent les émissions de gaz à effet de serre (GES) ainsi que la consommation d'énergie non renouvelable.❖ Émettent moins de polluants, tels que le soufre responsable des pluies acides, les suies et les particules fines.❖ Permettent la diversification des sources de production d'énergie, réduisent la dépendance à l'or et favorisent l'utilisation de ressources domestiques.	<ul style="list-style-type: none">❖ L'accroissement de la demande de biocarburants a entraîné une augmentation des prix mondiaux des céréales et des oléagineux.❖ Les biocarburants nécessitent une grande quantité d'énergie pour leur production et sont coûteux à cultiver, à récolter et à transformer.❖ Ils créent une concurrence féroce entre les cultures destinées à la production d'énergie et celles destinées à l'alimentation.❖ Le développement des biocarburants issus de cultures énergétiques peut représenter une menace pour les écosystèmes et les réservoirs naturels de carbone.

II.5. Définition de biodiesel :

Le biodiesel est un ester méthylique obtenu par réaction chimique avec un alcool léger et des matières grasses végétales ou animales [25]. Le biodiesel est un carburant renouvelable propre, a récemment été considéré en tant que meilleur candidat pour une substitution de gazole parce qu'il peut être employé dans n'importe quel moteur à allumage par compression sans le besoin de modification (FigureII.2) [2].

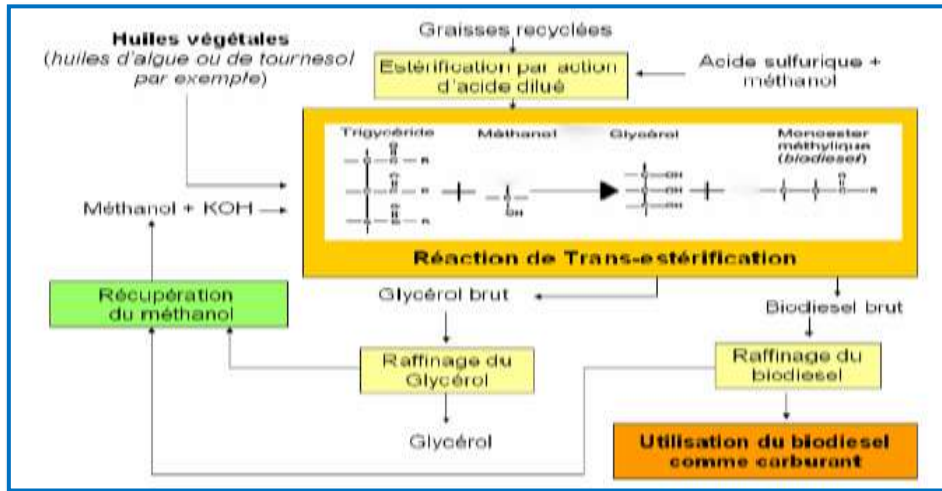


Figure II.2 : Techniques d'obtention du biodiesel [2]

II.5.1. La Production mondiale du biodiesel

Les huiles végétales Trans estérifiées sont appelées biodiesel. Ce carburant alternatif au diesel fossile est obtenu par la réaction entre l'huile et l'alcool, formant ainsi des esters méthyliques ou éthyliques d'huiles végétales, ainsi que de la glycérine (appelée également glycérol) qui est un produit de grande valeur. La valorisation de la glycérine joue un rôle crucial dans l'équilibre économique de cette filière [67]. Le biodiesel présente des propriétés supérieures à celles du carburant diesel traditionnel à base de pétrole. Il est renouvelable, biodégradable, non toxique et pratiquement exempt de soufre et de composés aromatiques. Le biodiesel est considéré comme un carburant prometteur pour l'avenir, grâce à ses avantages environnementaux de plus en plus attractifs. En effet, il s'agit d'un carburant écologique qui peut être utilisé dans n'importe quel moteur diesel sans nécessiter de modifications [68].

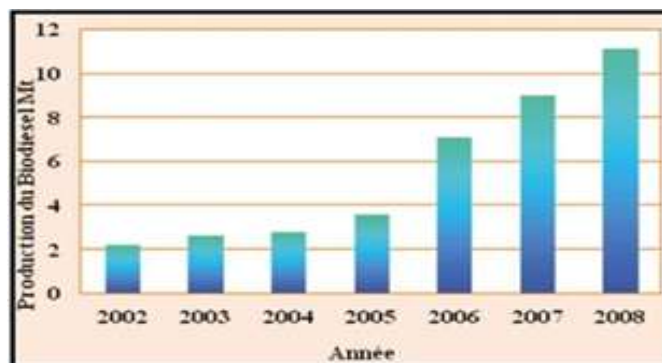


Figure II.3 : Evolution de production de biodiesel dans le monde [69]

II.5.2. Les caractéristiques physico-chimiques de biodiesel

L'ester éthylique d'huile consiste de trois acides gras : Acides linoléique, acides oléique, acides palmitique et les autres acides sont présents sous forme des traces. Le tableau ci-dessous compare certaines propriétés physiques du gazole à celles des huiles et de leurs esters.

Tableau II.2 : Propriétés physiques comparées entre les huiles, leurs esters correspondants et du gazole [69].

Huile ou ester	Densité (g/ml)	Viscosité à 37.8°C (mm ² /s)	Indice de cétane	Point trouble (°C)	Point éclair (°C)	PCI* (MJ/kg)
Gazole de référence	0.832	1.6-6.0	45.0	-17.8	46	35.3
Huile d'Arachide	0.921	41.2	41.5	+3	237	34.1
Ester méthylique d'arachide	0.883	4.9	54.0	+5	176	33.6
Huile de soja	0.923	36.8	38.5	-4	219	34.0
Ester méthylique de soja	0.885	4.5	45.0	+1	178	33.5
Huile de Palme	0.918	39.6	42.0	+31	267	35.0
Ester méthylique de palme	0.880	5.7	62.0	+13	164	33.3
Huile de tournesol	0.924	37.1	35.5	-5	232	34.0
Ester méthylique de tournesol	0.880	4.6	49.0	+1	183	33.5
Huile de colza	0.92	30.2 à 40°C	35		Décomposition > 320	37.7
Ester méthylique de colza	0.88-0.885	4.5 à 40°C	51		170-180	39.96

On remarque que les propriétés d'ester issu d'huile varient en fonction de la nature d'huile utilisée, surtout l'indice de cétane, le point trouble et le point éclair. Cependant, les propriétés des Esters sont très proches de celles du gazole. Le principal intérêt de l'utilisation des esters par rapport à leurs huiles est l'abaissement de la viscosité et de la température limite de filtrabilité.

En effet, la viscosité diminue de l'ordre d'un facteur de 7 à 10. Cette baisse est un atout primordial puisqu'elle permet une bien meilleure atomisation par les injecteurs et donc une bien meilleure combustion. L'indice de cétane sert à apprécier l'aptitude à l'auto-inflammation d'un gazole sur une échelle de 0 à 100. Par rapport à l'huile, on voit que la transestérification améliore nettement l'indice de cétane. Il apparaît que cet indice augmente avec le poids moléculaire d'acide

gras ainsi qu'avec le poids moléculaire de l'alcool pour un même acide gras, tandis qu'il diminue avec le nombre d'insaturations.

En Europe, l'indice de cétane le plus faible des gazoles est voisin de 45 ; la moyenne en France est proche de 50. Le point éclair des esters est plus élevé que celui du gazole. Cela en fait des carburants moins dangereux à manipuler que le gazole. Il est clair que les propriétés physiques changent énormément quand on passe de l'huile à son ester correspondant. On se rapproche par la suite des propriétés du gazole. Il existe des normes européennes (DIN EN 14214) et américaines (ASTM D 6751) qui contrôlent ces propriétés chimiques et physiques comme montré en [annexe \(1\)](#) [69].

II.5.3. Synthèse de biodiesel (réaction de Trans estérification)

La méthode couramment utilisée pour produire du biodiesel est la Trans estérification. Cette réaction est essentielle car elle permet d'augmenter la volatilité de l'huile, ce qui est crucial pour assurer une combustion optimale. De plus, elle réduit la masse moléculaire de l'huile de manière significative, entraînant ainsi une diminution de sa viscosité et de sa densité. [2]

Une autre méthode très importante pour convertir les huiles végétales en carburant diesel est l'alcoolyse, également appelée Trans estérification. Ce processus implique le remplacement des groupements alcool d'un ester par d'autres types d'alcools en présence d'un catalyseur. Il est similaire à l'hydrolyse, mais sans la présence d'eau. Ce processus permet la formation d'un nouvel ester et d'un nouvel alcool en récupération [70].

Selon la réaction générale présentée dans la figure (II.4) :

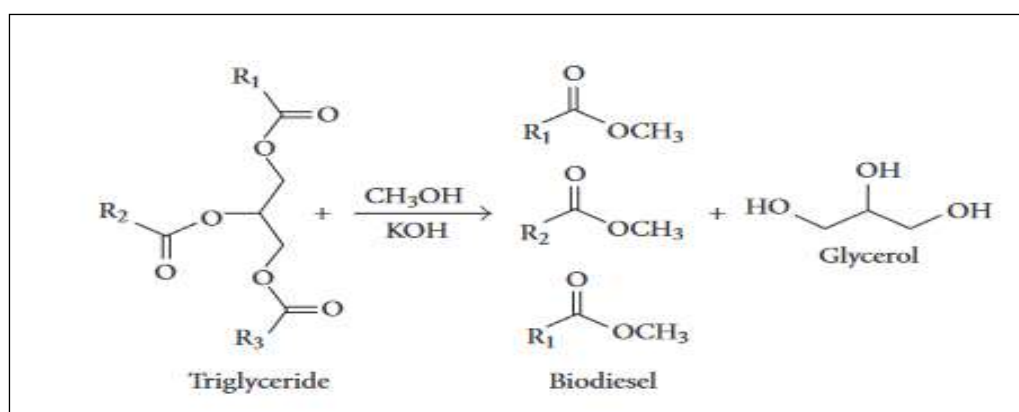


Figure II.4 : Réaction de Trans estérification entre un triglycéride et de méthanol [71].

II.5.3.1. Le mécanisme de Trans estérification

- Mécanisme de la réaction

La réaction de Trans estérification est une réaction chimiquement équilibrée. Les deux premières étapes (1) et (2) se déroulent rapidement car les fonctions esters primaires subissent en premier lieu une Trans estérification. En revanche, la troisième étape (3) est plus lente. Dans le cadre d'une catalyse basique, le mécanisme de réaction est le suivant :

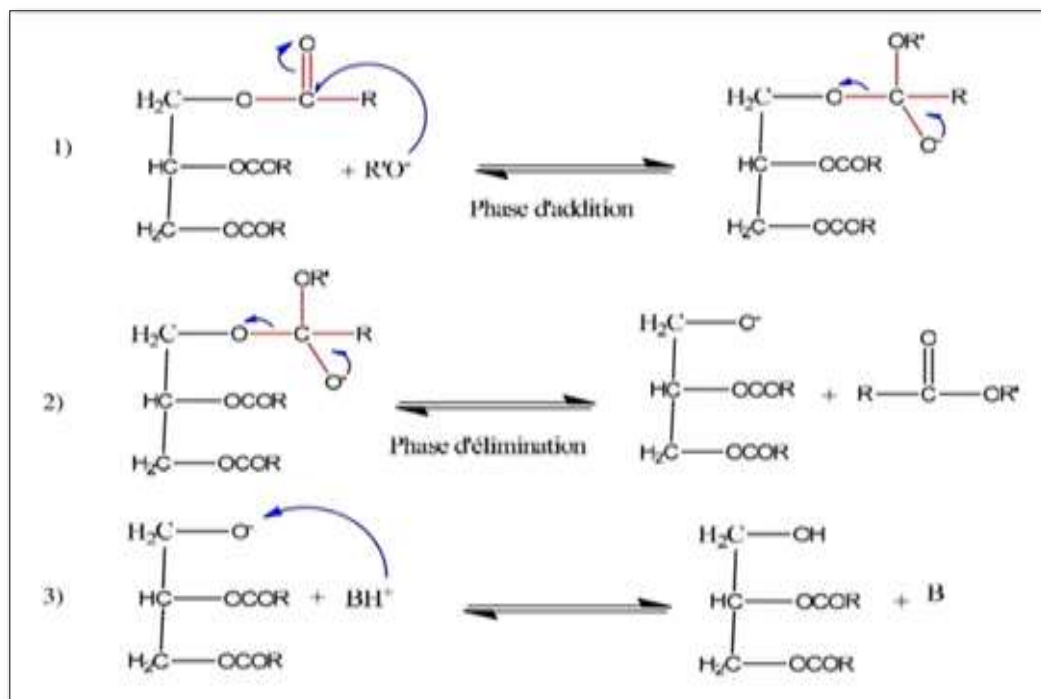


Figure II.5 : Mécanisme de la réaction de Trans estérification d'huile végétale par l'alcool catalysée par une base.



