



**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**



**Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés
Mémoire**

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Pétrochimiques

Présenté Par : Oussama Mansouri

Lamine Aliat

Thème :

L'effet de la durée de réaction sur la synthèse de biodiesel à partir de graisse de chameau

Devant le jury composé de :

Dr SOULEF BENABDSALAM	MCA	UKM Ouargla	Président
Dr ZAWIA KENDOUR	MCA	UKM Ouargla	Examineur
Dr MOKADEM KHADRA	MCA	UKM Ouargla	Encadreur

Année universitaire : 2023/2022

Dédicace

Nous dédions ce travail

- *A nos parents.*
- *A nos frères et sœurs.*
- *A nos familles.*
- *À tous ceux qui ont contribué à ce projet, même avec un mot qui nous a amené là où nous sommes.*
- *A nos amis et proches, où qu'ils soient.*

✓ **Mansouri oussama**
✓ **Aliat lamine**

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude envers notre directrice de recherche Mme Zainab Ghiyaba, pour avoir proposé le sujet de cette étude. Nous souhaitons également remercier chaleureusement Mme. Mokadem Khadra, et en particulier Mohamed Mokadem pour leur soutien constant tout au long de ce travail.

Nous exprimons également nos plus sincères remerciements à Mme. Ben Abdel Salam Soulef et Mme. Gendour Zawia, enseignantes au département de génie des procédés de l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour leurs conseils et leur acceptation de relire cette étude.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers notre famille, du plus jeune au plus âgé. Enfin, nous remercions sincèrement les enseignants du département de génie des procédés et les personnes avec qui nous avons partagé des moments bons et mauvais, et que nous avons appréciées pour leur grande bienveillance, ainsi que nos chers amis et collègues, pour tout ce qu'ils ont fait pour nous. Nous adressons un grand merci à tous ceux qui nous ont aidés de quelque manière que ce soit, nous ont encouragés et ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tout

Résumé :

Actuellement, il est devenu nécessaire de trouver de nouvelles sources d'énergie modernes et nous avons découvert que la graisse extraite des os de chameau peut être convertie en biocarburant utilisable au lieu d'être jetée.

Nous avons extrait la graisse des os et modifié ses propriétés physiques et chimiques (processus d'estérification) en changeant la durée de réaction. Nous avons constaté que la production de biocarburant la plus élevée, 89,51 %, a été obtenue après 1 heure et 40 minutes du processus d'estérification, qui a produit 73,39 g de biocarburant. Par conséquent, on peut dire que la graisse extraite des os de chameau est une source d'énergie alternative.

Keywords : Os de chameau, Biocarburant, Transestérification, Estérification.

ملخص:

في الوقت الحالي، أصبح من الضروري إيجاد مصادر جديدة للطاقة الحديثة وقد اكتشفنا أنه يمكن تحويل الدهن المستخلصة من عظام الإبل إلى وقود حيوي صالح للاستخدام بدلاً من التخلص منها. استخرجنا الدهون من العظام وعدلنا خواصها الفيزيائية والكيميائية (عملية الأسترة) بتغيير الأوقات. وجدنا أنه تم الحصول على أعلى إنتاج للوقود الحيوي 89,51% بعد ساعة و40 دقيقة من عملية الأسترة، والتي أنتجت 73.39 جم من الوقود الحيوي. لذلك يمكن القول إن الدهون المستخلصة من عظام الإبل هي مصدر بديل للطاقة.

كلمات المفتاحية: عظام الإبل، وقود الديزل الحيوي، الأسترة التبادلية، الأسترة.

Abstract :

Currently, it has become necessary to find new sources of modern energy, and we have discovered that the extracted fat from camel bones can be converted into biofuel suitable for use instead of disposing of it. We extracted the fat from the bones and modified its physical and chemical properties (esterification process) by changing the times. We found that the highest biofuel production, 89.51%, was obtained after an hour and 40 minutes of esterification process, which produced 73.39 grams of biofuel. Therefore, it can be said that the fat extracted from camel bones is an alternative source of energy.

Keywords: Camel bones, biodiesel fuel, transesterification, Estérification.

Sommaire

Liste des tableaux	I
Liste des figures	II
Liste des abréviations	III
Introduction générale	IV
Chapitre I : Synthèse bibliographique	01
I.1 : La grande famille des biocarburants	02
I.1.1 Définition un biocarburant	03
I.1.2 Les avantage des biocarburants	04
I.1.3 Les grande catégories de biocarburants	05
I.1.4 Biocarburant de première, deuxième et troisième génération	05
I.2 Les graisses animales et des chameaux	
I.2.1 Généralité sur les graisses animales	07
I.2.2 Composition chimique de graisses de chameau	07
I.3. Caractéristiques physico-chimiques de graisse de chameau	08
I.4 Le biodiesel	
I.4.1 Définition et origine de biodiesel	09
I.4.2 Moteurs et carburant diésel	09
I.4.3 Les sources de matière primaire de biodiesel	10
I.4.4 Les caractéristiques du biodiesel	11
I.4.5 La viscosité	11
I.4.6 Pouvoir calorifique	11
I.4.7 Le point trouble et point d'écoulement	12
I.4.8 L'indice de cétone	12
I.4.9 L'oxydation	13
I.4.10 Le pouvoir lubrifiant	13
I.5 Synthèse du biodiesel par transestérification	
I.5.1 Définition	14
I.5.2 Equation de La réaction de transestérification	14
I.5.3 Facteurs influençant de la réaction de transestérification des huiles	15
I.5.4 Les acides gras libres et l'eau	15

I.5.5 Type et quantité de catalyseur	16
I.5.6 Les principales catalyses	17
I.5.7 Catalyse homogène	17
I.5.8 Catalyse hétérogène	18
I.5.9 Ratio molaire alcool/huile et type d'alcool	18
I.5.10 L'effet du temps de réaction	19
I.5.11 L'effet de la température de réaction	19
I.5.12 L'agitation	19
I.6 Transformation de l'huile	20
I.6.1 Réaction	21
I.6.2 Lavage de biodiesel (ester)	22
I.6.3 Récupération de l'alcool	22
I.6.4 Neutralisation du glycérol	23
I.7 L'utilisation du biodiesel	23
I.8 L'effet du biodiesel sur l'environnement et humaine	24
Chapitre II : Partie Expérimental	
II.1 Méthode d'extraction de graisse de chameau et méthode de purification	24
II.2 Matériels et produits utilisés	24
II.3 Matières premières	25
II.4 Transestérification basique	25
II.5 Protocole expérimentale de transestérification des graisses de chameaux	25
II.6 Récupération du biodiesel	27
II.7 Rendement de la production de biodiesel	28
II.8 Propriétés et caractérisation des produits obtenus (raffinat et extrait)	28
II.8.1 Détermination du point d'éclair du biodiesel	28
II.8.2 Viscosité	29
Chapitre III : Résultats et discussion	30
III.1 Optimisation du rendement en biodiesel	31
III.2 Influence du ratio massique Rendement / Ratio massique sur le rendement de la réaction de transestérification	32
Conclusion Générale	33

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Propriétés physicochimiques de la matière étudiée de graisse de chameaux	8
Tableau II. 2 : Les matériels et les produits	27
Tableau II.3 : Les matières premières de biodiesel	27
Tableau II.4 : Caractéristique de la transestérification basique	28
Tableau III.1 : Résultat de production de biodiesel en fonction du ratio	33

Liste des figures

Figure I-1: Equation de transestérification	14
Figure I.2: Réaction de saponification des triglycérides	16
Figure I.3: Différentes étapes de la fabrication de biodiesel	21
FigureII.1 : Un montage montrant comment la graisse de chameau est préparée à partir d'os	28
Figure II.2 : Graisse de chameau	29
Figure II. 3: Filtrer la graisse de chameau	29
Figure II.4 : Graisse de chameau a l'état solide	29
Figure II.6 : appareille de point d'éclair	31
Figure III.1: Décantation du biodiesel et l'apparition de la phase aqueuse saponifiables	32
Figure III.2 : Évolution du rendement en biodiesel en fonction du ratio massique	33

Liste des abréviations

GC : Graisses de chameaux

NaOH : Hydroxyde de Sodium

Na : Sodium

GL : Glycérine

Pf : flash point le point éclair

PT : cloud point le point de trouble

PE : Point d'écoulement

IC : Indice de Cétane

η : Rendement de la production

HV : Huiles Végétales

Ch₃OH : Méthanol

Introduction Général

La production de biodiesel à partir de graisses de chameau est un sujet relativement nouveau et peu étudié. Le biodiesel est un carburant renouvelable et respectueux de l'environnement, qui peut être utilisé comme substitut au diesel conventionnel dérivé du pétrole. Les graisses animales, y compris celles des chameaux, peuvent être transformées en biodiesel par un processus appelé transestérification.

La transestérification est une réaction chimique qui implique le mélange d'une graisse animale avec un alcool, généralement du méthanol, en présence d'un catalyseur, tel que la soude caustique ou la potasse. Cette réaction produit du biodiesel ainsi que du glycérol, un sous-produit qui peut être utilisé dans d'autres applications.

Cependant, il convient de noter que la synthèse du biodiesel à partir de graisses de chameau n'a pas été largement étudiée et il existe peu d'informations scientifiques précises sur cette méthode spécifique. La plupart des recherches sur le biodiesel se concentrent sur les huiles végétales, telles que l'huile de soja, l'huile de colza ou l'huile de palme, en raison de leur disponibilité et de leur teneur élevée en lipides.

