



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

العلمي والبحث العالي التعليم وزارة

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE – ANNABA

Département Génie des Procédés et Energétique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ÉTAT

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par :

Rayane LAYADI

Meroua DEROUICHE

VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES DÉCHETS DE MARC DE CAFÉ PAR PRODUCTION DU BIODIESEL

Encadré par :

Dr. Aicha TOUHAMI

Dr. Nawel NEDJAH

ENSTI Annaba

Membres du jury :

MCB. Nassima MALLEM	Président	ENSTI
MCB. Sara CHAOUCHI	Examinateur	ENSTI
MCA. Adel DJELLAL	Examinateur	ENSTI
MCA. Azzedine DEKHANE	Examinateur	ENSTI
Dr. Abdelkarim ATTEK	Invité	FERTIAL Annaba

Année 2024

Remerciements

À Dieu le Tout-Puissant, qui nous a guidé tout au long de ce parcours académique et nous a donné la force et la persévérance nécessaire pour mener à bien ce travail.

Un immense merci à nos encadrantes Dr. Fouhami Aicha, Dr. Nedjah Nawel ainsi qu'à Dr. Nessail Mounir pour leur dévouement sans faille. Leur engagement total dans ce projet a été une source d'inspiration et de motivation pour nous. Leurs conseils avisés, leur expertise et leur soutien constant ont été des atouts précieux qui ont contribué au succès de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers les membres du jury pour leur acceptation enthousiaste d'examiner notre travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement l'équipe des ingénieurs de laboratoire, M^{me} Fahima, M^r Ramzi et M^r Walid, pour avoir créé les conditions propices à notre travail en nous offrant un environnement confortable et adapté.

Nos remerciements vont également à M^{me} Wafa Zibouche et à M^r Fateh Bouchama, chef service du laboratoire d'analyse de RA2K ainsi qu'au Dr. Ilyes Layadi, médecin microbiologiste à la clinique Abu-Al-Qassim et au personnel du CHU Constantine service de toxicologie pour leur contribution précieuse qui a grandement enrichi notre travail.

Nous remercions vivement nos collègues d'études et à toute l'équipe pédagogique de la spécialité de génie chimique, aux professeurs et aux intervenants, pour leurs enseignements de qualité, leur soutien constant et leur contribution précieuse à notre formation.

Dédicace

*To my exceptional , most encouraging and loving parents, AbdelAziz and
Wassila*

*To my amazing fun-loving siblings Ilyes and Romayssa, my siblings in law
Samah and Racine and my little and sweetest nieces Maria and Meriem,
my bundle of joy.*

*To Amani, Riyadh who gave me all the pushes I needed and to all my
dearest friends (mes friandises) Nada, Hanane, Wissal and Hafsia and
most and for all, the kindest partner of them all, Maroua <3 I am so grateful
to god for giving me all of you to share all these years with .*

Rayane.

Dédicace

C'est avec un immense plaisir que je dédie ce travail à :

À mes chères parents Mokhtar et Nadia : Vous êtes mes modèles, mes héros, et je vous dois tout. Que ce moment soit une modeste reconnaissance pour tout ce que vous avez fait pour moi

À mon frère Amjed, tu as été plus qu'un frère ; tu as été mon pilier et mon guide

À mon petit frère Adem , ma source de joie

À mes sœurs Passmine et Romaisa : Vous voir réussir est l'un de mes plus grands souhaits,. Vous méritez tout le bien que la vie peut offrir

À mes amies : Khaoula , Lamiss , Nessrine, Afien , Sofia

Notre amitié a traversé les années et les épreuves. Merci pour votre soutien et votre présence depuis toute ces années

À ma deuxième famille : Rayane, Hafssa, Nada, Wissal, Hanane. Je suis infiniment reconnaissante pour ces moments partagés qui ont enrichi ma vie de manière que je ne pourrai jamais assez exprimer en mots

À mes collègues d'études (l'équipe G Z 2021/2024)

À ma grande famille

À cette personne spéciale, dont la sagesse et le soutien indéfectible m'inspirent chaque jour.

Meroua.

Résumé

Le café, consommé à grande échelle, génère d'importantes quantités de marc de café, souvent considéré comme un déchet polluant. Cependant, le marc de café offre un potentiel prometteur en tant que ressource énergétique alternative.

Cette étude se concentre sur la transformation du marc de café en biodiesel par transestérification, offrant ainsi une solution durable pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles tout en gérant de manière écologique les déchets issus de l'industrie du café. Deux approches ont été utilisées : une méthode indirecte et une méthode directe. La méthode directe, qui combine l'extraction et la transestérification en une seule étape, simplifie le processus et pourrait s'avérer plus efficace.

Des analyses approfondies ont été réalisées pour évaluer la qualité du biodiesel produit, en examinant les caractéristiques physico-chimiques et énergétiques. La comparaison des résultats a révélé des différences significatives en termes de rendement et de qualité, essentielles pour évaluer l'efficacité et la viabilité des deux méthodes de production de biodiesel à partir de marc de café.

Mots clés : Marc de café, Gestion des déchets, Biodiesel, Transestérification, Énergie renouvelable.

Abstract

Coffee, consumed on a large scale, generates significant amounts of spent coffee grounds, often considered a polluting waste. However, spent coffee grounds offer promising potential as an alternative energy resource.