Le processus commence par une attaque nucléophile du carbonyle (présent dans le triglycéride) par l'anion alcoolate, formant ainsi un carbanion intermédiaire (phase d'addition). Ensuite, le doublet de l'oxygène est rabattu, ce qui entraîne un départ nucléofuge (phase d'élimination). L'anion alcoolate est régénéré lorsque la fonction alcoolate apparaît dans le glycérol. Lorsqu'on utilise des catalyseurs tels que NaOH, KOH, K_2CO_3 ou d'autres catalyseurs similaires, l'alcoxyde formé est souvent considéré comme l'espèce catalytique.

La troisième réaction (monoglycéride donnant l'ester) semble être l'étape déterminante de la réaction, car les monoglycérides sont des intermédiaires plus stables que les diglycérides [69].

II.5.3.2. But de la réaction de Trans estérification

En l'absence d'oxygène, la décomposition thermique d'une huile, qui est un ester de glycérine, entraîne la formation de glycérol et d'un mélange d'esters. L'objectif de cette étude est de pouvoir utiliser les esters ainsi obtenus comme carburant diesel. En parallèle, cette étude présente les avantages suivants :

- Élimination complète de la glycérine ;
- Réduction du point d'ébullition de l'huile ;
- Réduction du point d'éclair de l'huile ;
- Utilisation de la glycérine dans l'industrie chimique ;
- Utilisation des sous-produits dans l'industrie du savon et des détergents [72].

II.5.3.3 Les paramètres influents la cinétique de cette réaction

1) **Le rapport alcool/Huile** : Selon la majorité des études, le rapport molaire et la température sont les deux facteurs les plus importants qui influencent la vitesse de la réaction de Trans estérification des huiles végétales. La stoechiométrie de la réaction implique l'utilisation de trois moles d'alcool pour une mole de triglycéride, ce qui donne une mole de glycérol et trois moles d'esters d'acides gras.

Cependant, la Trans estérification est une réaction équilibrée où un excès d'alcool est nécessaire pour favoriser la formation des esters. Des recherches [73] [74] ont montré que, pour maximiser le rendement en présence d'une catalyse basique, un rapport molaire d'au moins 6 :1 doit être utilisé.

Il est mentionné que des rapports molaires plus élevés que 6 :1 rendent plus difficile la décantation du glycérol et la séparation des esters, car la présence de glycérine dans le milieu réactionnel pousse l'équilibre vers la formation des triglycérides, ce qui réduit le rendement en esters. En revanche, pour une catalyse acide, un rapport molaire plus élevé est recommandé pour augmenter le rendement de la réaction [69]. Le rapport molaire d'alcool par rapport aux triglycérides est l'un des paramètres les plus 1e de trois moles d'alcool et une mole de triglycérides est nécessaire pour obtenir trois Moles d'esters d'acides gras et une mole de glycérol. L'excès d'alcool favorise la conversion Maximale en esters en conduisant la réaction dans le sens souhaité, conformément au principe de Le Chatelier [75].

Cependant, un rapport molaire élevé en alcool/huile végétale peut affecter la séparation de la glycérine en augmentant sa solubilité. La présence de glycérine en solution déplace l'équilibre de la réaction vers la gauche, réduisant ainsi le rendement en esters.

Le méthanol et l'éthanol sont les principaux alcools utilisés dans les réactions de Trans estérification. Le méthanol présente une meilleure réactivité que l'éthanol, mais sa solubilité est plus faible, ce qui limite le rendement de transfert de masse. En revanche, l'éthanol est plus soluble mais moins réactif que le méthanol, ce qui a un impact positif sur le rendement mais un effet négatif sur la vitesse de réaction. Cependant, l'émulsion formée par le mélange obtenu après la réaction avec l'éthanol peut poser des difficultés lors de la séparation [73].

- 2) **La nature et la qualité de l'huile :** La présence d'eau et d'acides gras libres dans l'huile peut entraîner des réactions secondaires indésirables. En conséquence, la cinétique de la transestérification est affectée.
- 3) **La nature, la quantité et le type de catalyseur :** La transestérification est généralement effectuée en présence d'un catalyseur, qui peut être une substance chimique (catalyse homogène ou hétérogène) ou une enzyme (catalyse enzymatique). Cependant, quelques études ont signalé des cas de transestérification réalisée sans l'utilisation d'un catalyseur dans la littérature.
- 4) **La température et la pression :** La majorité des études sur la Trans estérification catalysée des huiles végétales, comme indiqué dans la littérature, sont menées sous pression atmosphérique. La plage de température utilisée varie généralement de 40 à environ 300°C, en fonction de la nature de l'huile, du type de catalyseur et du catalyseur lui-même. Il convient de noter que la température maximale appliquée ne dépasse pas la température de dégradation de l'huile [66].

II.6. Etude de l'effet des paramètres réactionnels sur la réaction de transestérification :

II.6.1. La catalyse

A) **Catalyse homogène :** La transestérification avec catalyse homogène implique la mise en contact de l'huile et de l'alcool avec un catalyseur dilué dans la phase alcool. Le catalyseur peut être de nature alcaline,

Acide ou enzymatique. Parmi les exemples de catalyseurs homogènes, on retrouve :

- Les catalyseurs basiques tels que les hydroxydes, alcoolates ou savons de métaux alcalins ou alcalino-terreux (Li, Na, K, Ca, Ba, Cs) et les amines de la famille des guanidines.
- Les catalyseurs acides tels que les acides minéraux (HCl, H₂SO₄), les acides sulfoniques, les résines échangeuses d'ions (acide fort) et les zéolithes.
- Les catalyseurs enzymatiques ou autres, tels que les alcoolates de titane (Ti (O*Bu*)₄, Ti (O*iPr*)₄) et les oxydes de divers métaux comme Sn, Mg, Zn, Ti, Pb.

Tableau II. 3 : Avantage et inconvénients des catalyseurs basiques et acides [65].

Catalyseurs basiques		Catalyseurs acides	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
- Catalyseurs disponibles (NaOH, KOH), moins coûteux.	- Sensible aux AGLs. - Existence de réaction de saponification.	- Insensible aux AGLs et à l'eau contenue dans l'huile.	- Réaction très lente. - Réactions coûteuses en énergie.
- Conditions réactionnelles modérées (T et P faibles).	- Difficulté de purification du produit final pour cause d'émulsion savonneuse.	- Estérification et transestérification simultanées, ce qui améliore le rendement.	- Corrosion des installations. - Impossibilité de récupérer le catalyseur.

B) Catalyse hétérogène : La catalyse est qualifiée d'hétérogène lorsque les réactifs et le catalyseur se trouvent dans des phases distinctes. Dans le cas de la Trans estérification, nous avons un système à trois phases composées d'huile végétale, d'alcool et d'un catalyseur solide [76]. Pour développer des procédés de production de biodiesel économiques, il est essentiel d'utiliser des Catalyseurs hétérogènes sélectifs. Ces catalyseurs sont efficaces pour les réactions de Trans estérification, même en présence d'acides gras libres et d'eau. De plus, ils facilitent la séparation du glycérol pur et ne nécessitent pas de méthodes complexes pour purifier le produit [77].

Les principaux types de catalyseurs solides utilisés jusqu'à présent peuvent être classés dans plusieurs catégories, notamment les catalyseurs d'oxyde métallique, les catalyseurs issus de la biomasse, etc.

Tableau II.4 : Comparaison des catalyses homogènes et hétérogènes [77].

	Catalyse Homogène	Catalyse Hétérogène
Conditions de température et de pression	Douces : 45 à 85°C à la pression atmosphérique	Elevées : 180à 220°C sous 40 à 6 0bars
Vitesse de la réaction	Elevée	Faible
Séparation catalyseur/produits	Pas aisée	Facile
Formation de savons, émulsion	Oui	Non
Emission de gaz à effet de serre	Plus importante	Moins importante
Coût du catalyseur	Faible	Moins faible
Durée de vie du catalyseur	Courte	Plus longue
Rendement	98,5 à 99,4%	Peut atteindre 100%

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les aspects généraux des biocarburants, en mettant l'accent sur la réaction de Trans estérification, le biodiesel et les catalyseurs utilisés tels que le KOH et le NaOH. La transestérification est une étape clé dans la production de biodiesel à partir d'huiles végétales ou animales, impliquant la conversion des triglycérides en esters méthyliques ou éthyliques. Les catalyseurs à base de KOH et de NaOH sont couramment utilisés pour cette réaction. Le biodiesel offre des avantages environnementaux tels que la biodégradabilité, la non-toxicité et une meilleure combustion, réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Il peut également être utilisé dans les moteurs diesel sans modifications majeures. Le choix du catalyseur dépend des conditions réactionnelles et des objectifs de production, avec le KOH préféré pour sa forte activité catalytique. Ces connaissances générales sur les biocarburants fournissent une base solide pour concentrer sur la production de biodiesel à partir de l'huile non conventionnelle de *Jatropha curcas*, explorée dans le chapitre1.

A decorative border resembling a scroll, with a green outline and white fill, framing the text. The scroll is unrolled at the top and bottom, with the ends curling inward.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III. Matériels et Méthodes

L'huile des graines de *Jatropha* a des propriétés précieuses telles qu'une bonne stabilité par rapport à l'huile de soja, une faible viscosité par rapport à l'huile de ricin et de meilleures propriétés à froid par rapport à l'huile de palme [78].

III.1. Matériel végétale

L'huile t de *Jatropha curcas* utilisé dans cette étude a été fournie par LFACP, Laboratory of Functional Analysis of Chemical Processes, Faculty of Technology (Blida 1 University - Algeria).

III.2. Caractérisation des produits obtenus

L'analyse physico-chimique permet de savoir l'aspect et les caractérisations physique et chimiques des échantillons à étudier. Dans notre cas, l'huile végétale et l'ester méthylique de cette l'huile (Biodiesel) sont dérivés l'un de l'autre.

III.2.1. Les propriétés chimiques

a) L'indice de Saponification (NFT 60-206)

L'indice de saponification est donc la quantité de potasse (KOH) ou (NaOH), exprimé en mg nécessaire pour saponifier 1 g de corps gras [79] En effet, plus les molécules d'acides ont d'atomes de carbone, moins l'indice de saponification est élevé. Il rend compte de la longueur des chaînes hydrocarbonées des acides gras [80].

o Principe :

L'échantillon d'huile est saponifié par reflux avec un excès connu de solution d'hydroxyde de potassium alcoolique. L'alcali nécessaire à la saponification est déterminé par titrage de l'hydroxyde de potassium en excès avec de l'acide chlorhydrique [81] L'indice de saponification I_s est donné par la formule suivant :

$$I_s = \frac{[(V_0 - V_1) \times C \times 56,1]}{m} \quad (III.1)$$

Où :

V_0 : est le volume, en millilitres, de l'acide chlorhydrique utilisé pour essai à blanc ;

V_1 : est le volume, en millilitre, de l'acide chlorhydrique utilisé pour la détermination ;

C : est la concentration exacte, en moles par litre, d'acide chlorhydrique ;

m : est la masse, en gramme, de la prise d'essai. [82].