Il est important de mener des recherches approfondies pour évaluer la viabilité technique et économique de la production de biodiesel à partir de graisses de chameau. Cela pourrait impliquer l'analyse de la composition chimique des graisses de chameau, l'optimisation des paramètres de la réaction de transestérification et l'évaluation des propriétés du biodiesel obtenu.

Il convient également de prendre en compte les aspects environnementaux et socio-économiques de la production de biodiesel à partir de graisses de chameau. Il est essentiel de s'assurer que cette pratique est durable, respecte les normes environnementales et contribue au développement socio-économique des communautés qui élèvent des chameaux.

En conclusion, bien que la synthèse du biodiesel à partir de graisses de chameau soit un domaine peu étudié, il existe un potentiel pour explorer cette voie de production alternative. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer sa faisabilité technique, économique et environnementale. Les résultats de telles études pourraient contribuer à

diversifier les sources de matières premières pour la production de biodiesel et à promouvoir une utilisation plus durable des ressources naturelles.

CHAPITRE I
SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.

I.1. La grande famille des biocarburants

I.1.1 Définition des biocarburants :

Les biocarburants sont des carburants produits à partir de matières premières renouvelables, telles que des cultures végétales, des résidus agricoles, des graisses animales ou des déchets organiques. Ils sont utilisés comme alternatives aux carburants fossiles, tels que l'essence et le Diesel, dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de promouvoir la durabilité environnementale.

Les biocarburants les plus couramment utilisés sont le biodiesel et l'éthanol. Le biodiesel est produit à partir d'huiles végétales ou de graisses animales par un processus de Transestérification, tandis que l'éthanol est généralement obtenu par fermentation de cultures riches en sucre ou en amidon, telles que la canne à sucre, le maïs ou la betterave à sucre.

Ces carburants renouvelables offrent plusieurs avantages environnementaux. Ils peuvent réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants fossiles, contribuant ainsi à atténuer le changement climatique. De plus, les biocarburants peuvent réduire la dépendance aux combustibles fossiles importés, favorisant ainsi l'indépendance énergétique des pays.

Cependant, il convient de noter que la production de biocarburants peut également avoir des conséquences négatives sur l'environnement et la sécurité alimentaire si elle n'est pas gérée de manière durable. Par exemple, la conversion de terres agricoles pour la production de cultures dédiées aux biocarburants peut entraîner la déforestation et la perte de biodiversité. De plus, l'utilisation de cultures alimentaires pour la production de biocarburants peut entraîner une compétition entre l'alimentation humaine et l'énergie.

Il est donc essentiel d'adopter une approche équilibrée dans le développement et l'utilisation des biocarburants, en veillant à ce qu'ils soient produits de manière durable, en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement et en favorisant la sécurité alimentaire. (1).

2. I.1. Les avantages des biocarburants :

Les biocarburants offrent plusieurs avantages par rapport aux carburants fossiles. Voici quelques-uns des principaux avantages des biocarburants :

- 1. Réduction des émissions de gaz à effet de serre :** Les biocarburants ont généralement une empreinte carbone plus faible que les carburants fossiles. Lorsqu'ils sont brûlés, les biocarburants émettent moins de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz à effet de serre, contribuant ainsi à atténuer le changement climatique.
- 2. Ressources renouvelables :** Contrairement aux carburants fossiles qui sont limités et non renouvelables, les biocarburants sont produits à partir de matières premières renouvelables, telles que des cultures végétales ou des résidus organiques. Cela réduit la dépendance aux combustibles fossiles et favorise une utilisation plus durable des ressources naturelles.
- 3. Amélioration de la sécurité énergétique :** Les biocarburants peuvent aider à diversifier les sources d'énergie en réduisant la dépendance aux importations de pétrole et en favorisant l'autosuffisance énergétique des pays. La production de biocarburants peut être réalisée localement, ce qui réduit les risques géopolitiques associés à l'approvisionnement en énergie.
- 4. Développement rural et création d'emplois :** La production de biocarburants peut stimuler le développement économique dans les zones rurales en créant des emplois tout au long de la chaîne de valeur, de la culture des matières premières à la transformation et à la distribution des biocarburants. Cela peut contribuer à réduire la pauvreté et à renforcer les économies locales.
- 5. Utilisation des déchets et des résidus :** Les biocarburants peuvent être produits à partir de déchets agricoles, de résidus alimentaires ou d'autres biomasses non alimentaires. Cela permet de valoriser ces déchets et de les transformer en une source d'énergie utile, réduisant ainsi les problèmes liés à l'élimination des déchets. (2).

Cependant, il est important de noter que la production et l'utilisation des biocarburants doivent être gérées de manière durable pour minimiser les impacts négatifs sur l'environnement et la sécurité alimentaire. Une approche équilibrée, prenant en compte les aspects sociaux, environnementaux et économiques, est essentielle pour maximiser les avantages des biocarburants. (2).

I.1.3 Les grandes catégories de biocarburants :

Les biocarburants peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur matière première et de leur procédé de production. Voici les principales catégories de biocarburants :

- 1. Biodiesel :** Le biodiesel est produit à partir d'huiles végétales ou de graisses animales par un processus de transestérification. Les huiles végétales couramment utilisées comprennent l'huile de colza, l'huile de soja, l'huile de palme et l'huile de tournesol. Le biodiesel peut être utilisé comme substitut partiel ou total du diesel conventionnel dans les moteurs diesel.
- 2. Bioéthanol :** Le bioéthanol est produit par fermentation de matières premières riches en sucre ou en amidon, telles que la canne à sucre, le maïs, la betterave à sucre ou les céréales. Le processus de fermentation convertit les sucres en éthanol, qui peut être utilisé comme additif dans l'essence ou comme carburant pur dans les véhicules flex-fuel.
- 3. Biogaz :** Le biogaz est produit par fermentation anaérobie de matières organiques, telles que les déchets agricoles, les résidus alimentaires, les déchets verts et les boues d'épuration. Il est composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone, et peut être utilisé pour la production d'électricité, de chaleur ou comme carburant pour les véhicules fonctionnant au gaz naturel.
- 4. Bio-gazole :** Le bio-gazole est un biocarburant liquide similaire au biodiesel, mais qui est produit à partir de matières premières lignocellulosiques, telles que les déchets de bois, les pailles et les tiges de culture non alimentaires. Le bio-gazole est encore en phase de développement et de recherche à grande échelle.

Il existe également d'autres types de biocarburants en cours de développement et d'exploration, tels que les biocarburants d'algues, qui utilisent des algues comme matière première, et les biocarburants de deuxième et troisième générations, qui visent à utiliser des matières premières non alimentaires, telles que les algues, les résidus agricoles et les déchets lignocellulosiques. (3).

I.1.4 Biocarburant de première, deuxième et troisième génération :

Les biocarburants sont souvent classés en trois générations, en fonction de la matière première utilisée et des technologies de production. Voici une description des biocarburants de première, deuxième et troisième génération :

- 1. Biocarburants de première génération :** Les biocarburants de première génération sont produits à partir de matières premières alimentaires telles que les cultures alimentaires (maïs, blé, canne à sucre) et les huiles végétales (colza, soja, palme). Ils sont généralement produits à l'aide de technologies de conversion bien établies, telles que la fermentation pour le bioéthanol et la transestérification pour le biodiesel. Les biocarburants de première génération ont été largement utilisés, mais ils ont suscité des préoccupations quant à leurs impacts sur la sécurité alimentaire et l'utilisation des terres agricoles.
- 2. Biocarburants de deuxième génération :** Les biocarburants de deuxième génération sont produits à partir de matières premières non alimentaires, telles que les déchets agricoles, les résidus de cultures, la biomasse lignocellulosique et les algues. Les technologies de production de biocarburants de deuxième génération, comme la gazéification, la pyrolyse et l'hydrolyse enzymatique, permettent de convertir ces matières premières en biocarburants. Les biocarburants de deuxième génération sont considérés comme ayant un meilleur rendement énergétique et une empreinte carbone plus faible que les biocarburants de première génération. Ils contribuent également à réduire la compétition entre les cultures alimentaires et les biocarburants.
- 3. Biocarburants de troisième génération :** Les biocarburants de troisième génération sont produits à partir de matières premières non alimentaires spécifiquement cultivées à des fins de biocarburants, telles que les algues. Les algues peuvent être cultivées dans des photobioréacteurs ou des étangs et utilisent la photosynthèse pour convertir la lumière solaire en énergie chimique. Les biocarburants d'algues sont considérés comme ayant un potentiel élevé en termes de rendement, de productivité et d'efficacité énergétique. Ils ne nécessitent pas de terres agricoles de haute qualité et peuvent utiliser des eaux usées ou des eaux salines pour leur culture.

Il est important de noter que les biocarburants de troisième génération sont encore en phase de recherche et développement à grande échelle, et leur déploiement commercial à grande échelle est encore limité. (4).

I.2 Les graisses animales et des chameaux :

I.2.1 Généralité sur les graisses animales :

Les graisses animales sont des lipides provenant des tissus adipeux des animaux. Elles sont principalement constituées de triglycérides, qui sont des esters de glycérol avec des acides gras. Les graisses animales se trouvent généralement dans les tissus sous-cutanés, les organes internes et la moelle osseuse des animaux.

Les graisses animales sont utilisées dans divers domaines, tels que l'alimentation humaine et animale, la cosmétique, la fabrication de savons et de bougies, ainsi que dans la production de biocarburants. L'utilisation des graisses animales varie en fonction de leurs caractéristiques physiques, de leur point de fusion et de leurs propriétés nutritionnelles.

Ces graisses peuvent provenir de différentes sources animales, notamment les bovins, les porcs, les volailles, les poissons et les animaux marins. Par exemple, la graisse de porc est largement utilisée dans l'industrie alimentaire et la fabrication de produits transformés. La graisse de poisson est riche en acides gras oméga-3, ce qui en fait un ingrédient courant dans les compléments alimentaires et les produits de santé.