This study focuses on transforming coffee grounds into biodiesel through transesterification, providing a sustainable solution to reduce dependence on fossil fuels while ecologically managing coffee industry waste. Two approaches were utilized: an indirect method and a direct method. The direct method, which integrates extraction and transesterification in a single step, simplifies the process and may prove more efficient.

In-depth analyses were conducted to evaluate the quality of the biodiesel produced, examining physicochemical and energetic characteristics. The comparison of results revealed significant differences in terms of yield and quality, essential for assessing the efficiency and viability of the two methods for producing biodiesel from coffee grounds.

Key words: Coffee grounds, Waste management, Biodiesel, Transesterification, Renewable energy.

ملخص

تستهلك القهوة على نطاق واسع، مما يولد كميات كبيرة من تفل القهوة التي تعتبر غالبًا نفايات ملوثة. ومع ذلك، تقدم تفل القهوة إمكانيات واعدة كمصدر بديل للطاقة.

ركزت هذه الدراسة على تحويل تفل القهوة إلى ديزل حيوي عن طريق عملية التبادل الأستري، مما يوفر حلاً مستدامًا لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وإدارة نفايات صناعة القهوة بطريقة بيئية. تم استخدام نهجين: طريقة غير مباشرة وطريقة مباشرة. الطريقة المباشرة، التي تدمج الاستخراج والأسترة في خطوة واحدة، تبسط العملية وقد تكون أكثر كفاءة. تم إجراء تحليلات معمقة لتقييم جودة الوقود الحيوي المنتج، من خلال فحص الخصائص الفيزيائية والكيميائية والطاقوية. كشفت مقارنة النتائج عن اختلافات كبيرة من حيث العائد والجودة، مما يعد أساسيًا لتقييم كفاءة وصلاحية الطريقتين لإنتاج الوقود الحيوي من تفل القهوة.

الكلمات المفتاحية: بقايا القهوة، إدارة النفايات، البيوديزل، الأسترة التبادلية، الطاقة المتجددة.

Liste d'abréviation

<u>Abréviation</u>	<u>Signification</u>
ASTM	American Society for Testing and Materials
HCL	Acide chlorhydrique
HMC	Huile de marc de café
IA	Indice d'acide
IE	Indice d'esters
IR	Infrarouge
IS	Indice de saponification
KOH	Hydroxyde de potassium
MC	Marc de café
n	Indice de réfraction
PFD	Diagramme de Flux de Procédé
TMS	Teneur en matière sèche

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Comparaison entre le diesel et le biodiesel.....	5
Tableau II.2 : les différentes propriétés du biodiesel.....	7
Tableau III.1 : Les propriétés chimiques des produits utilisés lors de l'extraction du HMC..	10
Tableau III.2 : les propriétés chimiques des produits utilisés lors de la réaction de transestérification de l'HMC.....	11
Tableau IV.4 : Comparaison des méthodes directe et indirecte déduites de notre étude.....	27

Liste des figures

Figure II.1: Réaction de transestérification d'un triglycéride.....	6
Figure III.1 : Le marc de café avant et après séchage.....	8
Figure III.2 : L'échantillon de MC dans l'étuve à 40°C.....	9
Figure III.3 : Extraction par décoction (A : Représentation schématique ; B : Montage de l'appareil au laboratoire).....	10
Figure III.4 : L'étape de la réaction de transestérification.....	11
Figure III.5 : L'étape de la décantation du glycérol.....	12
Figure III.6 : L'étape du lavage et purification du biodiesel (A : après lavage ; B : récupération du biodiesel).....	12
Figure III.7 : Les étapes de la réaction de transestérification directe, filtration et évaporation dans le rotavapeur.....	13
Figure III.8 : Les étapes de la décantation et filtration finale avant récupération du biodiesel...	14
Figure III.9 : Le réfractomètre.....	14
Figure III.10 : Le viscosimètre automatique d445 de la raffinerie.....	15
Figure III.11 : Densimètre digital ASTM d4052 de la raffinerie.....	16
Figure III.12 : Colorimètre ASTM d4052 de la raffinerie.....	16
Figure IV.1 : L'indice de réfraction du biodiesel.....	20
Figure IV.2 : Test d'inflammabilité du biodiesel extrait du marc de café.....	21
Figure IV.3 : L'échelle de la couleur ASTM D 1500.....	22
Figure IV.4 : La solution avant et après titrage avec le KOH pour le calcul d'IA.....	23
Figure IV.5 : La solution avant et après titrage avec HCL pour le calcul de l'IS.....	23
Figure IV.6 : <i>Le PFD de la méthode indirecte réalisé avec HYSIS</i>	25
Figure IV.7 : <i>Le PFD de la méthode directe réalisé avec HYSIS</i>	26