La réaction de saponification est complète, irréversible et rapide est exprimé par l'équation suivant :

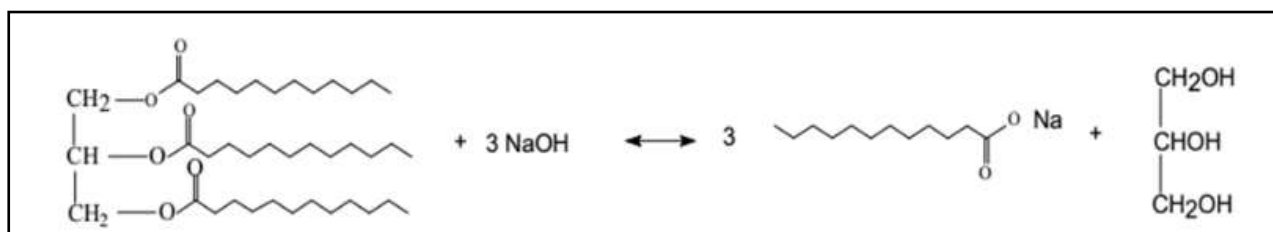


Figure III.1 : La réaction de saponification [83]

○ **Mode opératoire :**

Dans un ballon rodé, on introduit 1.5 g d'huile et 20 ml d'éthanoïque d'hydroxyde de potassium, on agite pour dissoudre puis on porte le mélange à ébullition pain marie pendant 30min ; avec agitation temps à temps. Après refroidissement en verse 2 gouttes de phénolphtaléine et on titre l'excès de potasse avec l'acide chlorhydrique 0.5 N jusqu'à décoloration. Parallèlement à cette manipulation, une réaction à blanc est effectuée dans les mêmes conditions que précédemment décrites mais sans matière pour titrer la solution de la potasse en jeu.

(a)



(b)



Photo III.1 : Montage de la réaction Saponification **(a)** et Le titrage de l'excès de potasse **(b)**.

b) L'indice d'Acide (NFT 60-204)

L'indice d'acide est défini en milligrammes de potassium nécessaire pour neutraliser les acides gras libres présents dans un gramme de graisse. Il s'agit d'une mesure relative du rancissement car les acides gras libres se forment normalement lors de la décomposition des glycérides d'huile. La valeur est également exprimée en pourcentage d'acides gras libres [81].

Cet indice indique le degré d'altération des esters (essentiellement des triglycérides) présents dans les corps gras. Après avoir pesé exactement 2 g d'huile dans un erlenmeyer de 250 ml. On les dissout avec 100 ml de solvant (50 ml éthanol + 50 ml d'éthyle éther) à l'aide d'une éprouvette et les ajouter dans l'erlenmeyer et bien mélanger. On dose avec une solution de KOH éthanolique de normalité 0.15 N après avoir ajouté 2 à 3 gouttes de phénophtaléine jusqu'à la coloration rose persistant, pour les calculs :

$$IA = \frac{56.1 \times V \times C}{m} \quad (III.2)$$

Où :

56.1 g/mol : La masse molaire de KOH ;

V : Le volume de la solution titrée de KOH utilisée (ml) ;

N : La normalité de KOH (0.15 N) ;

m : La masse de la prise d'essai (g).

c) L'indice d'Iode (NFT 60-203)

L'indice d'iode est le nombre de gramme d'iode fixés par 100g de corps gras. Cet indice nous renseigne sur le degré d'insaturation globale des chaînes grasses analysé, plus une huile est insaturée, plus l'indice d'iode est élevé. L'indice d'iode est déterminé par la relation suivante :

$$Ii = \frac{[(V_0 - V_1) \times C \times 12.69]}{m} \quad (III.3)$$

V_0 : Le volume de thiosulfate de sodium (ml) nécessaire pour l'essai à blanc ;
 V_1 : Le volume de thiosulfate de sodium (ml) nécessaire pour la détermination ;
 C : La concentration en moles par litre, de la solution titrée de thiosulfate de sodium utilisée ;
 m : La masse en (g) de la prise d'essai [79].

III.2.2. Les propriétés physiques

a) Détermination de pH

Valeur du pH en solution. Il convertit l'équilibre entre l'acide et la base sur une échelle de 0 à 14. La valeur du pH de la solution est inférieure à 7, elle est acide, égale à 7, elle est neutre et elle est alcaline supérieur à 7. Un pH-mètre est constitué d'une sonde reliée à un voltmètre. Il permet Mesure l'acidité ou l'alcalinité des solutions aqueuses.

○ Mode opératoire

- Allumez le pH-mètre.
- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée.
- Appuyer sur cal l'appareil demande le standard 1(c.à.d. le neutre PH =7).
- Prendre dans un petit bécher, la solution tampon pH= 7.
- Tremper l'électrode dans le flacon qui contient l'échantillon comme l'apparait dans la photo ci-dessous.
- Appuyer sur CAL et attendre un bon moment.
- Après la stabilisation noter la valeur de pH.
- Enlever l'électrode et rincer abondamment avec l'eau distillée.



Photo III.2 : pH-mètre.

b) Détermination de la densité de l'huile

La densité relative (ou poids spécifique, masse volumique) et le rapport de la masse d'un certain volume d'huile à 20°C, et la masse d'un volume égal d'eau distillée à la même température. La masse volumique renseigne sur le groupe auquel appartient une huile .il est à noter que la densité doit être toujours inférieure à 1 ; elle est en fonction non seulement de l'instauration mais aussi de l'oxydation ou de polymérisation (densité augmente avec l'accroissement de celles-ci). [84]

○ Principe

Le principe est basé sur le pesage à la même température de même volume d'huile et d'eau, l'unité Est exprimée en gramme par ml (g/ml) ou en kilogramme par litre (kg/L).



Photo III.3 : Mesure de la densité

○ Mode opératoire

Pour le calcul de la densité, nous suivons les étapes suivantes :

- Nettoyer le pycnomètre avec de l'eau distillée et sécher ;
- Dans une balance de précision, mesurer la masse du pycnomètre vide ;
- Remplir le pycnomètre avec un volume (5 ml) d'eau distillée et mesurer la masse du pycnomètre remplie d'eau distillée ;
- Nettoyer et sécher le pycnomètre ;
- Remplir le pycnomètre avec le même volume d'huile, et mesurer la masse de pycnomètre.

○ Expression des résultats :

La densité relative est donnée par la formule ci-dessous. [85]

$$D_{20} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0}$$

(III.4)

m_0 : La masse de pycnomètre vide ;

m_1 : La masse de pycnomètre rempli d'eau distillée ;

m_2 : La masse de pycnomètre rempli d'huile.

c) Indice de réfraction :

Le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière dans une huile ou une graisse ; plus généralement, il exprime le rapport entre l'angle d'incidence des sinus et l'angle de réfraction de la sinusoïde lorsqu'un faisceau lumineux d'une longueur d'onde de 589.3 nm passe de l'air à l'huile à une température donnée. L'indice de réfraction varie avec la température et la longueur d'onde, et avec l'insaturation. L'indice de réfraction augmente avec le degré d'insaturation des acides gras présente dans les graisses. [86]

○ Principe

Les mesures sont effectuées au réfractomètre d'ABBE, à une température de 20°C, la méthode suivie est celle décrite dans la norme AFNOR T 60-212. (AFNOR, 1984). [87]

○ Mode opératoire

- Laver les prismes du réfractomètre à l'éther de pétrole ;
- Les essuyer avec un chiffon propre très doux ;
- Verser alors entre les prismes 2 à 3 gouttes l'huile ;
- Déplacer alors la lunette de visée pour que la ligne de séparation de la plage claire et de la plage sombre se situe à la croisée des fils du réticule ;
- Lire l'indice de réfraction de l'huile à $T^{\circ}\text{C}=30^{\circ}\text{C}$.



Photo III.4 : Le refractomètre numérique d'ABBE.

d) Détermination de la température de solidification

- On prépare un mélange de glace pilée et de sel de cuisine dans un b cher (environ quatre volumes de glace pour un volume de sel) ; ce mélange permet d'obtenir une température - 20 C ; on l'appelle mélange réfrigérant ;
- On plonge dans ce mélange, un tube à essai contenant un volume exact de l'huile de Jatropha curcas et un thermomètre ;
- Relever la température de l'huile dans le tube à essai à des intervalles de temps réguliers jusqu'à ce que l'huile soit transformée en glace.

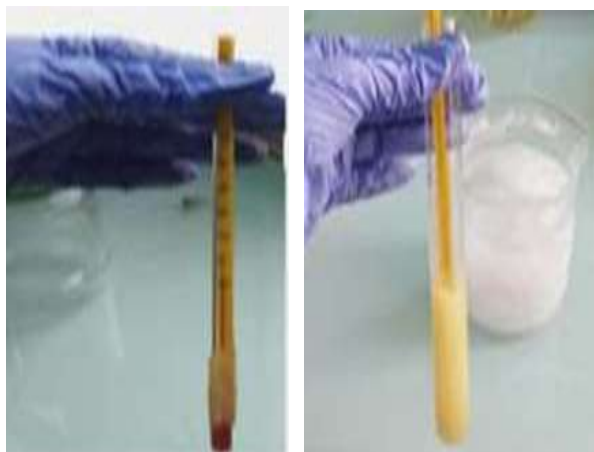


Photo III.5 : Le mélange réfrigérant et la détermination de la température de solidification.

e) Détermination de la température de d'ébullition

Le point d'ébullition est la température à laquelle un corps passe de l'état liquide à l'état gazeux. Le point d'ébullition est une propriété caractéristique physique. Dans un bain d'huile, on place un tube à essai un échantillon de l'huile étudiée, puis on la chauffe avec une plaque chauffante. Au point d'ébullition, nous mesurons la température.



Photo III.6 : La détermination du point d'ébullition.

f) Détermination de la masse volumique

La masse volumique est définie comme le quotient de la masse d'un corps par son volume, elle s'exprime en Kg/m³. Pour les produits pétroliers, elle est généralement donnée à 15°C.

o Manipulation

- Déposer une éprouvette vide de 25 ml sur le plateau de la balance électronique ;
- Appuyer sur le bouton tare ;
- Verser en suite directement un volume « V » d'huile ;
- Lire la masse « m » correspondante sur l'écran de la balance ;
- Calculer la masse volumique.

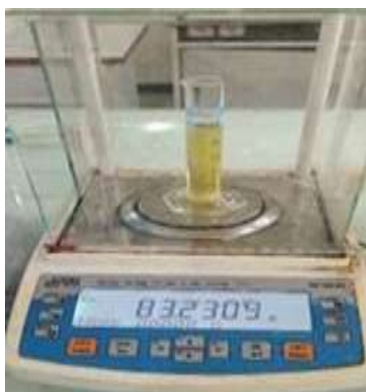


Photo III.7 : Mesure de la masse volumique.