L'utilisation des graisses animales dans la production de biocarburants, tels que le biodiesel, est une alternative intéressante pour valoriser ces matières premières et réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Les graisses animales peuvent être transformées par un processus de transestérification en biodiesel, qui peut être utilisé comme carburant dans les moteurs diesel.

Cependant, il est important de noter que l'utilisation des graisses animales soulève également des questions éthiques et environnementales, notamment en ce qui concerne les pratiques d'élevage, le bien-être animal et les impacts potentiels sur la biodiversité et les ressources naturelles. (5)

I.2.2 Composition chimique de graisses de chameau :

La composition chimique des graisses de chameau peut varier en fonction de divers facteurs tels que l'alimentation, l'âge, le sexe et l'environnement du chameau. Cependant, en général, les graisses de chameau contiennent une combinaison d'acides gras saturés, mono insaturés et polyinsaturés. Voici une estimation approximative de la composition en acides gras des graisses de chameau :

CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- Acides gras saturés : Les acides gras saturés représentent généralement une proportion importante des graisses de chameau. Les acides gras saturés les plus courants sont l'acide palmitique (C16:0) et l'acide stéarique (C18:0).
- Acides gras monoinsaturés : Les acides gras monoinsaturés, tels que l'acide oléique (C18:1), sont également présents dans les graisses de chameau. L'acide oléique est un acide gras monoinsaturés considéré comme bénéfique pour la santé, en raison de ses effets positifs sur le profil lipidique sanguin.
- Acides gras polyinsaturés : Les graisses de chameau contiennent également des acides gras polyinsaturés, tels que les acides linoléique (C18:2) et linoléique (C18:3). Ces acides gras essentiels jouent un rôle important dans le fonctionnement du corps humain et sont nécessaires pour la croissance et le développement. (6).

Il est important de noter que la composition exacte des graisses de chameau peut varier en fonction de plusieurs facteurs et qu'il peut y avoir des variations entre les différentes parties du corps du chameau, comme le tissu adipeux sous-cutané et les dépôts de graisse interne.

I.2.3 Caractéristiques physico-chimiques de graisse de chameau :

Tableau I-1 : Propriétés physicochimiques de la matière étudiée de graisse de chameaux :(7)

Propriétés	Unités	
Couleur		Blanc
Point de fusion	°C	45±0.5
Teneur en humidité	%	3.29 ±0.26
Cendre	%	0.04±0.01
Acide gras libre (sous forme d'acide oléique)	%	0.96 ± 0.08
Viscosité cinématique (60 °C)	mm s ⁻¹	22.18±0.12
Indice de réfraction (60 °C)		1.468 ± 0.001
Valeur de saponification	KOH/g graisse	202.3 ± 0.8
Matière insaponifiable	%	1.37±0.1
Indice de peroxyde	mequiv.O ₂ /kg	3.37± 0.08
Indice d'iode	g/100 g d'huile	62.74

I.4 Le biodiesel :

I.4.1 Définition et origine de biodiesel :

Le biodiesel est un carburant renouvelable et respectueux de l'environnement qui est produit à partir de sources biologiques, telles que les huiles végétales, les graisses animales et les huiles de cuisson usagées. Il est souvent utilisé comme substitut ou additif au diesel conventionnel dérivé du pétrole.

Le biodiesel est produit par un processus appelé transestérification, qui implique la réaction chimique d'un matériau lipidique (comme l'huile végétale) avec un alcool (généralement le méthanol ou l'éthanol) en présence d'un catalyseur, généralement de la soude caustique ou de la potasse. Ce processus transforme les triglycérides présents dans les huiles et les graisses en esters d'acides gras, qui constituent la base du biodiesel. Le glycérol, un sous-produit de la réaction, est généralement séparé et utilisé dans d'autres applications.

Le biodiesel a gagné en popularité en raison de ses avantages environnementaux par rapport au diesel conventionnel. Il est considéré comme Le point trouble (PT) et le point d'écoulement (PE) sont deux caractéristiques importantes du biodiesel qui déterminent sa capacité à fonctionner dans des conditions de température plus basses. Voici leur définition et quelques références pour en savoir plus Alternative plus propre car il réduit les émissions de gaz à effet de serre et les émissions de polluants atmosphériques tels que les oxydes de soufre et les particules fines. De plus, le biodiesel est biodégradable et non toxique, ce qui en fait une option plus écologique.

Il convient de noter que la définition et les spécifications exactes du biodiesel peuvent varier selon les pays et les normes spécifiques. Les normes internationales courantes pour le biodiesel comprennent la norme EN 14214 en Europe et la norme ASTM D6751 aux États-Unis. (8).

I.4.2 Moteurs et carburant diesel :

Les moteurs diesel sont des moteurs à combustion interne qui fonctionnent en utilisant le carburant diesel comme combustible. Le carburant diesel est un carburant combustible dérivé du pétrole brut et spécialement conçu pour les moteurs diesel. Il se distingue du carburant essence utilisée dans les moteurs à essence. (9).

Les moteurs diesel fonctionnent sur le principe de la compression de l'air à l'intérieur du cylindre du moteur, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'air comprimé. Ensuite, le carburant diesel est injecté directement dans le cylindre à haute pression, où il entre en contact avec l'air chaud et s'enflamme spontanément en raison de la chaleur élevée de l'air. Cette combustion produit de l'énergie qui est convertie en travail mécanique pour alimenter le moteur. (9).

Le carburant diesel a une composition chimique spécifique, caractérisée par sa teneur élevée en hydrocarbures, notamment des alcanes, des cycloalcanes et des composés aromatiques. Il contient également des additifs qui améliorent ses propriétés de combustion, de lubrification et de protection contre la corrosion. (9).

I.4.3 Les sources de matière primaire de biodiesel

Les sources de matières premières pour la production de biodiesel sont principalement des huiles végétales et des graisses animales. Voici quelques-unes des sources couramment utilisées :

- 1. Huile de soja :** L'huile de soja est l'une des principales sources d'huile végétale utilisée pour la production de biodiesel. Elle est largement disponible et présente des caractéristiques chimiques favorables à la transformation en biodiesel.
- 2. Huile de colza :** L'huile de colza est une autre source populaire d'huile végétale pour la production de biodiesel. Elle possède des propriétés similaires à l'huile de soja et peut être utilisée seule ou en mélange avec d'autres huiles.
- 3. Huile de tournesol :** L'huile de tournesol est également utilisée comme source d'huile végétale pour la production de biodiesel. Elle est riche en acides gras monoinsaturés, ce qui peut influencer les caractéristiques du biodiesel produit.
- 4. Huile de palme :** L'huile de palme est utilisée dans certains cas pour la production de biodiesel, bien qu'elle soit plus controversée en raison de son impact environnemental et de son utilisation dans d'autres industries.
- 5. Graisses animales :** Les graisses animales, telles que les graisses de porc, de bœuf et de volaille, peuvent également être utilisées comme matières premières pour la production de biodiesel. Elles sont souvent issues de sous-produits de l'industrie alimentaire.

Il convient de noter que la disponibilité et l'utilisation des différentes sources de matières premières peuvent varier selon les régions et les politiques spécifiques de chaque pays. (10).

I.4.4 Les caractéristiques du biodiesel :

Le biodiesel possède différentes caractéristiques physicochimiques qui définissent sa qualité et sa compatibilité avec les moteurs diesel. Voici certaines des caractéristiques les plus importantes du biodiesel. (10).

I.4.4.1 La viscosité :

La viscosité du biodiesel est une propriété physique importante qui mesure la résistance d'un fluide à s'écouler. Elle peut être déterminée par différentes méthodes, telles que la viscosimètre cinématique ou la viscosimètre capillaire, et est généralement exprimée en centistokes (cSt) ou en millimètres carrés par seconde (mm^2/s).

La viscosité du biodiesel peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la composition spécifique du biodiesel, la température et les méthodes de production. En général, le biodiesel a une viscosité plus élevée que le diesel conventionnel dérivé du pétrole.

La viscosité du biodiesel est un paramètre important à considérer, car elle peut affecter le fonctionnement des systèmes d'injection de carburant, la pulvérisation du carburant dans la chambre de combustion et la combustion elle-même. Des valeurs de viscosité appropriées sont nécessaires pour assurer un bon fonctionnement du moteur diesel.

Il est courant de spécifier la viscosité du biodiesel à une température de référence, telle que 40 °C. Les normes et les spécifications régionales établissent des limites pour la viscosité du biodiesel afin de garantir sa compatibilité avec les moteurs et les systèmes de carburant. (11).

I.4.4.2 Le pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique du biodiesel, également connu sous le nom de valeur calorifique, est une mesure de la quantité d'énergie libérée lors de la combustion du biodiesel. Il est exprimé en unités énergétiques telles que le mégajoule par kilogramme (MJ/kg) ou la kilocalorie par kilogramme (kcal/kg).

Le pouvoir calorifique du biodiesel peut varier en fonction de la source de matière première utilisée pour sa production, ainsi que du processus de production lui-même. En général, le biodiesel a un pouvoir calorifique légèrement inférieur à celui du diesel conventionnel dérivé du pétrole.

La valeur calorifique typique du biodiesel se situe généralement entre 37 et 38 MJ/kg (ou environ 8 800 à 9 100 kcal/kg), ce qui est proche de la valeur calorifique du diesel fossile. Cependant, il convient de noter que ces valeurs peuvent varier en fonction de la composition spécifique du biodiesel et des méthodes de production utilisées. (11).