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Description de l'entreprise du stage, motivation et problématique	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Présentation de l'Entreprise RAIK	3
I.3 Motivation du Stage.....	3
I.4 Problématiques et Objectifs du Stage.....	4
I.5 Lien avec le Mémoire de master.....	4
Chapitre II : Etat de l'art et recherche bibliographique	
II.1 Définition du diesel	5
II.2 Origine du marc de café	5
II.3 Comparaison entre le diesel et le biodiesel	5
II.4 La réaction de transestérification	6
II.5 Les propriétés du biodiesel de marc de café.....	7
III.1 Préparation du marc de café	8
III.2 Calcul de la teneur en matière sèche du MC	8
III.3 Production du biodiesel par la méthode indirecte	9
III.3.1 Extraction de l'HMC par décoction	9
a. Principe	9
b. Matériels et équipements.....	9
c. Propriétés chimiques des produits utilisés	10
d. Mode opératoire	10
III.3.2. Le procédé de la réaction de transestérification de l'HMC.....	10

a. Matériel utilisé.....	10
b. Propriétés chimiques des produits utilisés.....	11
c. Mode opératoire.....	11
III.4 Production du biodiesel par la méthode directe.....	13
a. Principe.....	13
b. Matériels et équipements.....	13
c. Les propriétés chimiques des produits utilisées.....	13
d. Mode opératoire.....	13
III.5. Calcul du rendement du biodiesel pour les deux méthodes de transestérification.....	14
III.6. Les analyses physico-chimiques du biodiesel produit.....	14
III.6.1. L'indice de réfraction (n).....	14
III.6.2. Test d'inflammabilité.....	15
III.6.3. Viscosité Cinématique.....	15
III.6.4. Densité.....	15
III.6.5. La couleur ASTM.....	16
III.6.6. Indice d'acide.....	16
III.6.7. Indice de saponification.....	17

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 La teneur en matière sèche.....	19
IV.2 Le rendement des deux différentes méthodes de production de biodiesel.....	19
IV.3 Indice de réfraction	20
IV.4 Test d'inflammabilité.....	20
IV.5 Viscosité cinématique.....	21
IV.6 La densité.....	21
IV.7 La couleur ASTM.....	22

IV.8 Indice d'acide.....	22
IV.9 Indice de saponification.....	23
IV.10 Indice d'ester.....	24
IV.11 Diagramme de Flux de Procédé (PFD) des deux méthode.....	24
Conclusion générale.....	28
Références bibliographiques.....	29

Introduction générale

Récemment, l'augmentation spectaculaire de la consommation de combustibles fossiles dans le secteur industriel, le secteur des transports et les développements technologiques ont conduit à l'épuisement des réserves de combustibles fossiles dans le monde entier. Pour cette raison, les chercheurs ont accordé une plus grande attention à la recherche d'énergies alternatives, telles que le biodiesel, dont on pense qu'il peut réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles et contribuer à la durabilité environnementale.[1]

Le café est l'une des boissons les plus consommées au monde ; sa consommation a été estimée à 9,3 millions de tonnes en 2017. Cette énorme consommation de café génère environ 6 millions de tonnes de marc de café usagé chaque année.[2]

Le marc de café est considéré comme un déchet solide généré par les consommateurs de café moulu. Il est le résidu insoluble ou le reste du café après la déshydratation, la mouture et l'infusion des grains de café dans l'eau. Ce dernier, pose un problème de gestion des déchets en raison de son volume important et de son impact sur l'environnement car sa nature est très polluante : il contient de la caféine, des tanins et des polyphénols.[3], [4]

Cependant, le marc de café peut être valorisé en tant que ressource précieuse pour produire l'énergie, s'alignant sur le concept d'économie circulaire et soulignant l'importance d'explorer des approches innovantes pour gérer les déchets de manière durable. La valorisation du marc de café usagé en tant que combustible est une application récente dans ce cadre. L'augmentation rapide des publications scientifiques après 2010 [5], [6], [7] témoigne sur l'intérêt croissant pour cette solution dans la gestion durable des déchets.

Évoluer vers un modèle d'économie circulaire permettrait non seulement de diminuer la dépendance aux combustibles fossiles, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de servir de carburant propre pour diverses utilisations allant des transports à l'industrie, offrant ainsi une alternative durable aux carburants traditionnels, mais aussi de créer un système industriel régénérateur et réparateur. Ce modèle intégrerait la hiérarchie des déchets, la réflexion sur le cycle de vie et les principes du zéro déchet, créant ainsi un système autonome avec un flux d'énergie et de matière en boucle fermée.[8]

L'objectif principal de cette étude est d'explorer la possibilité de la valorisation énergétique du marc de café, en se concentrant particulièrement sur la production de biodiesel à partir de ce substrat. Pour ce faire, nous nous sommes fixé plusieurs objectifs spécifiques :

- 1- **Évaluation des techniques de production de biodiesel** : Nous allons examiner deux différentes méthodes pour la production du biodiesel, en analysant les performances de chaque approche.

- 2- **Analyse des propriétés du biodiesel obtenu** : Nous allons étudier les caractéristiques physico-chimiques et énergétiques du biodiesel produit à partir du marc de café, en évaluant sa qualité et sa conformité aux normes en vigueur.

D'une manière générale, ce mémoire est subdivisé en quatre grandes parties : à la première partie, nous décrivons notre stage à la raffinerie de Sonatrach Skikda, où nous avons observé les processus de production et les analyses des coupes pétrolières, inspirant notre choix de valoriser énergétiquement les déchets de marc de café en biodiesel. une deuxième partie théorique qui couvre les notions essentielles sur le diesel, le biodiesel et la réaction de transestérification. Une troisième récapitulant les méthodes et expérimentations référencées utilisées pour la réalisation de notre projet. Les différents résultats obtenus sont présentés et discutés séparément dans une quatrième partie suivie d'une conclusion et d'une réflexion sur les perspectives et les défis à relever dans ce domaine.