○ Expression des résultats

La masse volumique est calculer selon la formule suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{III.5})$$

ρ : La densité de l'huile ;

m : La masse de l'huile ;

V : Le volume de l'huile.

g) Détermination de la viscosité

La viscosité est définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. Il existe plusieurs méthodes de mesure de la viscosité d'un liquide, dans notre étude nous avons choisi une méthode dite de permanganate de potassium

○ Mode opératoire

- On remplit au maximum la burette graduée avec l'huile usagée, en dépassant largement la graduation 0 ;
- A l'aide d'un compte-goutte on dépose une goutte de permanganate de potassium sur l'huile usagée contenu dans la burette ;
- On déclencher le chronomètre lorsque la goutte a atteint la graduation 0. Puis arrêter le chronomètre lorsque la goutte atteint la graduation 25 ;
- On noter le temps qu'a mis la goutte pour parcourir cette distance ;
- On mesurer à l'aide d'une règle sur la burette la distance en cm parcourue par la goutte ;
- On déduit la vitesse de la goutte en m.s^{-1} ;
- On Refaire la même expérience en mettant du biodiesel dans la burette.

○ Expression des résultats

La viscosité est mesurée en appliquant la formule suivante. [88] [89]

$$\eta = \frac{(\rho_{KMnO4} - \rho_e) \cdot V_{goutte} \times g}{6 \times \pi \times r \times v} \quad (\text{III.6})$$

V goutte : volume de la goutte en m^3 ;

η : viscosité du fluide en poiseuille (Pl) ;

ρ_{KMnO4} : masse volumique de la solution de permanganate de potassium en $kg.m^{-3}$;

ρ_e : masse volumique de l'échantillon en $kg.m^{-3}$;

g : constante de gravité terrestre ($9.81 m. s^{-2}$) ;

r : rayon de la goutte en mètre (m) ;

v : vitesse de la goutte en $m.s^{-1}$.

III.3. Trans estérification (Synthèse du biodiesel)

La Trans estérification est la méthode traditionnelle la plus couramment utilisée pour produire du biodiesel. Au cours de cette réaction, les huiles végétales réagissent avec des molécules de méthanol pour former des mono esters méthyliques ainsi que du glycérol. Dans notre étude, nous avons appliqué cette méthode à l'huile de Jatropha extraite afin d'obtenir du biodiesel.

1. **Etape réactionnelle** : La Trans estérification est réalisé dans un ballon bi-colle en verre de 250 ml équipée d'un réfrigérant relié à un système de refroidissement. On verse (55 ml) de l'huile dans le ballon et on chauffe à l'aide d'un plaque chauffante agitée jusqu'à ce que la température atteigne $60^\circ C$ à ce moment on ajoute le mélange (le catalyseur solubilisé dans 26 ml de méthanol). La durée de la réaction est de 3 heures. L'expérience est répétée plusieurs fois que la concentration du catalyseur (0.5%,1%,2%,3%,4%,5%,6%). Dans cette expérience, nous avons utilisé trois types de catalyseurs (KOH, NaOH et les cendre de noyau de datte).



Photo III.8 : Montage de chauffage à reflux pour la synthèse du biodiesel.

2. **Etape de séparation** : A la fin de la réaction, le contenu du ballon sera versé dans une ampoule à décantation et laisser au repos pour 24 heures. Durant ce temps-là, la glycérine qui est immiscible avec les esters se dépose au fond de l'ampoule en gardant la majorité de catalyseur. La phase supérieure contenant les esters ou le biodiesel contenant des traces d'alcool, sera récupéré.
3. **Etape de neutralisation** : Une fois le biodiesel récupéré, il sera neutralisé avec le vinaigre jusqu'à ce que le pH atteigne la neutralité. Le pH sera contrôlé à l'aide de papier pH.
4. **Etape de lavage ou purification** : La phase de lavage du biodiesel vise à éliminer les impuretés présentes dans celui-ci, telles que la glycérine résiduelle, l'excès de méthanol, les traces de catalyseur, les savons et les sels formés par le catalyseur. Le lavage s'effectue en ajoutant de l'eau au biodiesel dans un appareil de décantation. En agitant vigoureusement pour créer un tourbillon, on assure un rinçage optimal, et cette étape est jusqu'à ce que l'eau de lavage soit claire (voir photoIII.9).

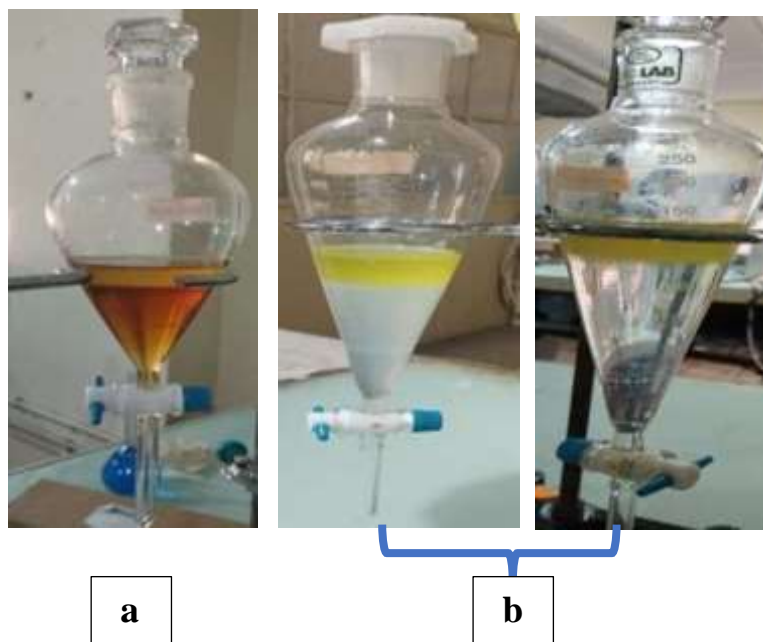


Photo III.9 : Etape de La décantation (a) ; Etape de la purification du biodiesel (b).

5. **Etape de séchage** : Après on fait un séchage dans l'étuve pendant 24 heures à température 60°C, pour éliminer le méthanol dans le biodiesel et obtenir le biodiesel pur (voir la photoIII.10).



Photo III.10 : Le Biodiesel synthétisé à partir d'huile de *Jatropha curcas*.

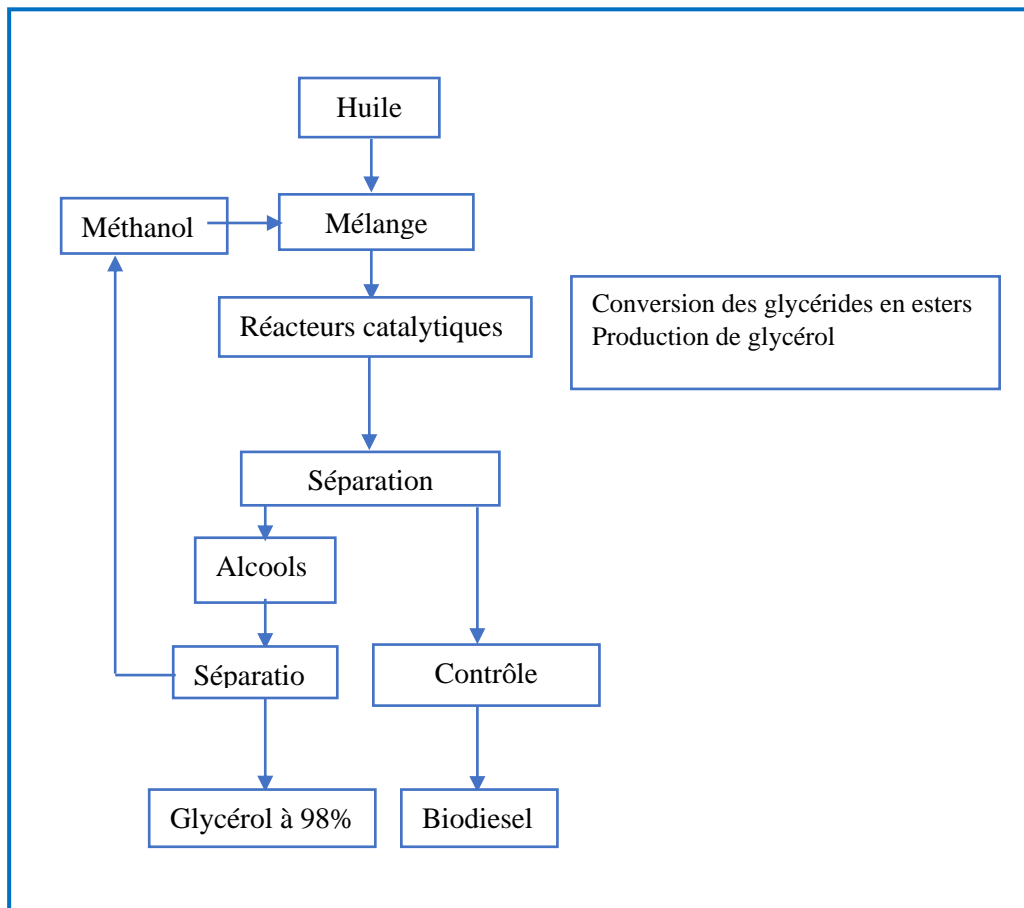


Figure III.2 : Principe de fonctionnement simplifié du procédé de synthèse de biodiesel.

III.3.1. Rendement de la production de biodiesel

Le rendement de la réaction R (%) se calcule par la formule suivante :

$$R = \frac{m_B}{m_H} \times 100 \quad (\text{III.7})$$

Où :

R : Rendement de production de biodiesel ;

m_B : La masse du biodiesel obtenu en (g) ;

m_H : La masse d'huile utilisée en (g).

III.3.2. Caractéristiques de biodiesel

L'ester méthylique d'huile est composé de trois acides gras principaux : l'acide linoléique, l'acide oléique et l'acide palmitique. D'autres acides gras sont présents en traces. Les caractéristiques du biodiesel obtenu sont mesurées de la même manière que les caractéristiques de l'huile de jatropha.

III.3.2.1. Analyse par le spectrophotomètre infrarouge (FTIR)

La spectroscopie infrarouge est largement utilisée en catalyse. Son application la plus courante consiste à déterminer les espèces adsorbées et à étudier la chimisorption de ces espèces à la surface du catalyseur. Cela permet d'analyser les interactions entre les molécules réactives et le catalyseur, ainsi que de comprendre les mécanismes réactionnels qui se produisent à l'interface catalyseur-réactif. [90].

- 1. Principe de la technique :** L'absorption d'un rayonnement infrarouge par une molécule résulte de l'interaction entre la composante électrique des ondes électromagnétiques incidentes et les dipôles électriques des liaisons non symétriques. Cette interaction se produit lorsque les mouvements de vibration et de rotation de la molécule modifient son moment dipolaire. C'est uniquement dans ces conditions que le champ électrique alternatif peut interagir avec la molécule et entraîner une modification de l'amplitude de l'un de ces mouvements. [90].
- 2. Spectre infrarouge :** Le spectre d'absorption est représenté sous la forme d'un graphique montrant la transition T en fonction de la longueur d'onde λ , exprimée en micromètres (μm), ou

du nombre d'onde $1/\lambda$, noté γ , exprimé en cm^{-1} . La transmission est souvent exprimée en pourcentage et est donnée par le rapport : $T= I/I_0$. Elle est liée à l'absorbance A (densité optique) par la relation suivante :

$$A = \log (1/T) = \epsilon.l.c \quad (\text{III.8})$$

I_0 : intensité de la radiation incidente ;

I : intensité de la radiation après absorption ;

ϵ : coefficient d'absorbance (coefficient d'extinction molaire) ;

l : longueur du trajet optique au travers du milieu absorbant, exprimé en cm ;

C : concentration de la substance analysée en mol.dm^{-1} . [90].

En effet, il s'agit de l'une des techniques spectroscopiques les plus couramment utilisées. Les bandes d'absorption présentes dans le spectre infrarouge sont caractéristiques des vibrations internes des molécules. Ces vibrations impliquent les mouvements des atomes à l'intérieur de la molécule, tels que les vibrations des liaisons chimiques et les rotations des groupes fonctionnels. En mesurant les fréquences auxquelles ces vibrations se produisent, on peut obtenir des informations précieuses sur la structure et la composition de la molécule.