I.4.4.3 Le point trouble et le point d'écoulement :

Le point trouble (PT) et le point d'écoulement (PE) sont deux caractéristiques importantes du biodiesel qui déterminent sa capacité à fonctionner dans des conditions de température plus basses. Voici leur définition et quelques références pour en savoir plus :

1. Point trouble (PT) : Le point trouble est la température la plus basse à laquelle le biodiesel commence à former des cristaux et à devenir trouble. Ces cristaux peuvent obstruer les filtres de carburant et réduire la performance du moteur à basse température.
2. Point d'écoulement (PE) : Le point d'écoulement est la température la plus basse à laquelle le biodiesel cesse de s'écouler et devient trop visqueux pour être pompé. Il indique la capacité du biodiesel à maintenir sa fluidité à basse température. (11).

I.4.4.4 L'indice de cétane :

L'indice de cétane mesure la capacité d'un carburant à s'auto-enflammer lorsqu'il est injecté dans un moteur diesel. Un indice de cétane élevé indique une meilleure qualité de combustion et une meilleure performance du moteur. (12).

I.4.4.5 L'oxydation :

L'oxydation du biodiesel est un processus indésirable qui peut se produire lorsque le biodiesel est exposé à l'air, à la chaleur et à la lumière. L'oxydation peut entraîner une détérioration de la qualité du biodiesel et affecter ses performances en tant que carburant.

Lorsque le biodiesel s'oxyde, il réagit avec l'oxygène de l'air, ce qui entraîne la formation de composés oxydés, tels que les peroxydes et les acides gras oxydés. Ces composés peuvent

entraîner une augmentation de l'acidité du biodiesel, la formation de dépôts, une détérioration de la stabilité et une réduction des propriétés de combustion.

Plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'oxydation du biodiesel, notamment :

- 1. Exposition à l'air :** Lorsque le biodiesel est exposé à l'air, il est en contact avec l'oxygène, ce qui favorise l'oxydation. Il est donc important de stocker et de manipuler le biodiesel dans des conditions qui limitent son exposition à l'air.
- 2. Chaleur :** La chaleur accélère le processus d'oxydation. Des températures élevées peuvent augmenter la vitesse à laquelle le biodiesel s'oxyde, ce qui peut entraîner une détérioration plus rapide de la qualité.
- 3. Lumière :** L'exposition à la lumière, en particulier à la lumière ultraviolette, peut également accélérer l'oxydation du biodiesel. C'est pourquoi il est recommandé de stocker le biodiesel dans des conteneurs opaques pour réduire l'exposition à la lumière. (12).

I.4.4.6 Le pouvoir lubrifiant :

La lubricité du diesel fait référence à sa capacité à réduire le frottement et l'usure des pièces mobiles du moteur, notamment les pompes, les injecteurs et les soupapes. La viscosité, l'acidité, la teneur en eau et les composés soufrés du diesel peuvent influencer sa lubricité.

Des études ont montré que la lubricité du biodiesel peut différer de celle du diesel conventionnel. Selon une étude menée par Seregin E.P.A en 1975, la lubricité du diesel est influencée par des facteurs tels que la viscosité, l'acidité, la teneur en eau et les composés soufrés.

Une autre étude menée par Knoth, G en 2005 a comparé la lubricité du biodiesel et du diesel. Les résultats ont montré que, même avec des additifs, le frottement mesuré du biodiesel était inférieur à celui du diesel pour des températures de 25°C et 60°C. Les valeurs spécifiques de frottement mesuré n'ont pas été déclarées dans la référence fournie.

Il convient de noter que la lubricité est une propriété complexe qui peut dépendre de nombreux facteurs, y compris la composition spécifique du biodiesel, les additifs utilisés et les conditions d'essai. Il est donc important de considérer ces facteurs lors de l'évaluation de la lubricité du biodiesel. (13).

I.5 Synthèse du biodiesel par transestérification :

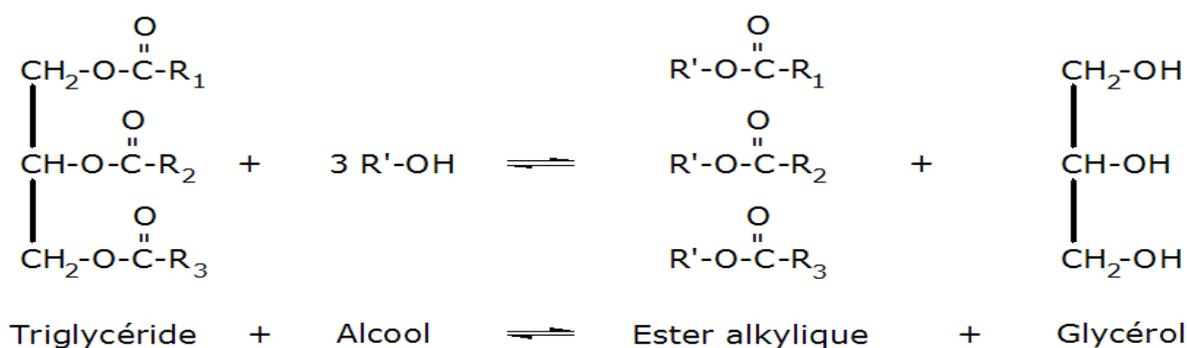
I.5.1 Définition :

La transestérification est un processus chimique utilisé pour la synthèse du biodiesel à partir d'huiles végétales ou animales. Il s'agit d'une réaction entre les triglycérides présents dans l'huile et un alcool en présence d'un catalyseur. Cette réaction permet de produire des esters méthyliques ou éthyliques, qui constituent le biodiesel. (14).

I.5.2 Equation de la réaction de transestérification :

L'équation générale de la réaction de transestérification pour la production de biodiesel à partir d'huiles végétales ou animales est la suivante :

Triglycérides + Alcool \rightarrow Biodiesel + Glycérol



I.1 Figure: Equation de transestérification

Cette réaction implique la conversion des triglycérides présents dans l'huile en esters alkyliques (biodiesel) et en glycérol. L'alcool utilisé peut être du méthanol ou de l'éthanol, et la réaction est généralement catalysée par un catalyseur basique tel que la soude caustique (NaOH) ou le méthoxide de sodium (NaOMe).

La réaction de transestérification est une réaction d'estérification qui se produit par substitution nucléophile. Les triglycérides, qui sont des molécules composées de trois groupes d'acides gras estérifiés à un glycérol, réagissent avec l'alcool en présence du catalyseur pour former des esters méthyliques ou éthyliques (biodiesel) et du glycérol.

Il est important de noter que la réaction de transestérification est une réaction équilibrée qui peut être influencée par les ratios des réactifs, la température, le temps de réaction et la présence

du catalyseur. Des conditions optimales de réaction doivent être déterminées pour obtenir un rendement élevé en biodiesel tout en minimisant la formation d'impuretés. (15).

I.5.3 Facteurs influençant de la réaction de transestérification des huiles :

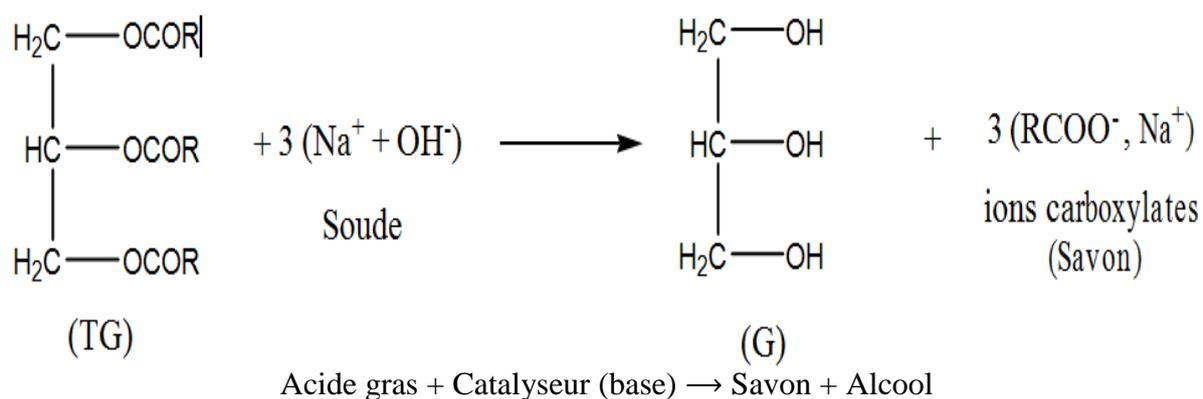
Des nombreux paramètres influencent le processus de la réaction de transestérification, tels que les conditions de réaction, le ratio molaire alcool/huile, le type et la quantité de catalyseur, le temps et la température de réaction, la pureté des réactifs, notamment la teneur en acides gras libres et en eau des huiles, etc.

Le temps et la température de réaction sont des facteurs importants à contrôler pour atteindre une conversion complète des triglycérides. Des températures élevées et des temps de réaction prolongés peuvent accélérer la réaction, mais ils peuvent également entraîner la dégradation du biodiesel.

La pureté des réactifs, en particulier la teneur en acides gras libres et en eau des huiles, est cruciale car les acides gras libres peuvent réagir avec le catalyseur et former des savons, tandis que la présence d'eau peut interférer avec la réaction et favoriser la saponification. (15).