Chapitre I : Description de l'entreprise du stage, motivation et problématique

I.1. Introduction

Pour notre projet de fin d'études en génie chimique, nous avons eu l'opportunité d'effectuer notre stage de fin d'études à **la raffinerie Sonatrach de Skikda**. Même si notre thème de mémoire porte sur la valorisation énergétique des déchets de marc de café par production de biodiesel, notre stage a offert une expérience précieuse dans le domaine des procédés de raffinage et des analyses physico-chimiques, compétences essentielles pour notre projet.

I.2. Présentation de l'Entreprise RA1K

Sonatrach est la principale entreprise pétrolière et gazière en Algérie, jouant un rôle crucial dans l'économie du pays. Le complexe de raffinage de pétrole de Skikda (RA.1K) est le plus grand d'Afrique, transformant le pétrole brut de Hassi Messaoud en produits finis ou semi-finis pour divers marchés. Situé dans la zone industrielle de Skikda sur une superficie de 250 hectares, le complexe dispose d'une capacité de traitement de 16,5 millions de tonnes par an et emploie environ 1 300 personnes.

I.3. Motivation du Stage

L'industrie pétrolière est essentielle dans le monde moderne. Pour une étudiante en génie chimique, comprendre le secteur de la production pétrolière et des analyses physico-chimiques est vital pour aborder des projets de valorisation énergétique et de production de biocarburants. Le stage chez Sonatrach nous a permis d'acquérir des compétences pratiques et une compréhension approfondie des procédés industriels, compétences nécessaires pour notre projet de mémoire.

I.4. Problématiques et Objectifs du Stage

Les problématiques abordées durant notre stage chez Sonatrach incluaient l'optimisation des procédés de raffinage et le renforcement des contrôles qualité pour garantir l'efficacité et la sécurité des produits pétroliers. Les objectifs spécifiques comprenaient :

- Analyse physico-chimique : Évaluation des caractéristiques des coupes pétrolières, incluant les propriétés chimiques, physiques et énergétiques.
- Suivi des procédés de fabrication : Apprentissage des processus de production depuis la matière première jusqu'au produit fini, incluant les techniques de contrôle qualité.

I.5. Lien avec le Mémoire d'ingéniorat

Notre thème de mémoire concerne la valorisation énergétique des déchets de marc de café par production de biodiesel. Les compétences et les connaissances acquises durant notre stage chez Sonatrach ont été inestimables. La rigueur scientifique et les techniques analytiques apprises ont été directement appliquées dans notre projet. En particulier, les analyses physico-chimiques des coupes pétrolières ont servi de référence pour les analyses similaires sur le biodiesel produit à partir du marc de café. La formation reçue dans l'industrie pétrolière a renforcé notre capacité à évaluer et à optimiser les procédés de production de biocarburants. De plus, nous avons pu effectuer certaines analyses de notre biodiesel dans les laboratoires de Sonatrach, utilisant leurs équipements avancés pour obtenir des résultats précis.

Chapitre II : État de l'art et recherche bibliographique

II.1. Définition du diesel

Le carburant diesel est un mélange complexe d'hydrocarbures (saturés, insaturés et aromatiques) obtenu par distillation du pétrole brut à des températures et des pressions spécifiques. C'est un type de carburant couramment utilisé dans les moteurs à allumage par compression, tels que les moteurs diesel, où le carburant et l'air sont mélangés à l'intérieur du moteur et où l'air est fortement comprimé dans la chambre de combustion, ce qui entraîne une inflammation spontanée du carburant diesel lors de l'injection en raison des températures élevées, convertissant l'énergie chimique en force mécanique.[9]

II.2. Définition du biodiesel

Le biodiesel est un carburant renouvelable composé principalement d'esters monoalkyliques d'acides gras. Il est produit à partir de sources biologiques telles que les huiles végétales, les graisses animales et les huiles de cuisson recyclées. Il est principalement utilisé pour remplacer le diesel pétrolier souvent pur (B100) ou en mélange avec le diesel traditionnel (par exemple, B20, qui contient 20 % de biodiesel et 80 % de diesel pétrolier). [10]

II.3. Comparaison entre le diesel et le biodiesel

Le diesel et le biodiesel sont deux carburants utilisés dans les moteurs à combustion interne, mais ils présentent des caractéristiques et des impacts environnementaux très différents. Le tableau ci-dessous présente une comparaison détaillée de ces derniers :

Tableau II.1 : Comparaison entre le diesel et le biodiesel [10], [11], [12], [13]

Caractéristique	Diesel	Biodiesel
Source	Fossile (pétrole)	Renouvelable (huiles végétales, graisses animales)
Composition chimique	Hydrocarbures (alcanes, cycloalcanes, aromatiques)	Esters méthyliques d'acides gras
Émission de CO ₂	Élevées (contribue aux gaz à effet de serre)	Réduites (bilan CO ₂ neutre sur le cycle de vie)
Émission des particules fines	Élevées (particules, NO _x)	Réduites (moins de particules et de NO _x)
Propriétés de combustion	Bonne combustion mais production de suies et de soufre	Combustion plus propre, moins de soufre
Coût de production	Relativement bas, fluctue avec le prix du pétrole	Plus élevé, dépend des matières premières et des procédés de production
Compatibilité motrice	Compatibilité totale avec les moteurs diesel	Nécessite des ajustements dans certains moteurs
Impact environnemental	Négatif (pollution de l'air, contribution au réchauffement climatique)	Positif (réduction des émissions, utilisation de déchets et de ressources renouvelables)

II.4. La réaction de transestérification

Le processus de production de biodiesel repose sur la réaction de transestérification des huiles avec de l'alcool qui se déroule en trois étapes successives : d'abord, les triglycérides sont convertis en diglycérides, ensuite en monoglycérides, et enfin en esters (biodiesel) et glycérol comme sous-produit. Chaque mole de triglycéride produit trois moles d'ester monoalkylique d'acide gras et une mole de glycérol.