Photo III.12 : Spectroscopie infrarouge.

3. Préparation de l'échantillon pour analyse IR : Les spectres infrarouges ont été enregistrés à l'aide d'un spectrophotomètre infrarouge à transformée de Fourier, le "Agilent Cary 660 FTIR". Dans cette étude, il est possible d'enregistrer le spectre d'un corps à l'état gazeux, liquide, solide ou en solution. Pour l'état liquide, un film est déposé entre deux pastilles de KBr (bromure de potassium) ou de NaCl (chlorure de sodium). Le domaine de fréquences balayé s'étend de 4000 à 600 cm^{-1} . Si le corps est à l'état solide, il est broyé en une petite quantité avec du bromure de potassium (KBr) et comprimé en une pastille à l'aide d'une presse. Le domaine de fréquences balayé va de 4000 à 400 cm^{-1} .



*Chapitre IV :
Résultats et
discussions*

IV.1. Caractérisation physiques et chimiques de l'huile de *Jatropha curcas*

L'huile de *Jatropha Curcas*, comme toutes les autres huiles végétales, a différentes propriétés physiques et chimiques qui changent avec la méthode d'extraction. Les propriétés morphologiques de l'huile étudiée sont rassemblées dans le tableau (IV.1).

Tableau IV.1 : Propriétés morphologique d'huile de *Jatropha Curcas*.

Propriétés	Expérimentale	Bibliographie
Aspect	Liquide visqueux	-
Couleur	Jaune plus ou moins foncée	-
Densité à 20°C (g/l)	0.9207	0,913-0,920

Les propriétés physico-chimiques de l'huile de *Jatropha* obtenue sont rassemblées dans le tableau suivant :

Tableau IV.2: Récapitulation des résultats sur la caractérisation de l'huile de *Jatropha curcas*.

Caractérisation	Unite	Huile de <i>Jatropha</i>	ASTM D6751-02	EN 14214
Indice de réfraction à 30°C		1.47	1.477-1.481	-
Viscosité à 40°C	mm ² /s	52.6	1.9-6.0	3.5-5.0
pH		4.88		
Température de ebullition	°C	145	-	-
Température de solidification	°C	2.0	-	-
La masse volumique	kg/m ³	899	875-900	860-900
Indice d'Iode	mg I ₂ /g	90,8-112,5	-	-
Indice d'Acide	mg KOH/g	8.5427	< 0.08	< 0.5
Acidité	%	4.3		
Indice de Saponification	mg KOH/g	192.61	-	-
Indice d'Ester (IE) (IE= Is-Ia)	mg KOH/g	184.0673	-	-

D'après les résultats obtenus, on peut constater que :

- **Indice d'acide** : On trouve $I_A=8,5427$, ceci montre par hypothèse qu'il faut 8,5427 mg de KOH pour neutraliser 1000 mg d'huile.

L'huile de *Jatropha curcas* est plus acide que le soja et le tournesol. I_A supérieure à celles du soja ($I_A = 0,13$ à $0,55$) et à celles du tournesol ($I_A = 0,2$ à $0,6$).

- **Indice de saponification** : Lors de notre expérience on a utilisé les proportions suivantes :

Solution de HCl de normalité $N= 0,5$, $V_0= 19,7$ ml, $V_1= 9,4$ ml, $P= 1,5$ g.

Analogiquement au cas de l'acidité, ceci montre également par hypothèse qu'il faut pour saponifier 1000 mg d'huile de *Jatropha curcas*. Notre huile est moyennement saponifiable.

- **Indice d'iode** : l'indice d'iode permet de calculer le nombre de doubles liaisons de l'acide gras présents dans un triglycéride autrement dit son taux d'insaturation.

Remarque : les moyens qui ont été mis à notre disposition ne nous ont pas permis de déterminer l'indice d'iode. Cependant nous connaissons par la littérature qu'il est compris entre 90,8-112,5.

- **La masse volumique** : On applique la relation $\rho=m/v$ pour calcul de la masse volumique d'huile en (g/cm^3).

$$\rho= 22.48/25 = 0,899 \text{ g/cm}^3$$

Donc la masse volumique d'huile de *Jatropha curcas* égal $0,899 \text{ g/cm}^3$.

IV.2. Calcule de rendement de biodiesel

Le rendement varie en fonction de l'espèce végétale, le contenu de chaque espèce en métabolites et de la nature du solvant utilisé dans l'extraction ou fractionnement et de sa polarité. Le rendement de la synthèse du biodiesel présente le rapport entre la masse du biodiesel produit et la masse exacte de l'huile utilisé.

Tableau IV.3 : Rendement de biodiesel en fonction de catalyseur

Concentration de catalyseur en (%)	Rendement Ester méthylique de Jatropha (biodiesel) en (%)			
	NaOH	KOH	Cendre de noyau de datte	Cendre de noyau d'olive
0,5	76.89	68.36	0	0
1	74.80	85.33	0	0
2	59.96	75.60	0	0
3	42.63	49.11	0	0
4	41.21	0	0	0
5	0	47.43	0	0
6	0	42.13	0	0

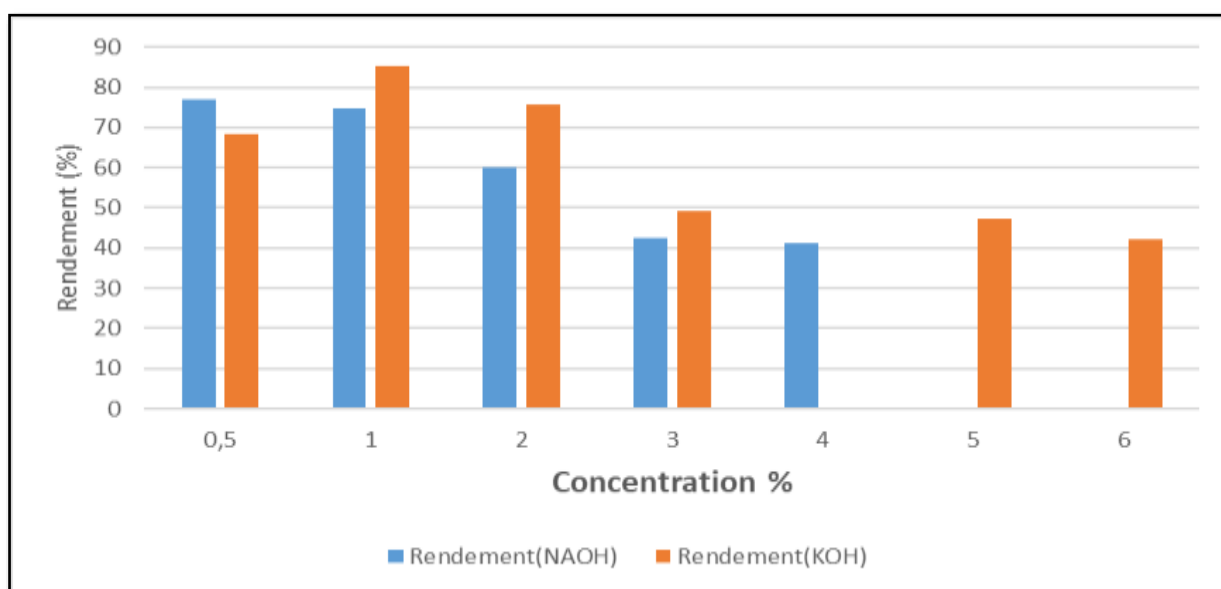


Figure IV.1: Le rendement du biodiesel en fonction de type de catalyseur (KOH, NaOH).

Selon le graphique de la figure (IV.1), on peut observer que le rendement de la réaction avec le catalyseur KOH est supérieur à celui du catalyseur (NaOH), ce qui signifie que la meilleure concentration du catalyseur (KOH) est de 1%. Ainsi, le produit du biodiesel obtenu après 3 heures était de 85,33 % suite à la réaction de décomposition du méthane à 60 degrés Celsius. En ce qui concerne la meilleure concentration du catalyseur (NaOH) à hauteur de 0,5 %, le rendement du biodiesel était de 76,89 %.

Nous avons utilisé un taux de 5 % et un taux de 6 % de l'activateur (NaOH), mais nous n'avons pas observé la formation de deux phases et nous avons remarqué la solidification du mélange, c'est-à-dire l'absence de formation de biodiesel.

Dans une autre étude que nous avons réalisée, les noyaux de dattes ont été utilisés comme catalyseur obtenus par la réaction d'estérification échange entre l'huile de Jatropha et le méthanol à 60 degrés Celsius. Les résultats ont montré, qu'aucun rendement n'a été enregistré avec la réaction synthétisé avec les cendres de noyau de datte et d'olive, donc qu'aucun biodiesel n'a été obtenu.

Tableau IV.4 : Caractéristiques physico-chimiques de biodiesel obtenue.

Caractérisation	Unite	Biodiesel	ASTM D6751-02	EN 142 14
La densité à 20°C	Kg/m ³	878	875-900	860-900
Viscosité cinématique	mm ² /s	4.8486	1.9-6.0	3.5-5.0
pH		6.0	Neutre	Neutre
Indice d'Acide	mg KOH/g	0.463	< 0.8	< 0.5
Indice de Saponification	mg KOH/g	202	-	-
Indice d'Ester	mg KOH/g	201.537	-	-

Les caractéristiques de carburant des esters méthyliques synthétisées ont été évaluées selon la Norme Européenne EN 142 14. D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.4), il ressort que ;

- La valeur de la viscosité cinématique de biodiesel est identique avec la norme ;
- Le pH du biodiesel produit à partir d'huile est généralement considéré comme neutre. Lorsque la réaction de Trans estérification est bien contrôlée et que les réactifs sont utilisés en quantités stœchiométriques appropriées, le biodiesel produit aura généralement un pH proche de 7, ce qui est neutre. Cela indique que le biodiesel n'est ni acide ni basique et qu'il est donc compatible avec les moteurs diesel et les systèmes de carburant standard sans causer de corrosion excessive ou d'autres problèmes liés à l'acidité ou à l'alcalinité.

IV.3. Variation de densité

La densité constitue une caractéristique importante, car elle conditionne le dimensionnement ainsi que les particularités technologiques. De plus, la densité d'une substance peut varier en fonction de différents facteurs tels que la température, la pression et la composition chimique.

Les tableau (IV.5), illustre les résultats des mesures de la densité de l'huile de *Jatropha curcas* et leur ester correspondant à différente température.

Tableau IV.5 : Variation de la densité de l'huile de *Jatropha curcas* et leur ester correspondant à différente température.

Huile ou ester	Densité (g/ml)			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
Huile de Jatropha	0.9207	0.9158	0.9154	0.9150
Ester méthylique de Jatropha (NaOH)	0.8788	0.8781	0.8774	0.8766
Ester méthylique de Jatropha (KOH)	0.8781	0.878	0.8767	0.8762



La densité de l'huile étudiée indique une diminution de la densité avec l'augmentation de la température, mais cette diminution est très faible et relativement uniforme sur toute la plage de températures étudiée.



La densité des deux ester méthyliques diminue lorsque la température augmente. Cela s'explique par les propriétés physiques des deux types de biodiesel et des réactions chimiques impliquées. Lorsque la température augmente, les molécules de biodiesel ont tendance à se disperser davantage, réduisant ainsi leur densité. De plus, les réactions chimiques entre le biodiesel et les agents alcalins (KOH et NaOH) sont généralement exothermiques, ce qui signifie qu'elles produisent de la chaleur. Cette augmentation de la température peut également entraîner une dilatation thermique des molécules de biodiesel, contribuant ainsi à une diminution de la densité.