I.5.4 Les acides gras libres et l'eau :

Les acides gras libres et l'eau sont des paramètres cruciaux dans le processus de transestérification. La présence d'acides gras libres dans l'huile peut entraver la transformation en biodiesel en favorisant la réaction de saponification, qui conduit à la formation de savon. Par conséquent, il est recommandé que l'acidité de l'huile soit inférieure à 3% [24]. En effet, pendant la transestérification, des réactions indésirables se produisent simultanément. Les acides gras réagissent avec le catalyseur (généralement une base) pour former du savon. De plus, lorsque la température augmente, l'eau présente dans l'huile se dissocie en molécules de glycérides et d'acides gras. Ces acides gras supplémentaires renforcent la réaction de saponification en cours. Cela réduit inévitablement le rendement de conversion de l'huile en esters. En résumé, plus l'acidité de l'huile est élevée, plus le rendement de conversion sera faible en raison de la saponification selon la réaction suivante :



I.2 Figure : Réaction de saponification des triglycérides

Il est donc crucial de veiller à ce que l'huile utilisée pour la transestérification présente une faible teneur en acides gras libres pour minimiser la réaction de saponification et maximiser le rendement de la conversion en biodiesel. (15).

I.5.5 Type et quantité de catalyseur :

Le choix du type et de la quantité de catalyseur dans la réaction de transestérification pour la production de biodiesel est un facteur crucial qui influence à la fois la cinétique de la réaction et la qualité du biodiesel obtenu. Les catalyseurs les plus couramment utilisés sont les bases fortes, telles que la soude caustique (NaOH) et le méthoxide de sodium (NaOMe). Cependant, il existe également d'autres catalyseurs tels que les bases alcalines hétérogènes, les enzymes et les catalyseurs acides. Le choix du catalyseur dépend de plusieurs facteurs, notamment les conditions de réaction, le type d'huile utilisé et les considérations économiques.

La quantité de catalyseur utilisée dans la réaction dépend du type de catalyseur et du ratio molaire alcool/huile. En général, des quantités de catalyseur allant de 0,5% à 2% en poids par rapport à la quantité d'huile sont utilisées. Cependant, il est important de trouver un équilibre entre une quantité suffisante de catalyseur pour favoriser la réaction de transestérification et une quantité excessive qui peut entraîner des problèmes tels que la formation de savon et la contamination du biodiesel. (16).

I.5.6 Les principales catalyses :

Les principales catalyses utilisées dans la production de biodiesel sont les catalyses basiques et les catalyses acides.

- 1. Catalyse basique :** La catalyse basique est la méthode la plus couramment utilisée pour la production de biodiesel. Les catalyseurs basiques les plus fréquemment employés sont la soude caustique (NaOH) et le méthoxide de sodium (NaOMe). Ces catalyseurs réagissent avec les triglycérides présents dans l'huile pour former des esters alkyliques (biodiesel) et du glycérol. Cette réaction est appelée transestérification. Les catalyseurs basiques sont efficaces, peu coûteux et faciles à utiliser. (17).
- 2. Catalyse acide :** La catalyse acide est une alternative à la catalyse basique dans la production de biodiesel. Les catalyseurs acides, tels que l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide chlorhydrique (HCl), peuvent également être utilisés pour convertir les triglycérides en esters alkyliques. Cependant, la catalyse acide présente certains inconvénients, tels que la formation d'acides gras libres et de sous-produits indésirables. Des étapes supplémentaires de neutralisation et de purification sont nécessaires pour éliminer ces impuretés. (18).

I.5.7 Catalyse homogène :

La catalyse homogène est un type de catalyse où le catalyseur est présent dans la même phase que les réactifs. Dans le contexte de la production de biodiesel, la catalyse homogène fait référence à l'utilisation de catalyseurs qui se dissolvent dans les réactifs liquides, formant ainsi une solution homogène.

Dans le cas de la transestérification pour la production de biodiesel, la catalyse homogène basique est couramment utilisée avec des catalyseurs tels que la soude caustique (NaOH) et le méthoxide de sodium (NaOMe). Ces catalyseurs se dissolvent dans les réactifs d'huile végétale ou animale et d'alcool, formant une solution homogène qui facilite la réaction de transestérification. (19).

I.5.8 Catalyse hétérogène :

Les catalyseurs hétérogènes (solides) peuvent être utilisés dans les réactions de transestérification des huiles végétales. Ces catalyseurs présentent plusieurs avantages, notamment leur facilité de séparation du milieu réactionnel par simple filtration, leur durée de vie plus ou moins longue et la possibilité de les réutiliser dans plusieurs cycles de réaction. Cela permet de réduire la consommation de catalyseur, ce qui se traduit par une diminution des coûts de production et de traitement. De plus, l'utilisation de catalyseurs hétérogènes peut rendre le processus de production de biodiesel plus sûr, plus économique et plus respectueux de l'environnement.

Les catalyseurs hétérogènes peuvent être de nature acide ou basique. Lorsqu'ils sont utilisés dans des conditions de réaction optimales, ces catalyseurs peuvent conduire à des rendements en esters d'acides gras satisfaisants, généralement supérieurs à 95%.

Cependant, il convient de noter que les catalyseurs hétérogènes peuvent présenter certains inconvénients, tels que leur coût souvent plus élevé que celui des catalyseurs homogènes. De plus, leur synthèse et leur mise en œuvre peuvent parfois être plus complexes. (20).

I.5.9 Ratio molaire alcool/huile et type d'alcool :

Le ratio molaire alcool/huile et le type d'alcool utilisé sont des paramètres importants dans la réaction de transestérification pour la production de biodiesel.

Le ratio molaire alcool/huile fait référence à la quantité relative d'alcool par rapport à l'huile végétale ou animale utilisée dans la réaction. Ce ratio détermine la quantité d'alcool nécessaire pour convertir les triglycérides en esters alkylés (biodiesel) et influence directement le rendement de la réaction. Des ratios molaire alcool/huile compris entre 6:1 et 12:1 sont généralement recommandés pour la transestérification.

Le type d'alcool utilisé peut également avoir un impact sur la réaction de transestérification. Les alcools les plus couramment utilisés sont le méthanol et l'éthanol. Le méthanol est le choix le plus répandu en raison de sa disponibilité, de son faible coût et de sa réactivité élevée. Cependant, l'utilisation d'éthanol présente certains avantages, tels qu'une meilleure compatibilité avec les moteurs diesel existants et une réduction des émissions de particules.

fin. Il convient de noter que l'utilisation d'autres alcools, tels que le propanol ou le butanol, a également été étudiée, mais est moins courante. (19).

I.5.10 L'effet du temps de réaction :

Le temps de réaction a un impact sur le taux de conversion des huiles végétales ou des graisses animales en biodiesel. Une étude a montré que le taux de conversion des huiles de cacahuètes, de graines de coton, de tournesol et de soja en biodiesel augmente avec le temps de réaction. Les conditions de réaction étaient un rapport méthanol/huile de 6:1, 0,5% de catalyseur au méthoxide de sodium et une température de 60 °C. Après 1 minute, un rendement de 80% de biodiesel a été observé pour les huiles de soja et de tournesol. Après 60 minutes, les taux de conversion étaient presque les mêmes pour les quatre huiles.

Dans le cas de la transestérification du suif de bœuf avec du méthanol, la réaction a commencé lentement au cours de la première minute en raison de la nécessité de mélanger et de disperser le méthanol dans le suif de bœuf. Cependant, au cours des cinq minutes suivantes, la réaction s'est accélérée. La production de suif de bœuf a atteint un pic maximal d'environ 15 minutes. Au début, les di- et les monoglycérides ont augmenté, puis ont diminué. À la fin de la réaction, la quantité de monoglycérides était supérieure à celle des diglycéride. (21).

I.5.11 L'effet de la température de réaction :

La transestérification peut être réalisée à différentes températures, en fonction des huiles ou des graisses animales des chameaux utilisés, tout en évitant de dépasser le point d'ébullition des alcools utilisés. Dans une étude, la méthanolyse de l'huile de ricin en ricinoléate de méthyle a été effectuée avec un rapport molaire de 6:1 à 12:1 et une quantité de 0,005 à 0,35% (en poids d'huile) de NaOH comme catalyseur. La réaction s'est déroulée de manière satisfaisante à des températures comprises entre. (21).

I.5.12 L'agitation :

L'agitation joue un rôle essentiel dans la transestérification en favorisant un bon contact entre les réactifs et en homogénéisant le milieu réactionnel. Il est crucial que l'huile et le catalyseur soient bien mélangés pour assurer une réaction efficace.

En mélangeant graisse des chameaux et le catalyseur, l'agitation permet une dispersion uniforme du catalyseur dans, ce qui favorise une réaction homogène. Cela augmente la surface de contact entre les molécules réactives, favorisant ainsi les interactions nécessaires à la transestérification.

De plus, l'agitation aide à prévenir la formation de phases distinctes dans le mélange réactionnel. Certains catalyseurs peuvent avoir tendance à former des phases séparées ou des dépôts s'ils ne sont pas correctement dispersés et mélangés avec l'huile. L'agitation efficace permet d'éviter ces problèmes et de maintenir un système réactionnel homogène.