Différents types d'alcools, comme le méthanol, l'éthanol, le propanol et le butanol, peuvent être utilisés dans ce processus. Cette réaction peut être effectuée sans catalyseur, mais ce procédé est généralement lent et nécessite des conditions de haute pression et de haute température.

Pour améliorer la vitesse et le rendement de la réaction, on utilise des catalyseurs, qui peuvent être classés en trois catégories principales : homogènes, hétérogènes et biocatalyseurs. La transestérification est influencée par plusieurs paramètres critiques, tels que la température, la durée de la réaction, la teneur en acides gras libres et en eau dans l'huile, le type et la quantité de catalyseur, le rapport molaire entre l'alcool et l'huile, l'utilisation de co-solvants, et l'intensité du mélange. [14]

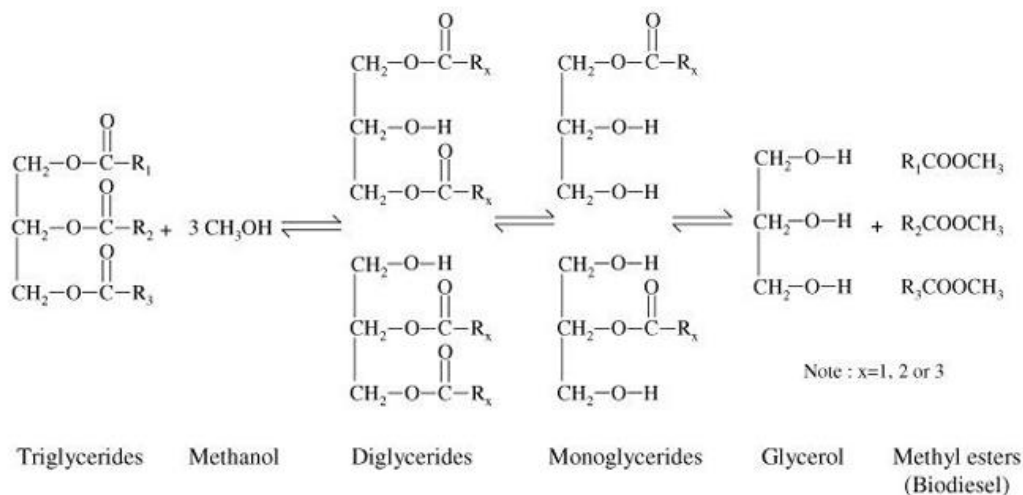


Figure II.1: Réaction de transestérification d'un triglycéride [14]

II.5. Les propriétés du biodiesel de marc de café

Le biodiesel obtenu par transestérification de l'huile de marc de café présente des propriétés physico-chimiques spécifiques. Le tableau ci-dessous les décrit et les compare aux standards ASTM D6751 et EN14214.S

Tableau II.2 : les différentes propriétés du biodiesel[15], [16]

Propriété	Unité	Biodiesel de marc de café	Diesel	ASTM D6751	EN14214
Viscosité cinématique à 40°C	mm ² /s	5,16	3,23	1,9-6	3,5-5
Densité à 15 °C	kg/m ³	895,0	827,2	-	860-900
Pouvoir calorifique	MJ/kg	39,67	45,30	-	-
Stabilité à l'oxydation	h	4	-	3 min	6 min
Indice d'acide	mgKOH/g	0,54	-	0,05 max	0,5 max
Indice d'iode	-	85,89	-	-	120 max
Indice de saponification	-	209,54	-	-	-
Point d'éclair	°C	192,0	68,5	130 min	101 min
Point d'écoulement	°C	14	0	-	-
Point de trouble	°C	13	8	-	-
CFPP	°C	7	5	-	-
Indice de cétane	-	53	48	47min	51 min
Couleur	-	Brun foncé	-	-	-
Aspect	-	Liquide	-	-	-
Teneur en eau	ppm	2,708	-	-	500 max
Teneur en ester méthylique	% massique	86	-	-	96.5 min

Chapitre III : Solutions proposées et expérimentations menées

Objectifs :

La partie expérimentale de cette étude se concentre sur la mise en œuvre de deux méthodes distinctes de transestérification pour produire du biodiesel à partir de l'huile de marc de café. En s'appuyant sur les concepts théoriques précédemment abordés, cette section vise à détailler les procédés pratiques et les analyses réalisés pour atteindre nos objectifs.

Les principaux objectifs de cette partie expérimentale sont les suivants :

- Évaluer les techniques de production de biodiesel à partir de marc de café.
- Étudier les propriétés physico-chimiques du biodiesel produit.

Cette partie expérimentale apporte donc une dimension pratique à la recherche, permettant de valider l'approche théorique et de proposer des solutions concrètes pour convertir le marc de café en biodiesel.

III.1. Préparation du marc de café

Nous avons récupéré environ 2 kg de marc de café, en prélevant une partie de notre domicile (Aroma et Famico) et le reste du foyer de la cité universitaire « 2000 lits – Chlef Sidi Ammar ». Les échantillons ont été collectés après leur utilisation dans les machines à café et ont été stockés dans des récipients. Ils ont ensuite été séchés à l'air libre pendant 48h dans un endroit sec à température ambiante et loin des rayons de soleil. Une fois séché, le marc est stocké dans l'obscurité à température ambiante.