- **La limite de méthanol et le catalyseur utilisé dans la réaction de Trans estérification**

Dans les réactions de Trans estérification, les quantités de méthanol et de catalyseur (KOH, NaOH, cendres de noyau de datte et cendres de noyau d'olive) sont des facteurs cruciaux qui doivent être soigneusement contrôlés. Le rapport stœchiométrique de ces réactifs joue un rôle important dans la réalisation d'une conversion efficace des triglycérides en biodiesel.

Tableau IV.6: La limite des catalyseurs utilisés dans la réaction de transestérification

Type du catalyseurs		Observation	Reaction yield
KOH concentration	0.5% à 2%	- Bonne séparation ; - Meilleure rendement ; - Augmentation du taux de réaction.	
	> 2.5%	-Formation d'émulsion ; - Formation de savon ; - Formation de plus d'impuretés ; - Augmentation du taux de réaction.	
NaOH concentration	1% à 2%	- Bonne séparation ; - Meilleure rendement ; - Augmentation du taux de réaction	
	> 2.5%	-Solidification du milieu réactionnel, cela se produit en raison de la formation de savons, également appelés sels de sodium ou de potassium des acides gras présents dans les esters et les alcools.	

Cendre du noyau de datte	[0.5% à 6%]	<ul style="list-style-type: none"> - Mélange homogène ; - Rendement de production nul ; - La poudre de cendres est mise en suspension dans le milieu réactionnel. 	
Cendre du noyau d'olive	[0.5% à 6%]	<ul style="list-style-type: none"> - Mélange homogène ; - Rendement de production nul ; - La poudre de cendres est mise en suspension dans le milieu réactionnel. 	

* La concentration du catalyseur utilisé en (p/p) du poids total de l'huile.

D'après ce tableau, nous pouvons dire que c'est entre ces deux limites (0.5% à 2%) et entre (1% à 2%), la réaction de Trans estérification synthétisé avec du KOH et avec du NaOH respectivement fonctionnera de la manière la plus fiable. Donc, le travail dans la plage du catalyseur approuvé peut augmenter le rendement de biodiesel en conduisant l'équilibre de la réaction vers la production de biodiesel. Il permet de s'assurer que tous les triglycérides disponibles sont convertis en esters allyliques d'acides gras.

Par contre, un excès du catalyseur peut réagir avec les acides gras libres présents dans la matière première pour former du savon. La formation de savon n'est pas souhaitable dans la production de biodiesel car elle peut entraîner des problèmes tels que la formation d'émulsion, la difficulté à séparer la phase de biodiesel et des problèmes de moteur potentiels.

Un excès du catalyseur peut également entraîner la formation de plus d'impuretés dans le produit biodiesel, telles que le catalyseur résiduel et le savon. Ces impuretés peuvent nécessiter des étapes de purification supplémentaires, telles que le lavage et le séchage, pour répondre aux spécifications de qualité des normes de biodiesel.

Les cendres de noyaux de datte et d'olive sont composées principalement de sels minéraux tels que les carbonates, les phosphates et les chlorures. Ces composés peuvent avoir une activité

catalytique, mais leur efficacité peut varier en fonction de leur composition chimique spécifique. Cependant, leur efficacité en tant que catalyseurs pour la Trans estérification peut être inférieure à celle des catalyseurs conventionnels tels que les bases fortes ou les enzymes.

D'après nos résultats expérimentaux, lorsque nous avons utilisé la cendre de datte et le noyau d'olive comme catalyseurs naturels dans la réaction de Trans estérification, nous avons obtenu un mélange homogène et la poudre de cendre a été mise en suspension dans le milieu réactionnel, cela signifie que la cendre n'a pas été dissoute dans le milieu. La dissolution de la cendre permet aux composés actifs présents dans la cendre de jouer leur rôle de catalyseur et de favoriser la réaction de Trans estérification.

IV.4. Analyse par le spectrophotomètre d'infrarouge

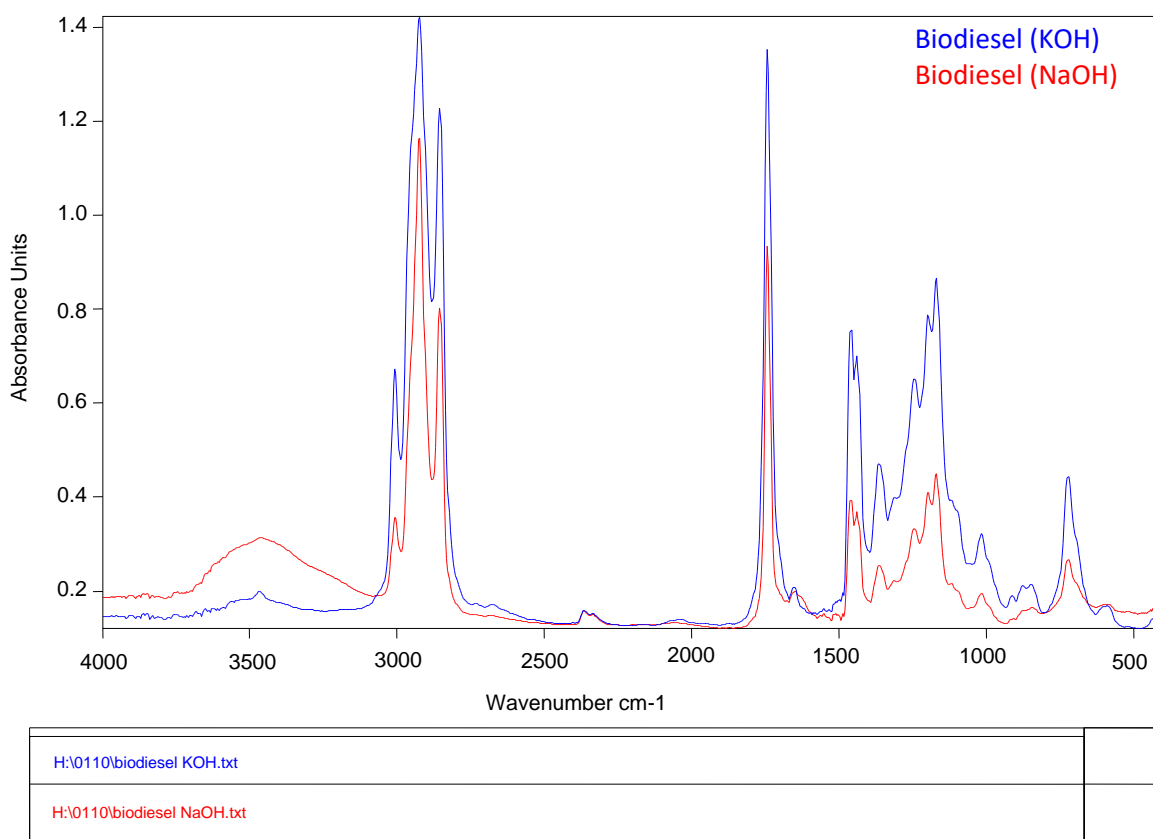


Figure IV.2 : Analyse par le spectrophotomètre d'infrarouge

Le spectre FTIR du carburant biodiesel synthétisé avec de la potasse (KOH) et de la soude (NaOH) est montré dans la Figure (IV.2), et les principales liaisons chimiques identifiés sont fournis dans le Tableau (IV.7). La forte absorption des pics à 2955 et 2855 cm^{-1} correspondent à la symétriques et asymétriques étirement mode de CH_2 , respectivement. Un autre pic observé à 2925

cm^{-1} représente le symétrique d'étirement mode de CH_3 . Les pics d'absorption à intensité moyenne entre 1300 et 1500 cm^{-1} correspondent à la déformation angulaire de CH_2 et CH_3 . La faible intensité du pic à 720 cm^{-1} représente les asymétries angulaires de la déformation plane du CH_2 .

Le biodiesel est un mélange de longues et de courtes chaînes d'esters méthyliques. Par conséquent, la principale caractéristique qui distingue la production de biodiesel à partir du diesel est de son absorption à 1743 et 1169 cm^{-1} , correspondant aux modes d'étirements des fonctions $\text{C}=\text{O}$ et -COC du groupement fonctionnel ester, respectivement.

Une autre caractéristique de la production de biodiesel qui la distingue du diesel est que le biodiesel comprend des composés d'ester méthylique saturés et insaturés, tandis que le carburant diesel comprend principalement les hydrocarbures saturés. En conséquence, le biodiesel présente une absorption à 3018 et 1652 cm^{-1} attribuée au groupement fonctionnel alcène $=\text{C-H}$ et -C=C , respectivement.

Les spectres FTIR de la base de carburants biodiesel ainsi que les importantes liaisons chimiques et des groupes fonctionnels identifiés sont indiqués dans le tableau x et la figure x avec les deux spectres. Le profil spectral de tous les carburants biodiesel est similaire car ils sont généralement des esters méthyliques avec les mêmes liaisons chimiques et les mêmes groupements fonctionnels.

La figure (IV.2) montre les spectres FTIR de biodiesel synthétisé avec du KOH et du NaOH avec l'augmentation du pourcentage de biodiesel en présence de KOH, la teneur en ester méthylique et la teneur en groupements insaturés augmentent, ce qui se reflète dans leurs spectres illustrés dans la figure (IV.2).

L'analyse de spectre IR de biodiesel obtenu, nous a permis de tirer les informations regroupées dans le tableau (IV.7)

Tableau IV.7 : Principales liaisons chimiques identifiées avec FTIR pour les biodiesels obtenus.

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Identifié liaison chimique
2955	Mode d'étirement asymétrique de CH ₂
1500 1300	Déformation angulaire de CH ₂ et CH ₃
720	Déformation angulaire asymétrique plane du CH ₂
3018	=C–H segment de la fonction alcène
2925	Mode d'étirement symétrique de CH ₃ du groupement fonctionnel alcane
2855	Mode d'étirement symétrique de CH ₂ du groupement fonctionnel alcane
1743	–C=O du mode d'étirement du groupement fonctionnel ester
1652	–C=C étendue du groupement fonctionnel alcène
1169	–COC modes d'étirement du groupement fonctionnel ester

A partir de ce chapitre ont conclu : La Trans estérification est la méthode la plus utilisée pour la synthèse de biodiesel par ce qu'elle est simple et facile à manipuler ainsi que le rendement et important. Les analyses physico-chimiques sont très importantes pour savoir la qualité de biodiesel. L'huile de *Jatropha curcas* est très riche par les lipides. Il est important de noter que l'utilisation de cendres de noyaux de datte et d'olive comme catalyseurs naturels pour la Trans estérification peut être moins étudiée et moins documentée que l'utilisation de catalyseurs conventionnels. Il est donc recommandé de mener des recherches approfondies et des essais expérimentaux pour évaluer l'efficacité et la reproductibilité de ces catalyseurs dans votre système spécifique avant de les utiliser à grande échelle.

A decorative border in a light green color, resembling a scroll or ribbon, frames the text. It has rounded corners and small loops at the top and bottom edges.

*Conclusion générale et
perspectives*

Conclusion générale

Pour préserver l'environnement, il existe plusieurs sortes d'énergies propres et renouvelables recherchées : solaire, éolienne, géothermique, biomasse...etc. Le biodiesel est l'une des sources d'énergie renouvelable. Il est non toxique, biodégradable et a une valeur calorifique élevée. Sa teneur en soufre est faible et son utilisation réduit les émissions de substances non brûlées.

Cependant, le biodiesel est fabriqué par estérification croisée, qui est la technique la plus couramment utilisée pour. Il s'agit d'une réaction chimique dans laquelle un ester alcoolique est substitué par un autre. Ce processus est largement utilisé pour réduire la viscosité des triglycérides. L'estérification croisée est une réaction inverse qui implique le mélange des réactifs et la présence d'un catalyseur qui favorise grandement cette réaction.

Dans cette étude, cette technique a été appliquée à la production de biodiesel à partir de graines d'une plante oléagineuse appelée *Jatropha curcas*. Nous avons également utilisé de l'alcool (méthanol) pour la réaction et des catalyseurs homogènes (NaOH, KOH) et hétérogènes (noyau de datte, noyau d'olive).