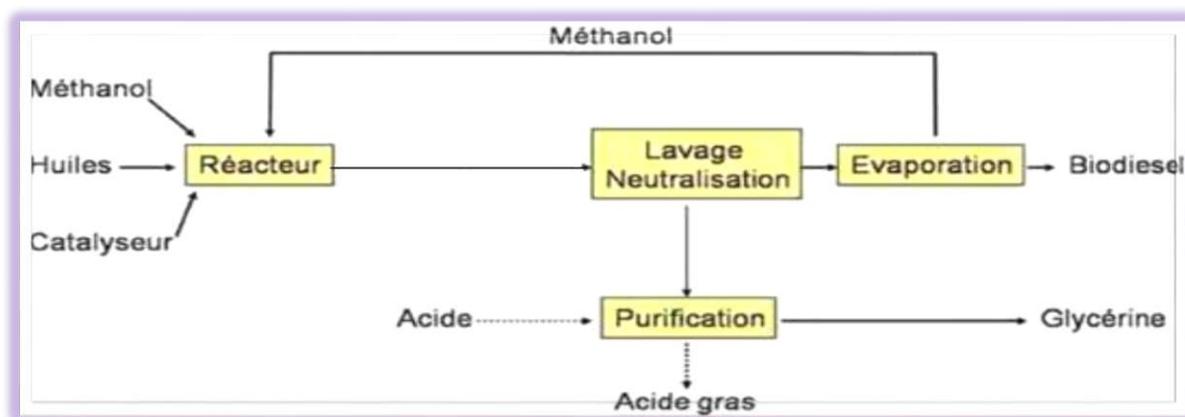
En résumé, l'agitation est essentielle dans la transestérification pour assurer un bon contact entre l'huile et le catalyseur, favoriser une réaction homogène et prévenir la formation de phases distinctes. Cela permet d'optimiser le rendement et la qualité du produit final, en garantissant une réaction efficace. (21).

I.6 Transformation de l'huile ou de la graisse :

La production de biodiesel à partir d'huile ou de graisse implique le processus de transestérification, qui modifie chimiquement la structure de l'huile en formant des esters, les composants principaux du biodiesel. Les étapes de ce procédé comprennent généralement les étapes suivantes (cas d'huile).

- **Préparation de l'huile :** L'huile végétale est généralement utilisée comme matière première pour la production de biodiesel. Avant la transestérification, l'huile est généralement raffinée et purifiée pour éliminer les impuretés qui pourraient affecter le processus de réaction.
- **Préparation du mélange réactionnel :** Dans cette étape, l'huile est mélangée avec un alcool, tel que le méthanol ou l'éthanol, ainsi qu'un catalyseur, souvent une base forte comme la soude caustique (NaOH). Le rapport molaire entre l'alcool et l'huile est généralement défini en fonction des conditions de réaction spécifiques.
- **Séparation et purification :** Une fois la réaction terminée, le mélange réactionnel est laissé à refroidir. La glycérine, qui est plus dense, se sépare du biodiesel et peut être récupérée par décantation ou par d'autres méthodes de séparation. Le biodiesel est ensuite soumis à des étapes de purification supplémentaires pour éliminer les impuretés résiduelles, telles que le lavage à l'eau ou l'utilisation de résines d'échange d'ions.

- **Stockage et utilisation** : Le biodiesel purifié est stocké dans des réservoirs appropriés, prêt à être utilisé comme carburant dans les moteurs diesel. Il peut être utilisé seul (B100) ou mélangé à du diesel conventionnel dans différentes proportions, selon les exigences et les réglementations en vigueur.



(21)

Figure I.3 : Différentes étapes de la fabrication de biodiesel

I.6.1 Réaction :

Pour la production de biodiesel, il est nécessaire d'utiliser un réactif alcoolique tel que le méthanol ou l'éthanol, ainsi qu'un catalyseur tel que l'hydroxyde de potassium ou l'hydroxyde de sodium, afin d'accélérer la réaction de transestérification. Le catalyseur est dissous dans l'alcool en utilisant un agitateur pour assurer une bonne dispersion. Ensuite, le mélange alcool/catalyseur est introduit dans un réacteur fermé, dans lequel l'huile est ajoutée.

La réaction de transestérification se déroule à une température légèrement supérieure au point d'ébullition de l'alcool, généralement autour de 70 °C. Cette température est choisie pour accélérer la vitesse de réaction. Le temps de réaction peut varier entre 1 et 8 heures, selon les conditions spécifiques et les objectifs de production. (22).

I.6.2 Lavage de biodiesel (ester) :

Le biodiesel peut être purifié selon le procédé et l'utilisation finale prévus. Une méthode courante de purification consiste à effectuer un lavage à l'eau chaude. Cette étape vise à éliminer les résidus de catalyseur et d'autres impuretés présentes dans le biodiesel.

Lors du lavage à l'eau chaude, le biodiesel est mélangé avec de l'eau à une température appropriée. L'eau aide à dissoudre et à éliminer les impuretés solubles dans l'eau, tandis que le biodiesel conserve sa solubilité dans les hydrocarbures. Après le mélange, les phases aqueuse et lipidique se séparent, permettant ainsi de recueillir le biodiesel purifié.

Une fois purifié, le biodiesel présente généralement une couleur ambre-jaune et une viscosité similaire à celle du pétrodiesel. Cela lui permet d'être utilisé dans les moteurs diesel sans nécessiter de modifications majeures ou d'adaptations particulières.

Il convient de noter que les procédés de purification peuvent varier en fonction des spécifications et des exigences de chaque producteur de biodiesel, ainsi que des réglementations en vigueur dans différentes régions. (22).

I.6.3 Récupération de l'alcool :

Une fois que la réaction de transestérification est terminée et que le biodiesel et le glycérol se sont séparés, l'excès d'alcool présent dans chaque phase peut être éliminé. Cette étape vise à récupérer l'alcool pour une réutilisation ultérieure dans le processus de production de biodiesel.

Il existe différentes méthodes pour éliminer l'excès d'alcool. Deux méthodes couramment utilisées sont l'évaporation et la distillation. Dans le cas de l'évaporation, la chaleur est appliquée pour vaporiser l'alcool, qui est ensuite collecté sous forme de vapeur et condensé pour être récupéré. La distillation est une méthode similaire, où l'alcool est chauffé jusqu'à son point d'ébullition et vaporisé, puis condensé et collecté.

Une fois l'alcool récupéré, il peut être purifié et réutilisé dans le processus de production de biodiesel. La récupération et la réutilisation de l'alcool permettent de réduire les coûts et de minimiser les déchets générés lors de la production de biodiesel.

Cependant, il est important de noter que les méthodes de récupération de l'alcool peuvent varier en fonction des procédés spécifiques et des équipements utilisés par chaque producteur de biodiesel. (22).

I.6.4 Neutralisation du glycérol :

Le catalyseur utilisé dans la réaction de transestérification est neutralisé en ajoutant un acide approprié. Cette neutralisation produit du glycérol brut, qui a une pureté variable, généralement entre 80 et 88%. À ce stade, le glycérol peut contenir de l'eau, des savons, de l'alcool et des traces de catalyseur non utilisé.

Cependant, pour répondre à des exigences spécifiques, notamment pour les marchés pharmaceutiques et cosmétiques, le glycérol brut doit subir une étape supplémentaire de distillation. Cette distillation vise à éliminer les impuretés présentes dans le glycérol, afin d'atteindre un degré de pureté supérieur à 99%.

Au cours de la distillation, le glycérol brut est chauffé et les différentes substances présentes ont des points d'ébullition différents, ce qui permet de les séparer. Le glycérol purifié, avec une pureté supérieure à 99%, est récupéré, tandis que les impuretés restantes sont éliminées.

Cette purification supplémentaire du glycérol permet de répondre aux normes de qualité et de pureté requises pour les applications pharmaceutiques et cosmétiques, où des niveaux élevés de pureté sont nécessaires pour des raisons de sécurité et de qualité.

Il est important de noter que les procédés de neutralisation et de distillation peuvent varier en fonction des spécifications et des exigences de chaque producteur de glycérol, ainsi que des normes réglementaires applicables dans différentes régions et industries. (22).

I.7 L'utilisation du biodiesel :

Généralement, le biodiesel est mélangé au diesel dérivé du pétrole (pétrodiesel) plutôt qu'utilisé à l'état pur. Les mélanges de biodiesel et de pétrodiesel sont identifiés par l'abréviation "Bxx", où "xx" représente le pourcentage de biodiesel dans le mélange. Par exemple, un carburant B20 contient 20 % de biodiesel et 80 % de pétrodiesel, tandis qu'un carburant B100 correspond au biodiesel pur. Différents types de mélanges sont commercialisés, les plus courants étant le B2, B5, B20 et B100 [13].

En raison de la complexité et de la diversité chimique du biodiesel, qui est un mélange d'esters, il doit être homologué selon plusieurs critères de qualité avant d'être commercialisé. Par exemple, en Amérique du Nord, les normes ASTM D6751 et en Europe, la norme EN 14214

sont utilisées pour homologuer le biodiesel. Ces normes spécifient des critères de qualité tels que l'indice de cétane, la viscosité, les teneurs en phosphore et en soufre, et d'autres paramètres. L'homologation selon ces normes garantit une qualité minimale pour le biodiesel.

En Amérique du Nord, il existe également un programme de certification volontaire appelé BQ-9000 pour les producteurs et les distributeurs de biodiesel. Ce programme, similaire aux programmes ISO, vise à assurer que le biodiesel produit respecte des normes de qualité préétablies à toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement, y compris les pratiques d'entreposage, d'échantillonnage, d'évaluation, de mélange, de distribution et de gestion du biodiesel. Cela garantit que le biodiesel atteint le consommateur avec une qualité conforme aux normes établies.

L'homologation et les programmes de certification contribuent à garantir la qualité et la conformité du biodiesel sur le marché, assurant ainsi sa performance et sa compatibilité avec les moteurs diesel, ainsi que le respect des réglementations environnementales et des normes de qualité applicables. (22).

I.8 L'effet du biodiesel sur l'environnement et humaine :

L'utilisation du biodiesel peut avoir des effets bénéfiques sur l'environnement et la santé humaine par rapport aux carburants fossiles traditionnels. Voici un aperçu des principaux avantages environnementaux et sanitaires du biodiesel :

1. Réduction des émissions de gaz à effet de serre : Le biodiesel est considéré comme une source d'énergie renouvelable car il est produit à partir de sources végétales telles que les huiles végétales et les graisses animales. Lorsqu'il est brûlé, le biodiesel émet moins de gaz à effet de serre que le diesel conventionnel, contribuant ainsi à réduire l'empreinte carbone.