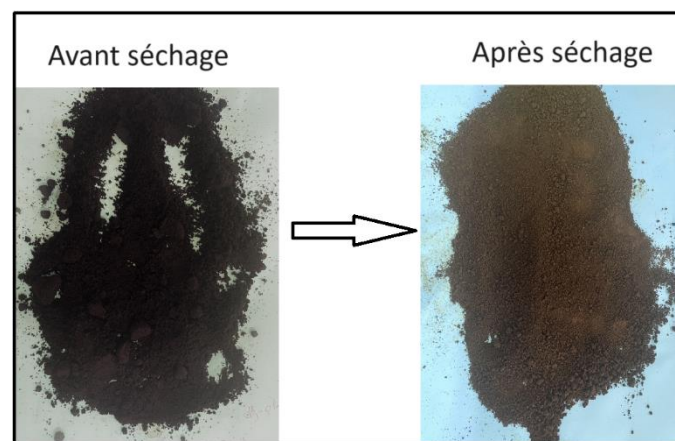


Figure III.1 : Le marc de café avant et après séchage

III.2. Calcul de la teneur en matière sèche du MC :

La matière sèche est la fraction de la matière totale d'un échantillon qui reste après l'élimination de toute l'eau qu'il contient. Pour analyser la matière sèche du marc de café, on

pèse un récipient propre et sec, puis on y ajoute 5g de MC et on pèse à nouveau. On place ensuite le récipient avec le marc de café dans une étuve à environ 80°C pendant 24 heures. Après séchage, on laisse refroidir le récipient, puis on le pèse à nouveau. La masse de l'échantillon sec est la différence entre la masse finale et celle du récipient vide. On calcule la teneur en matière sèche ainsi :

$$TMS(\%) = \frac{m_{sèche}}{m_{humide}} \times 100$$

TMS(%) : le pourcentage de la teneur en matière sèche

m_{sèche} : masse sèche du MC (g) ; **m_{humide}** : masse humide du MC (g)



Figure III.2 : L'échantillon de MC dans l'étuve à 40°C.

III.3. Production du biodiesel par la méthode indirecte

III.3.1. Extraction de l'HMC par décoction

a. Principe

C'est une méthode d'extraction qui se fait par chauffage à reflux où la matrice végétale est immergée dans un solvant porté à ébullition réservée aux principes actifs non thermolabiles. Cette technique, rapide et parfois indispensable, consiste à chauffer un mélange de poudre végétale et de solvant dans un ballon surmonté d'un réfrigérant. Après ébullition, le mélange est filtré pour récupérer le solvant enrichi en substances solubles, puis une distillation au rotavapeur permet d'obtenir la fraction désirée.[17]

b. Matériels et équipements

- Montage de chauffage à reflux : ballon, chauffe-ballon, réfrigérant à boules ;
- Matériel de filtration : papier filtre, entonnoir, ballon ;
- Evaporateur rotatif (rotavapeur).

c. Propriétés chimiques des produits utilisés

Tableau III.1 : Les propriétés chimiques des produits utilisés lors de l'extraction du HMC

Produits	formule	Masse molaire (g/mol)	Densité à 20°C (g/cm ³)	Pureté (%)
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84,16	0.779	99
Marc de café			-	

d. Mode opératoire

15 g de MC sont ajoutés à 375 ml de cyclohexane dans le ballon, le mélange est porté à ébullition pendant 1 heure. Après l'extraction, le tout est filtré à travers un papier filtre pour séparer l'extrait du résidu solide. Enfin à l'aide d'un rotavapeur on obtient l'huile pure de marc de café, tout en récupérant le solvant pur.

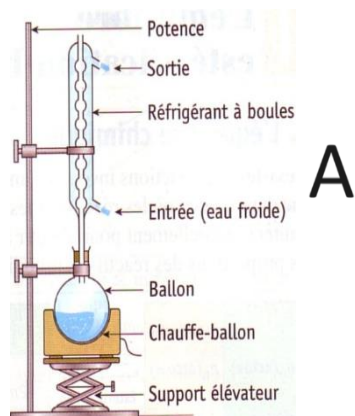


Figure III.3 : Extraction par décoction (A : Représentation schématique ; B : Montage de l'appareil au laboratoire)

Le rendement de cette huile est calculé par la formule suivante :

$$R_1(\%) = \frac{m_{\text{extraite}}}{m_{\text{MC}}} \times 100$$

- $R_1(\%)$: le pourcentage du rendement de l'extraction
- m_{extraite} : la masse extraite de l'HMC (g) ;
- m_{MC} : masse initiale du MC (g).

III.3.2. Le procédé de la réaction de transestérification de l'HMC

a. Matériel utilisé

- Montage de chauffage à reflux : Ballon bicol, agitateur magnétique chauffant, bain marie, réfrigérant à boules, thermomètre, barreau magnétique.
- Ampoule à décanter, bécher

b. Propriétés chimiques des produits utilisés

Tableau III.2 : les propriétés chimiques des produits utilisés lors de la réaction de transestérification de l'HMC

Produits	Formule	Masse molaire (g/mol)	Densité (g/cm ³)	Pureté (%)
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	46,08	0,789	98
hydroxyde de sodium	NaOH	40	2,13	99
Eau distillé	H ₂ O	18	1	100
HMC	-	-	0.823	100

c. Mode opératoire

➤ **La réaction de transestérification:**

L'HMC subit un processus de transestérification dans des conditions spécifiques. La réaction a été réalisée à environ 75°C pendant 2 heures. On a utilisé une quantité précise d'HMC, avec un pourcentage massique d'1% de NaOH comme catalyseur et un ratio huile/éthanol de 1:6 en masse. On a mélangé soigneusement les deux composants avant de les ajouter au HMC. La réaction a été maintenue sous agitation constante pour assurer une bonne homogénéité du mélange, avec un suivi régulier de la température pour garantir des conditions optimales.