Ensuite, une série d'analyses physiques et chimiques de l'huile et du biodiesel a été effectuée, notamment l'indice d'acidité, l'indice de saponification, l'indice de réfraction, le pH et la densité. L'analyse de ces paramètres, comparée aux normes, nous a permis de tirer les conclusions suivantes : Le pH et la densité du biodiesel correspondent aux références internationales. Les paramètres de l'huile de *Jatropha* donnent des résultats similaires à ceux des références internationales. L'analyse des résultats montre que le rendement maximal de biodiesel est de 85,33 %, correspondant à une proportion de 1 % de la masse de catalyseur (KOH) et à un rendement de biodiesel de 76,89 % en utilisant un catalyseur (NaOH). Aucun résultat n'a été obtenu en utilisant des catalyseurs hétérogènes (noyau de datte, noyau d'olive), ce qui signifie qu'aucun biodiesel n'a été produit. Ensuite, notre biodiesel a été caractérisé et l'analyse spectrale infrarouge a été utilisée pour identifier les esters d'acides gras méthylés qui le composent.

Enfin, en tant que recommandation de cette étude, il est proposé d'étudier cette même plante oléagineuse dans d'autres domaines tels que les cosmétiques, les médicaments et les applications industrielles.

Perspectives

Ce travail est loin d'être fini, c'est la raison pour laquelle nous suggérons :

1. Optimisation des conditions réactionnelles ; les conditions réactionnelles, telles que la température, le rapport molaire des réactifs et la durée de réaction, devront être optimisées pour maximiser l'efficacité de la Trans estérification en utilisant les catalyseurs naturels (cendres de noyau de datte et d'olive) ;
2. Réalisation des études expérimentales approfondies seront nécessaires pour déterminer les conditions optimales dans notre système spécifique et pour étudier la cinétique et l'effet des paramètres réactionnels sur la réaction de Trans estérification ;
3. D'après les caractéristiques physico-chimiques sous des conditions expérimentales bien définies de Trans estérification peut être transformée en esters méthyliques, carburant de substitution au niveau des moteurs à injection directe ;
4. Une utilisation de technologies avancées et adaptées dont la production de biocarburant en vue d'offrir des conditions de vie des populations rurales améliorées ;
5. Une production d'alcool locale spécifiée à la transestérification (méthanol et propanol-2).



*Références
bibliographiques*

- [1] X. LANG, AK. Dalai, MJ. REANEY, PB. Hertz, « Biodiesel esters as lubricity additives: effects of process variables and evaluation of low-temperature properties ». *Fuels International* pp 207-227,2001.
- [2] C. NGUYEN Van, « Maîtrise de l'aptitude technologique des oléagineux par modification structurale ; applications aux opérations d'extraction et de Trans estérification in-situ », Thèse doctorat, Université de la ROCHELLE,190(49-59),2010.
- [3] M. Reiadh, «Jatropha Curcas in Egypt » under Secretary of State for Afforestation, Ministry of Agriculture and Land Reclamation.
- [4] M. RAKOTONIAINA Patrick, « Contribution à l'étude de Jatropha Curcas », Mémoire de fin d'étude au Département agricole et alimentaire, ESSA, 2004.
- [5] A. Diakité, « Extraction et caractérisation des extraits cireux de graines de Jatropha curcas pour application bio pesticide ». *Université Laval*,65(3),2018.
- [6] A. ÜLLENBERG, « Etude sur l'état actuel du secteur Jatropha », Jatropha à Madagascar, version finale, Programme Germano-Malgache pour l'Environnement, Coopération Technique / GTZ,2009.
- [7] A. Roulier, « Le soja ou soya : aliment-santé durable. Retrieved from <http://www.naturemania.com/bioproducts/soja.html>,<http://www.naturemania.com/bioproducts/soja.html> », février 2012.
- [8] W. M. J. Achten, L. Verchot, Y. J. Franken, E. Mathis, V. P. Singh, R. Aerts, B. Muys, «Jatropha biodiesel production and use. *Biomass and Bioenergy*» 32 (12) 1063-1084,2008.
- [9] S.K. Behera, P. Srivastava, R. Tripathi, J.P. Singh, N. Singh, «Evaluation of plant performance of Jatropha curcas L. under difference agro-practices for optimizing biomass-A cas study. *Biomasse Bioenergy*» 34: 30-41,2010.
- [10] <https://www.tramil.net/fr/plant/jatropha> Curcas
- [11] jardinage.ooreka.fr/plante/voir/866/jatropha.
- [12] J. Silveira da Cunha, « Contribution à l'étude du pourghère aux îles du Cap Vert », *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 6(1), 116-126,1934.
- [13] J.D. Pellet, E. Pellet, « Jatropha curcas : le meilleur des biocarburants », Edition Favre SA, Lausanne,2007.
- [14] H. Sucher, « Proyecto biomasa - Guia tecnica para el cultivo del tempate (Jatropha curcas L.) », Cooperación Técnica de la Republica de Austria con la Republica de Nicaragua,1999.

- [15] N.Z. Garba, C.E. imba, L.P. mmanue, « Production and Characterisation of Biobased Transformer Oil from *Jatropha Curcas* Seed». *Journal of Physical Science*, 24(2), 49–61,2013.
- [16] E. Winkler, N. Foidl, G.M. Gübitz, R. Staubmann, W. Steiner, « Enzyme supported oil Extraction from *Jatropha curcas* seeds. *Applied Biochemistry and Biotechnology*» 63-65 :449-456,1997.
- [17] P. ousset, « Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles Végétales »,2008.
- [18] H. Alamine, « le jatropha est parti dans le désert le sixième et le dixième ». *Jatropha a été récupéré des statistiques et du département de la promotion et de la publicité*,2011.
- [19] G.I. Touckia, O.D. Yongo, K.E. Abotsi, F. Wabolou, K. Kokou, « Essai de germination et de croissance au stade juvénile des souches locales de *Jatropha curcas* L. en République Centrafricaine », *European Scientific Journal*. vol.11, 1857-7431,2015.
- [20] M. Sene, « Faisabilité de traitement des eaux usées domestiques par filtres de plante d'espèces utilitaires : *Jatropha curcas* L ». Au Burkina Faso. Mémoire de fin d'études, Institut de l'Ingénierie et de l'Eau (2iE). 55 p,2009.
- [21] M. Domergue, R. Pirot, « *Jatropha curcas* L. Rapport de synthèse bibliographique » .118p,2008
- [22] R. Osoniyi, F. Onajobi, « Coagulant and anticoagulant activités in *Jatropha curcas* L ». Latex, *Journal Ethnopharmacol* 89 (1) :101-5 ,2003.
- [23] S. Shetty, S.L. Udupa, A.L. Udupa, V.R. Vollala, «Wound healing activities of bark Extract of *Jatropha curcas* L». in Albino rats. *Saudi Medical Journal*; 27(10); 1473-1476,2006.
- [24] M.J. Luo, Cloning, «expression, and antitumor activity of recombinant protein of curcin, *Russian Journal of Plant Physiology*»; 54 (2), 202-206,2007.
- [25] A.M. Mujumbar, A.V. Misar, « Anti-inflammatory activity of *Jatropha curcas* roots in mice and rats». *Journal of ethanopharmacology*; 90 (1); 11-15,2004.
- [26] G.D.P.S. Augustus, M. Jayabalan, G.J. Seiler, « Evaluation and bioinduction energycomponents of *Jatropha curcas*. *Biomass Bioenergy*». 23: 161-164,2002.
- [27] J. Martinez-Herrera, P. Siddhuraju, G. Francis, G. Davila-Ortiz, K. Becker, «Chimical composition, toxic/antimetabolic constituents and effects of different treatments on their levels, in four provenances in *Jatropha curcas* L». from Mexico. *Foodchem*. 96: 80-89,2006.
- [28] K. Openshaw, «A Review of *Jatropha curcas* an oil plant of unfulfilled promise. *Biomass Bioenergy*». 19: 1-15,2000.

- [29] M.M.S. Daudet, G. Margeai, J.P. Baudoin, A. Toussain, « Culture in vitro de *Jatropha curcas* ». *Biotechnol Agron Soc Env.* 15 : 567-574,2011.
- [30] Y. Yang, L. Wu, M. Takese, M. Zhang, T. Zhao, X. Wu, «Potential non-edible oil feedstock for biodiesel production in Africa». *A Survey. Renew. Sustain. Energy. Rev.*38: 461-477,2014.
- [31] A.S. Silitonga, A.E. Atabani, T.M.I. Mahlia, H.H. Masjuki, I.A. Badruddin, S. Mekhilef, «A review of prospect of *Jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia». *Renew. Sustain. Energy. Rev.* 15: 3733-3756,2011.
- [32] CCL AGRO-INDUSTRIE, « Fiche technique AgroIndustrie : Le *Jatropha*. Champagne-Ardenne CRIF », France. Fiche n°21. 5 p,2007.
- [33] L. Lin, Z. Cunshan, S. Vittayapadung, S. Xiangqian, D. Migdong, « Opportunities and challenges for biodiesel fuel». *Appl. Energy.* 88: 1020-1031,2011.
- [34] K.R. Henning, « Utilisation des savoirs locaux sur *Jatropha* ». Article, Note CA n°42, 4 p,20002
- [35] U. Alfons, « *Jatropha* à Madagascar-Rapport sur l'état actuel du secteur » – Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) Madagascar, 32 p ,2008.
- [36] M. Paramathma, P. Venkatachalam, A. Sampathrajan, A. Balakrishnan, R. Jude Sudhakar, K.T. Parthiban, P. Subramanian, S. Kulanthaisamy, « Cultivation of *Jatropha* and Biodiesel Production ». *Agricultural Engineering College & Research Institute, Tamil Nādu Agricultural University, Coimbatore.* 817-828,2007.
- [37] S. Sanogo, « Propriétés physiques et chimiques des sols sous *Jatropha* et productivité de la plante en fonction des types de sol dans la zone sud-soudanienne du Burkina Faso ». *Mémoire d'Ingénieur d'Agriculture. Centre Agricole Polyvalent de Matourkou, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.* 60 p,20
- [38] B. Legendre, « *Jatropha curcas* (Tabanami). Note agronomique. *Technologies for Human Development* ». 8 p,2008.
- [39] J. Blin, M.H. Dabat, G. Faugere, E. Hanff, N. Weisman, « Opportunités de développement des biocarburants au Burkina Faso. Rapport d'activité. Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques », Burkina Faso, 157 p,2008.
- [40] M. Ouédraogo, « Etude biologique et physiologique du pourghère, *Jatropha curcas* L ». *Université Ouaga 1 Professeur Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso. Thèse d'état.* 290 p,2000.