2. Diminution des polluants atmosphériques : Le biodiesel a également montré des réductions significatives des émissions de polluants atmosphériques tels que les particules fines, les oxydes d'azote (NOx) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ces polluants peuvent avoir des effets néfastes sur la qualité de l'air et la santé humaine, et le biodiesel aide à les réduire.

CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Amélioration de la qualité de l'air : En raison de ses propriétés de combustion plus propres, l'utilisation de biodiesel peut contribuer à améliorer la qualité de l'air dans les zones urbaines et réduire les problèmes de smog et de pollution de l'air.
2. Moins de dépendance aux combustibles fossiles : L'utilisation du biodiesel permet de diversifier les sources d'énergie en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles. Cela peut contribuer à la sécurité énergétique et à la durabilité à long terme.
3. Biodégradabilité : Le biodiesel est biodégradable, ce qui signifie qu'il se décompose plus facilement dans l'environnement que les carburants à base de pétrole, réduisant ainsi l'impact des déversements et des fuites accidentelles.

Il est important de noter que les avantages environnementaux du biodiesel peuvent varier en fonction des sources de matières premières utilisées et des pratiques de production. Par conséquent, il est essentiel de veiller à une production responsable et durable de biodiesel pour maximiser ses bénéfices environnementaux. (23)

Chapitre II

Partie Expérimental

Chapitre II : Partie Expérimental

II.1 Méthode d'extraction de graisse de chameau et méthode de purification :

Le processus de transestérification des graisses de chameaux implique généralement les étapes suivantes :

- **Extraction de la graisse** : la graisse de chameau est extraite des tissus adipeux de l'animal.
- **Purification de la graisse** : la graisse est purifiée pour éliminer les impuretés telles que les protéines et l'eau.
- **Transestérification** : la graisse purifiée est mélangée avec un alcool et un catalyseur pour produire du biodiesel et de la glycérine.
- **Séparation** : le biodiesel et la glycérine sont séparés par décantation.

II.2 Matériels et produits utilisés :

Tableau II. 2 : Les matériels et les produits.

Les produits	Les matériels
- Graisses de chameaux	- Ballonde1000ml
- Méthanol(CH ₃ OH)	- Réfrigérant
- Hydroxyde de souduom	- Ampouleadécanté 1000ml
- Eau distillée	- Les bécher
	- Une balance
	- Une burette
	- Agitateur magnétique

II.3 Matières premières :

Tableau II.3 : Le matières premières de biodiesel sont les suivantes:

Composant	Quantité
Méthanol	20 ml
Temps de réaction	20 min-2 h 40 min
Graisse de chameaux	100 ml
Température	60 °C
Hydroxyde de sodium (NaOH)	0.01 g

II.4 Transestérification basique :

Tableau II.4 : Caractéristique de la transestérification basique

Caractéristique du procédé	Transestérification Basique
Température de réaction	Température de réaction modérée (50 - 60°C)
Type de réaction	Réaction chimique de conversion des graisses de chameaux
Catalyseur	Hydroxyde de sodium
Élimination des impuretés	Séparation des phases, lavage à l'eau, séchage, filtration de biodiesel
Avantages	Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et réduction des émissions de gaz à effet de serre
Alcool	Méthanol
Produit final	Biodiesel

II.5 Protocole expérimentale de transestérification des graisses de chameaux :

Nous prenons un kilo d'os de chameau, le mettons dans une casserole avec 3 litres d'eau, fermons la casserole et le mettons au bain-marie à une température de 100 degrés pendant 4 heures.



Figure II.1 Un montage montrant comment la graisse de chameau est préparée à partir d'os

Une fois le temps imparti écoulé, nous séparons les os de l'eau et mettons l'eau au réfrigérateur. Après quelques heures, nous remarquons que la graisse se dépose à la surface de l'eau. Nous les séparons et les mettons au réfrigérateur pour les utiliser. Plus tard au laboratoire.

Chapitre II : Partie Expérimental

Si nous voulons utiliser la graisse, nous la faisons fondre jusqu'à ce qu'elle devienne liquide. Nous mettons l'huile de graisse dans un tube à essai pour séparer l'eau. Nous ajoutons du sulfate de sodium pour enlever l'eau, puis nous procédons à la filtration.

Nous prenons 0,01 g d'hydroxyde de sodium NaOH et le mélangeons avec 20 ml de méthanol CH₃OH, puis nous mettons le mélange dans un agitateur magnétique pour les homogénéiser.

Ensuite, nous prenons 100 ml d'huile de graisse et la mettons dans un ballon et la plaçons dans un bain d'eau chauffé à 60°C pendant un certain temps.

$t_1 = 20 \text{ min}$

$t_2 = 40 \text{ min}$

$t_3 = 1 \text{ h}$

$t_4 = 1 \text{ h} + 20 \text{ min}$

$t_5 = 1 \text{ h} + 40 \text{ min}$

$t_6 = 2 \text{ h}$

$t_7 = 2 \text{ h} + 20 \text{ min}$

$t_8 = 2 \text{ h} + 40 \text{ min.}$



Figure II.2 Graisse de chameau à l'état liquide



Figure II.3. Filtration la graisse de chameau



Figure II.4 : Graisse de chameau à l'état solide

II.6 Récupération du biodiesel :

Après la fin de la procédure d'estérification, nous mettons le biocarburant dans une colonne d'essorage pendant 24 heures. Le jour suivant, nous le lavons avec de l'eau distillée en prenant 40 ml que nous chauffons puis ajoutons au biocarburant. Nous le mélangeons ensuite et le laissons reposer pendant un certain temps pour que l'eau se sépare du biocarburant.

Nous répétons cette opération trois fois, en enlevant l'eau distillée à chaque fois.

Nous le laissons reposer jusqu'au jour suivant où nous ajoutons du sulfate de sodium Na_2SO_4 pour enlever l'eau et le filtrons. Ensuite, nous chauffons le biocarburant à la température de 65°C pour enlever la quantité de méthanol qu'il contient.

Le jour suivant, nous le filtrons et obtenons ainsi un biocarburant sur lequel nous effectuons des analyses.

II.7 Rendement de la production de biodiesel :

Selon et d'autres articles, le rendement de la réaction se calcule par la formule suivante:

$$\eta = \frac{m_{\text{ester}}}{m_{\text{huile}}} \times 100$$

..... (II.1) (38).

Lorsque nous effectuons la procédure d'estérification et que nous modifions temps, nous obtenons les rendements de réaction suivants :

- $t_1 = 20 \text{ min} \rightarrow 56.93 \%$
- $t_2 = 40 \text{ min} \rightarrow 67.6\%$
- $t_3 = 1 \text{ h} \rightarrow 60.72\%$
- $t_4 = 1 \text{ h et } 20 \text{ min} \rightarrow 69.08\%$
- $t_5 = 1 \text{ h et } 40 \text{ min} \rightarrow 89.51\%$
- $t_6 = 2 \text{ h} \rightarrow 73,40\%$
- $t_7 = 2 \text{ h et } 20 \text{ min} \rightarrow 59.17 \%$
- $t_8 = 2 \text{ h et } 40 \text{ min} \rightarrow 62.38\%$

Il est important de noter que le rendement de production de biodiesel peut varier considérablement en fonction des conditions de production et de la qualité de la matière première.

Des processus de production inefficaces ou des matières premières de qualité inférieure peuvent entraîner une baisse du rendement de production. Des méthodes de production plus avancées et des matières premières de qualité supérieure peuvent augmenter le rendement de production de biodiesel.

II.8 Propriétés et caractérisation des produits obtenus :

La caractérisation des produits obtenus à partir de la graisse de chameau est importante pour évaluer leur qualité et leur utilisation potentielle dans diverses applications. Voici quelques propriétés et caractéristiques clés qui peuvent être utilisées pour caractériser ces produits :

II.8.1 Détermination du point d'éclair du biodiesel :

Pour déterminer le point d'éclair du biodiesel, vous pouvez utiliser la méthode :

- Préparez un échantillon de biodiesel à tester.
- Placez une petite quantité de l'échantillon de biodiesel dans un bocal de test en verre propre et sec.
- Insérez un thermomètre dans le récipient de test, avec le bulbe juste au-dessus de la surface de l'échantillon de biodiesel.
- Nous plaçons le bol d'essai dans un bain d'eau chaude, avec un couvercle ventilé pour permettre aux vapeurs de s'échapper.
- Chauffez l'échantillon de biodiesel à une vitesse constante de 1°C par minute.
- Surveillez le récipient d'essai pendant le chauffage pour détecter tout signe d'inflammation ou d'émission de vapeurs inflammables.
- Notez la température à laquelle l'échantillon de biodiesel émet suffisamment de vapeurs pour former un mélange inflammable avec l'air près de sa surface. Cette température est le point d'éclair.

Après avoir suivi ces méthodes, nous avons trouvé le point d'éclair qui est de 174°C



Figure II.6 : appareille de point d'éclair.