Figure III.4 : L'étape de la réaction de transestérification

➤ **Séparation du biodiesel et des sous-produits (glycérol):**

Après la réaction de transestérification, le mélange réactionnel contient principalement du biodiesel et du glycérol, ainsi que des traces de catalyseur et d'alcool résiduel. La séparation de ces composants se fait par décantation et séparation gravimétrique. Une fois la réaction terminée, on transfère le mélange réactionnel dans une ampoule à décanter et on le laisse au repos pendant plusieurs heures (généralement de 8 à 24 heures) pour permettre une séparation complète. Étant donné que le biodiesel et le glycérol ont des densités différentes, ils se séparent naturellement en deux phases

distinctes sous l'influence de la gravité. La phase inférieure, plus dense, constituée de glycérol, est ensuite soigneusement évacuée du fond du décanteur.



Figure III.5 : L'étape de la décantation du glycérol

➤ **Lavage et purification du biodiesel:**

Après la séparation du biodiesel et glycérol par décantation, on élimine les traces du catalyseur, d'alcool, du glycérol ainsi que les savons formés lors de la réaction de transestérification en ajoutant de l'eau chaude à 50°C. Ce processus induit une saponification, où les acides gras libres réagissent avec les ions hydroxyle de l'eau pour former des savons insolubles. Après plusieurs étapes de lavage et décantation, la partie inférieure du récipient est occupée par l'eau chargée d'impuretés, tandis que la partie supérieure plus légère est occupée par le biodiesel. On procède ensuite à leur séparation, suivie d'une filtration du biodiesel avant son stockage.

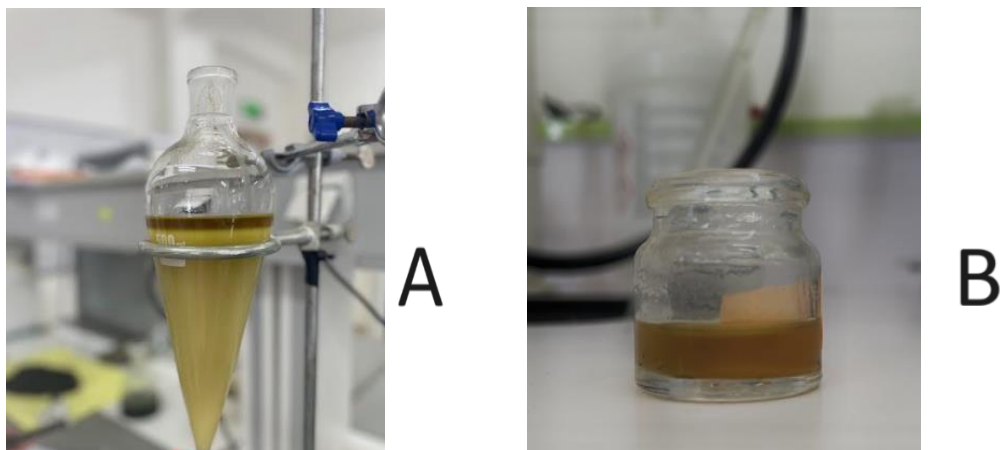


Figure III.6 : L'étape du lavage et purification du biodiesel (A : après lavage ; B : récupération du biodiesel)

III.4. Production du biodiesel par la méthode directe

a. Principe

La méthode directe, ou in situ, de transestérification combine l'extraction de l'huile et la réaction de transestérification en une seule étape et dans un seul réacteur.

b. Matériels et équipements

- Montage de chauffage à reflux : ballon, chauffe-ballon, réfrigérant à boules ;
- Matériel de filtration : papier filtre, entonnoir, ballon ;
- Evaporateur rotatif (rotavapeur).

c. Les propriétés chimiques des produits utilisés

Les propriétés chimiques de ces produits sont cités dans le **tableau II.1** et le **tableau II.2** .

- Marc de café ;
- Ethanol ;
- Hydroxyde de sodium ;
- Cyclohexane.

d. Mode opératoire :

On commence par mélanger 15 g de MC séché avec 0.018g d'NaOH dissout dans 10 mL d'éthanol. Puis on ajoute 375 mL de cyclohexane comme solvant pour l'extraction. Ce mélange est chauffé à une température comprise entre 75-80°C pendant 3 heures, permettant l'extraction de l'huile et sa transestérification simultanées. Une fois la réaction terminée, on filtre le mélange à travers un papier filtre pour éliminer le résidu solide. Le filtrat est ensuite transféré dans un rotavapeur pour évaporer le cyclohexane et l'excès de l'éthanol récupérant ainsi le biodiesel. Enfin le biodiesel est laissé à décanter pour séparer le glycérol. Puis filtré une dernière fois pour éliminer les particules fines et le glycérol résiduel.



Figure III.7 : Les étapes de la réaction de transestérification directe, filtration et évaporation dans le rotavapeur.