- [41] A.D. Patel, N.S. Panchal, B.I. Pandey, A.N. Pandey, Growth, « water status and nutrient accumulation of seedlings of *Jatropha curcas* L ». (Euphorbiaceae) in response to soil salinity. *An. Biol.*, 32, 59-71,2010.
- [42] I. Diédhiou, « Impacts potentiels de l'introduction de *Jatropha curcas* L. dans un contexte de variabilité et de changements climatiques : impacts agricoles et environnementaux, intérêts économiques pour les ménages et communautés rurales ». Rapport technique. Université de Thiès, Sénégal. 19 p,2009.
- [43] R. Latapie, « La culture du poughère : une activité génératrice de revenus qui permet défaire face aux enjeux énergétiques du Mali ». Cas du projet Garalo Bagani Yelen. Master, Université de Rennes1, France. 104 p,2007.
- [44] B.G. Laviola, L.A.S. Dias, « Nutrient concentration in *Jatropha curcas* leaves and fruits and estimated extraction at harvest ». *R. Bras. Ci. Solo*, 32 :1969-1975,2008.
- [45] M. Traoré, H.B. Nacro, R. Tabo, A. Nikiéma, H. Ousmane, « Potential for agronomical enhancement of millet yield via *Jatropha curcas* oilcake fertilizer amendment using placed application technique ». *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6 (2): 808-819,2012.
- [46] M. Traoré, H.B. Nacro, W.F. Doamba, R. Tabo, A. Nikiéma, « Effets de doses variées du tourteau de *Jatropha curcas* sur la productivité du mil (variété HKP) en condition pluviale en Afrique de l'Ouest ». *Tropiculture*, 33 (1) : 19-25,2015.
- [47] R.K. Henning, T. Ramorafeno, « Le manuel *Jatropha*. Un guide pour l'exploitation intégrée de la plante *Jatropha* à Madagascar ». 20 p,2005.
- [48] A.D. Solsoloy, « Insecticide resistance management in cotton in the Philippines ». *Philippine Journal of Crop Science*. 25-26,2000.
- [49] K.O. Adebawale, C.O. Adedire, « Chemical composition and insecticidal properties of the underutilized *Jatropha curcas* seed oil. *African Journal of Biotechnology* ». 5 (10) :901-906,2006.
- [50] N.O. Ogbemor, A.T. Adekunle, D.A. Enobakhare, « Inhibition of *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz) Sac. Causal organism of rubber (*Hevea brasiliensis* Muell.Arg.) leaf spot using plant extracts ». *African Journal of Biotechnology*. p. 213-218,2007.
- [51] A.L. Jussieu, « *Genera plantarum* ». Pp 450-452,1789.
- [52] B. Dehgan, G.L. Webster, « Morphology and infrageneric relationships of the genus *Jatropha* (Euphorbiaceae) ». *Univ. Calif. Publ. Bot.*, 74, pp 1-73,1979.

- [53] E. Pax, « Euphorbiaceae Jatrophaeae. In: Enfler A, Editor Das Pflanzenreich. IV, vol 147. Verlag Von Wilhelm Engleman, Leipzig », pp 1-1,1910.
- [54] K.R. Devappa, H.P.S. Makkara, K. Beckera, « Jatropha Toxicity -A Review. Journal of Toxicology and Environmental Health », Part B. 13(6): 476-507,2010.
- [55] R. Sarin, M. Sharma, S. Sinha ray, R.K.J.F. Malhotra, « Jatropha–palm biodiesel blends: an optimum mix for Asia ». 86(10-11), 1365-1371,2007.
- [56] B. Ouarda, « Contrôle des paramètres physico-chimiques des deux huiles Soja et tournesol Chimiquement raffinées ». (Mémoire de Fin de Cycle), Université Abderrahmane MIRA de Bejaia Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie,2012
- [57] A. Lang, H.F.A. Elhaj, « Jatropha Oil Production for Biodiesel and Other Products»,2010.
- [58] A.K. Tiwari, A. Kumar, H.J.B. Raheman, « bioenergy, Biodiesel Production from jatropha oil (Jatropha curcas) with high free fatty acids: an optimized process ». 31;569-575,2007.
- [59] N. Beerens. T. Ansø. T. Galema, J. Adriaans, « van Eijck Applications of jatropha products the jatropha handbook: from cultivation to applicationhttp://www.snvworld.org/en/Documents/FACT_Foundation_Jatropha_Handbook.pdf, FACT foundation – Fuels from Agriculture in Communal Technology »,2010.
- [60] P. Chakrabarti, R. Prasad, « Biodiesel production from Jatropha curcas oil. In Jatropha, challenges for a new energy crop ». (pp. 463-490): Springer,2012.
- [61] Derra. Salif, « Déterminants de l'innovation technologique sur la biomasse agricole : cas du Jatropha Curcas au Burkina Faso », Montpellier : EDEG, 224 p. Thèse de doctorat : Economie : Montpellier Sup Agro, 2014.
- [62] Matallah, Assad Allah, « Le Biocarburant », thèse de magistère, Institut National Agronomique (INA) Alge, 2006.
- [63] Hébert. Josianne, « Quel avenir pour le développement des biocarburants de deuxième Génération au Québec ». Université de Shebrooke.Page 13-18,2013.
- [64] N.C. Dasilva, « La filière bioéthanol ANFA. Groupement National pour La formation automobile ». Page 12-16,2009.
- [65] K. Khiari, « Contribution à l'étude des propriétés thermo- Physiques des Biocarburants de seconde génération et leur influence sur le comportement des moteurs », Doctorat, Ecole des Mines de Nante, France, pages 5-19, décembre,2016.
- [66] Mesbahi. Dalila, « La Trans estérification hétérogène de l'huile de tournesol sous Alumine : Production du biodiesel EEHV ». Mémoire de Magister. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen,2012.

- [67] C. Brodeur, J. Cloutier, D. Crowley, X. Desmeules, S. Pigeon, and R. ST- Arnaud, « La production de biodiesel à partir de cultures oléagineuses », Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Publication no EVC 031, pages 1-4,2008.
- [68] I. Boudchicha, Y. SOUADI, « Synthèse de biodiesel par catalyse homogène et Hétérogène », Skikda, Algérie, pages 16-59,2016.
- [69] H. Berna, « Transestification des huiles végétales par l'éthanol en conditions Douces par catalyses hétérogènes acide et basique ». Thèse de Doctorat. Université Claude Bernard - Lyon I, France,2009.
- [70] M. Ahmad, M.A. Khan, M. Zafar, « Practical Handbook on Biodiesel Production and Properties »: CRC Press, 2012.
- [71] Casimir. Togbe, « Etude cinétique de l'oxydation de constituants de biocarburants et composés modèles : formation de polluant ». Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement, université d'Orléans, français,2010.
- [72] M. Diop, « Production de biodiesel à partir de l'huile de Jatorpha », l'obtention du diplôme d'ingénieur, Université Cheikh Anta Diop de DAKAR,2009.
- [73] B. BENSALD, C. SAGARY, G. HUREAU, « Institut français du pétrole (IFP), compilation annuelle de Direction des études économiques » L'industrie par pétrolière,2004
- [74] D.BALLERINI, et N. ALAZARD-TOUX, « les Biocarburants, Etats de lieux, Perspectives et enjeux du développement. Institut Français du Pétrole (IFP) ». France. Technip, 348p,2006
- [75] Aimé. Agbizounon, « Tests d'efficacité d'extraits d'huiles végétales sur anophèles Gambiae giles et culex quinquefasciatus Say résistants aux pyréthrinoides ». Mémoire ingénieur. Université d'Abomey- Calavi, bénin,2010.
- [76] S.A.K.a.S.D. Fernando, « Trans esterification of Soybean Oil Using Heterogeneous Catalysts ». Energy & Fuels, 2008. 22: p. 2067–2069.
- [77] M.M.C.Di Serio, M. Giordano, R. Tesser, P. Patrono, and E. Santacesaria, « From Homogeneous to Heterogeneous Catalysts in Biodiesel Production. Ind. Eng. Chem. Res », 46: p. 6379-6384,2007.
- [78] Y.M. Koh, T. I. M. J. R. Ghazi, & reviews, s. e. « A review of biodiesel production from Jatropha curcas L. oil ». 15(5), 2240-2251,2011.
- [79] R. Alloune, A. Liqid, M. J. R. d. Tazerout, é. R. S, Ghardaïa, « Etudes Comparatives de deux plantes oléagineuses locales pour la production du biodiesel en Algérie ». 19, 22,2012.

- [80] K. J. M. d. M. d. B. S. N, MOSTEFA, « Contribution à l'étude de l'Analyse de l'huile de *Citrullus colocynthis* (Coloquinte) et de son pouvoir Antimicrobien ». (MEMOIRE MAGISTER DE BIOLOGIE Substances Naturelles, Activité Biologique et Synthèse), Université Abou BAKKR BELKAID-TLEMCEM. 105p,2011.
- [81] L. J. I. Cassidy, I. N. O. F. OILS, R. MATERIALS, « China's evolving edible oils Industry ». 28(4), 6-11,2017.
- [82] M. BENBADA, « Méthodes officielles d'analyses physico-chimiques relatives aux corps gras d'origine animales et végétales ». Journal officiel de la république algérienne, n° 64, 01-28, novembre,2011.
- [83] A. Bulletin, « Les biocarburants – Le biodiesel. Lycée d'enseignement général et technologique du pas de calais », p37,2008.
- [84] H. Aroudj, S. Bessaou, « Biocarburants : avantages et inconvénients », Mémoire Ingénieur, Bejaia, page 3,2012.
- [85] Wolff, « Manuel d'analyse des corps gras ». Ed. Azoulay, Paris,1968.
- [86] Ressources naturelles Canada, « Biodiesel », <https://www.rncan.gc.ca/energie/carburants-remplacement/carburants-faits/biodiesel/3510>,2018
- [87] Projet réalisé dans le cadre du DESS QUALIMAPA, « Gestion de la Qualité Nutritionnelle et Marketing des Produits Alimentaires. ; Les Corps Gras : Entre Tradition et Modernité ». Université des Sciences et Technologies de Lille, (2001-2002).
- [88] Bernard. Castaing, Hervé. Gay Vallet, « Forces de frottement subies par un objet en Mouvement dans un fluide ». Culture science physique. Publié par Gabrielle Bonnet, 2003
- [89] J.P. Faroux, J. Renault, « Mécanique des fluides et ondes mécaniques », Dunod, 1999.
- [90] Z. Henache, « Reformage sec du méthane sur des catalyseurs à base de nickle supportes par TiO_2 , CeO_2 et par l'oxyde mixte CeO_2-TiO_2 ». Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,2011.



Annexes

Annexe 1

Tableau 1 : Spécification ASTM D 6751-02 et EN 14214 pour le biodiesel B 100 [59]

Propriétés	ASTM D 6751		EN 14214	
	Limite	Méthode	Limite	Méthode
Densité à 15 °C	870–890 kg/m ³	ASTM D4052-91	860–900 kg/m ³	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosité à 40 °C	1.9–6.0 mm ² /s	ASTM D445	3.5–5.0 mm ² /s	EN ISO 3140
Point d'écoulement	-	D97	-	-
Indice de cétane	47 (minimum)	ASTM D613	51 (minimum)	EN ISO 5165
Indice d'acide	0.50 mg KOH/g maximum	ASTM D664	0.50 mg KOH/g (maximum)	EN 14104
Indice d'iode	-	-	120 g diode/100 g (maximum)	EN 14111
Pouvoir calorifique	-	D4239	-	-
Nombre d'Aster	-	-	96.5	EN 14103

Annexe 2

Lorsque l'huile végétale pure est utilisée dans les moteurs, il convient de se référer à la norme allemande DIN 51605. Cette norme édicte la qualité standard à laquelle l'huile végétale pure de colza doit se conformer pour être utilisée comme carburant dans les moteurs.

Tableau 2 : Norme allemande DIN 51605 relative à l'utilisation de l'huile de colza en tant qu'agrocarburant

Propriétés/Contenu	Unités	valeurs limites	
		Min	Max
Caractéristiques physiques			
Densité à 15°C	Kg m ⁻³	900	930
Viscosité cinématique à 40°C	mm ² /s		36
Indice de cétone	-	39	
Point éclair	°C	220	
Carbone résiduel	%		0,4
Valeur calorifique	MJ/Kg	36000	
Teneur en particules	mg/kg		24
Caractéristiques chimiques			
Contenu en soufre	mg Soufre/Kg huile		10
Contenu en phosphore	mg Phosphore/Kg		12
Indice d'acide	mg KOH/g		2
Indice d'iode	g Iode/100g huile	95	125
Stabilité à l'oxydation	heures	6	
Contenu en magnésium et en calcium	mg/Kg		20
Contenu en cendres	%		0,01
Contenu en eau	%		0,075