Chapitre III

Résulta et discussion

III.1 Optimisation du rendement en biodiesel :

Nous avons réalisé une série de réactions d'estérification afin de déterminer les conditions permettant d'obtenir le rendement le plus élevé en biocarburant. Les conditions étaient une température de 60°C et une quantité de NaOH de 0,01 g, avec des variations dans le temps de réaction comme suit :

- $t_1 = 20 \text{ min}$
- $t_2 = 40 \text{ min}$
- $t_3 = 1 \text{ h}$
- $t_4 = 1 \text{ h et } 20 \text{ min}$
- $t_5 = 1 \text{ h et } 40 \text{ min}$
- $t_6 = 2 \text{ h}$
- $t_7 = 2 \text{ h et } 20 \text{ min}$
- $t_8 = 2 \text{ h et } 40 \text{ min}$

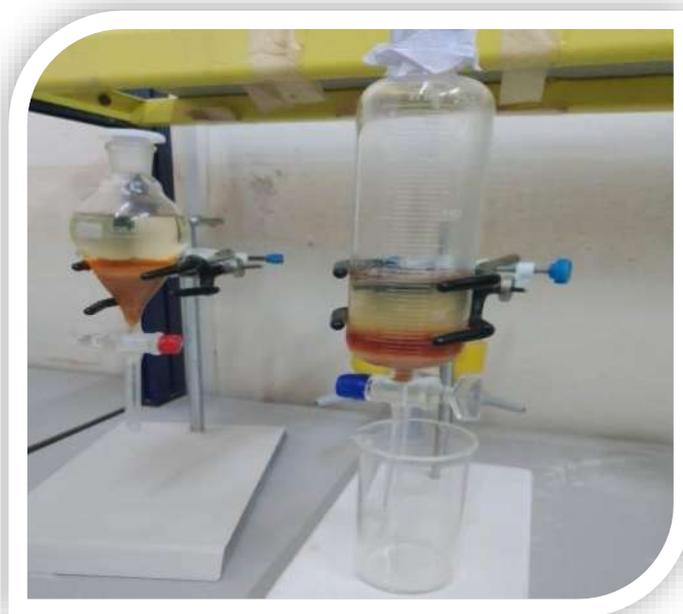
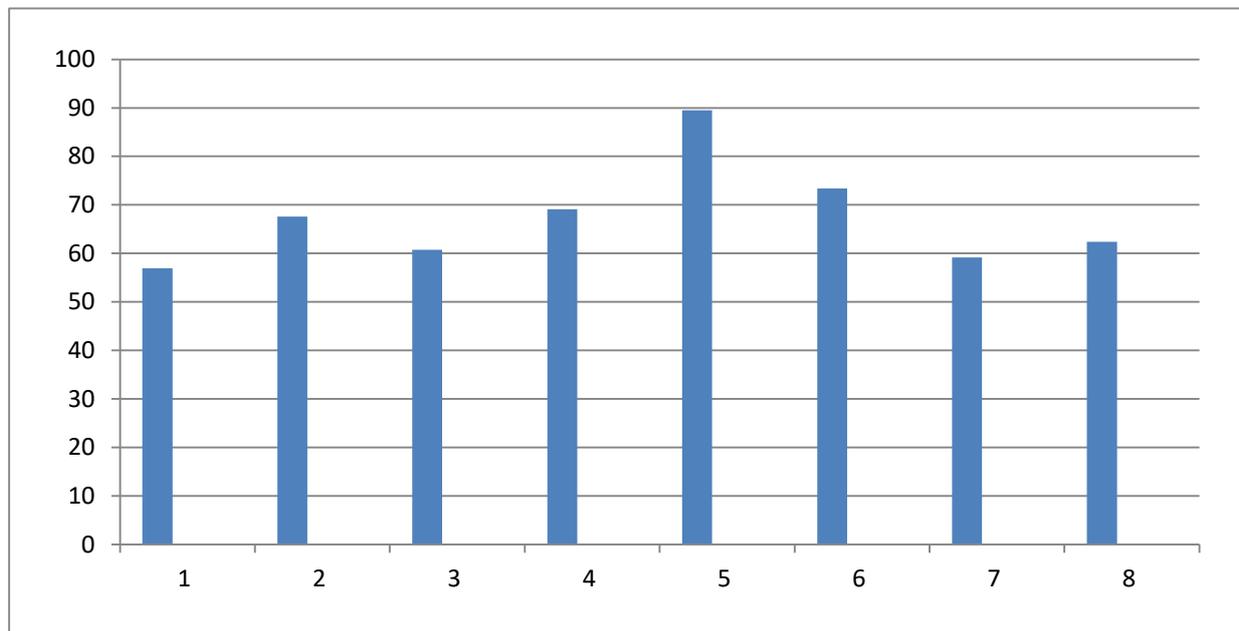


Figure III.1 : Décantation du biodiesel et l'apparition de la phase aqueuse saponifiable.

III.2 Influence du temps sur le rendement de la réaction de transestérification :

Rendement



Durée de la réaction

Figure III.2 : Évolution du rendement de biodiesel en fonction du temps

Le rendement maximum en biocarburant a été obtenu avec une masse de 89,51 g, correspondant à un rendement maximum d'environ 89,51%. Le rendement minimum a été obtenu avec un taux de 56,93% pour une durée de réaction de 20 minutes. Nous avons remarqué que plus la durée de réaction était courte, plus la production de biocarburant était faible.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Durée de la réaction	20min	40 min	1h	1h+20min	1h+40min	2h	2h+20min	2h+40min
Rendement (%)	56 ,93	67,6	60,72	69,08	89,51	73,40	59, 17	62 , 38

Tableau III.1 : Résultat de production de biodiesel en fonction du ratio massique.

Conclusion Générale

Il est possible de dire que les os de chameau, qui étaient censés être jetés comme des déchets, sont devenus une source d'énergie moderne. Nous avons extrait de la graisse des os de chameau, puis nous avons effectué une réaction d'estérification en ajoutant du méthanol et de l'hydroxyde de sodium. La masse maximale que nous avons obtenue était de 73.39 g à une température de 60°C et une durée de réaction d'environ une heure et quarante minutes, correspondant à un rendement d'environ 89,51%.

En effet, les os de chameau peuvent être considérés comme une source d'énergie qui doit être exploitée plutôt que gaspillée ou jetée. Les résultats de l'extraction de la graisse et de la réaction d'estérification montrent que les os de chameau peuvent être utilisés comme une matière première pour la production de biocarburants, contribuant ainsi à la transition vers des sources d'énergie plus durables et renouvelables.

Référence

- (1) Association française des carburants (2017). Biocarburants : définitions, enjeux et perspectives. Récupéré de : <http://www.afcarburants.com/ressources-publications/les-biocarburants/biocarburants-definitions-enjeux-et-perspectives>
- (2) Union européenne (2020). Biocarburants durables : Fiche d'information. Récupéré de : https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/biofuels/sustainability_fr
- (3) Agence internationale de l'énergie (2019). Le panorama des énergies renouvelables : Biocarburants. Récupéré de : <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/bioenergy/biofuels>
- (4) International Energy Agency (IEA). (2019). Renewables 2019: Analysis and forecast to 2024. Récupéré de : <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/bioenergy/biofuels>
- (5) Chizzolini, R., Zanardi, E., & Dorigoni, V. (1999). Fatty acid composition and fat deposition in ten muscles of Italian Simmental and Holstein bulls fed high or low silage diets. *Meat Science*, 52(1), 63-69.
- (6) Al-Owaimer, A. N., Suliman, G. I., & Al-Marzouqi, A. H. (2009). Fatty acid composition of fat depots in some camel (*Camelus dromedarius*) cuts. *Meat science*, 83(2), 299-303
- (7) Adomako, D. (1977). Fatty acid composition and characteristics of *Pentadesmabutyraceafat* extracted from Ghana seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 28, 384-386.
- (8) Biodiesel Production and Analysis" - Manuel J. Taherzadeh and Tobias O. Eichler, Springer Science & Business Media, 2012.
- (9) Diesel Engine Reference Book" - Bernard Challen, Rodica Baranescu, Elsevier Science, 1999
- (10) Biodiesel Production and Properties" - H. Pradhan, M. M. Naik, and L. Wu, Springer, 2008.
- (11) Biodiesel Production and Analysis" - Manuel J. Taherzadeh and Tobias O. Eichler, Springer Science & Business Media, 2012.

- (12) Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines" - Ayhan Demirbas, Springer Science & Business Media, 2007.
- (13) Knoth, G. (2005). "Comparative tests of lubricity additives for biodiesel." Sixth International Conference on Stability and Handling of Liquid Fuels, Lyon, France.
- (14) Freedman, B., Butterfield, R. O., & Pryde, E. H. (1986). "Transesterification kinetics of soybean oil." *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 63(10), 1375-1380.
- (15) BALLERINI, D et ALAZARD-TOUX, N, les Biocarburants, Etats de lieux, Perspectives et enjeux du développement. Institut Français du Pétrole (IFP). France. Technip, 2006.
- (16) Canakci, M., & Van Gerpen, J. (2001). Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1429-1436.
- (17) Rashid, U., Anwar, F., & Ashraf, M. (2008). Production of biodiesel through optimized alkaline catalyzed transesterification of rapeseed oil. *Fuel*, 87(3), 265-273.
- (18) Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of bioscience and bioengineering*, 92(5), 405-416.
- (19) Marchetti, J. M., Errazu, A. F., & Quiroga, M. E. (2008). Biodiesel: an overview. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 19(6), 1002-1010.
- (20) Richard, R. (2011). Catalyse hétérogène pour la production de biodiesel: Étude comparative de différents catalyseurs et optimisation de la synthèse par des plans d'expériences (Thèse de doctorat, Université de Bretagne-Sud).
- (21) Freedman, B.; Pryde, E.H. & Mounts, T.L. Variables affecting the yield of fatty esters from transesterified vegetable oils. *Journal of the American Oil Chemists Society*, Vol. 61 (1984), pp. 1638–1643, ISSN 1558-9331.
- (22) La production de biodiesel à partir de cultures oléagineuses, Publication no EVC 031 Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2008.

(23) Agarwal, A.K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 233-271.