Figure III.8 : Les étapes de la décantation et filtration finale avant récupération du biodiesel.

III.5. Calcul du rendement du biodiesel pour les deux méthodes de transestérification

il est calculé par la formule suivante :

$$R_{2.I}(\%), R_{2.D} = \frac{m_{biodiesel}}{m_{HMC}} \times 100$$

$R_{2.I}(\%), R_{2.D}$: Le rendement du biodiesel obtenu par la méthode indirecte et directe respectivement.

$m_{biodiesel}$: la masse produit du biodiesel (g) ;

m_{HMC} : masse de l'HMC extraite (g).

III.6. Les analyses physico-chimiques du biodiesel produit

III.6.1. L'indice de réfraction (n) :

C'est une mesure de la vitesse de la lumière dans une substance par rapport à la vitesse de la lumière dans le vide. Sa valeur indique donc la capacité qu'a une substance à ralentir ou dévier un rayon lumineux. Il est déterminé à l'aide d'un réfractomètre.



Figure III.9 : Le réfractomètre

III.6.2. Test d'inflammabilité

C'est une évaluation visant à déterminer la facilité avec laquelle une substance peut s'enflammer ou brûler. Il est généralement réalisé pour évaluer la sécurité et les risques associés à des matériaux ou des produits. Ce test est crucial dans divers secteurs industriels, notamment pour les carburants, les produits chimiques et les matériaux utilisés dans des environnements où la sécurité incendie est une préoccupation majeure. Ce test a été réalisé en déposant une goutte de biodiesel obtenu à partir de marc de café sur une surface non inflammable. Ensuite, la goutte a été exposée à une flamme pour observer son comportement.

- La liste à puce qui va suivre décrit des analyses qui ont été effectuées à la raffinerie Topping (RA2K) à Sonatrach Skikda .

➤ III.6.3. Viscosité Cinématique

La viscosité cinématique est une mesure de la résistance à l'écoulement d'un liquide sous l'effet de la gravité. Elle a été mesurée à 40°C grâce à un viscosimètre automatique ASTM d445.

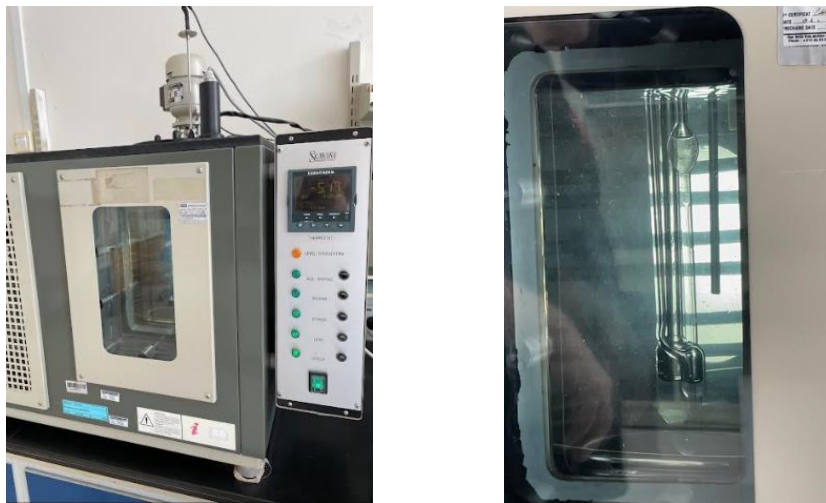


Figure III.10 : Le viscosimètre automatique d445 de la raffinerie.

➤ III.6.4. Densité

C'est une caractéristique physique d'une substance qui exprime la masse contenue dans un volume donné. Elle est mesurée en grammes par millilitre (g/ml) ou kilogrammes par litre (kg/L). Elle a été mesurée avec un densimètre digital pour les produits pétroliers liquides ASTM d4052.



Figure III.11 : Densimètre digital ASTM d4052 de la raffinerie.

➤ III.6.5. La couleur ASTM

La couleur ASTM fait référence à une méthode standard utilisée pour mesurer la couleur des produits pétroliers, en particulier du diesel et du pétrole brut, afin d'évaluer leur qualité et leur consistance. Cette mesure de la couleur est cruciale car les consommateurs associent souvent des couleurs plus foncées à des carburants de moindre qualité [18]. Pour ce faire, nous avons effectué ce test sur notre biodiesel avec un colorimètre ASTM d1500.



Figure III.12 : Colorimètre ASTM d4052 de la raffinerie.

III.6.6. Indice d'acide

C'est une mesure qui quantifie la concentration d'acides libres dans une huile, on pèse entre 1 à 2 g de biodiesel et on le place dans un bécher. On ajoute ensuite 25 ml d'éthanol (préalablement neutralisé avec KOH (0,1 N)) comme solvant. Le mélange est agité pour assurer une dissolution complète du biodiesel. On ajoute ensuite quelques gouttes de phénolphtaléine

comme indicateur coloré. On effectue une titration en ajoutant goutte à goutte une solution de KOH 0,1 N jusqu'à ce que la solution vire au rose et que cette couleur persiste.

L'indice d'acide (IA) est calculé à partir du volume de KOH utilisé pour atteindre le point d'équivalence en utilisant la relation suivante :

$$IA = \frac{V \times N \times 56.1}{m} \text{ où :}$$

- IA : l'indice d'acide (mg KOH/g)
- V : le volume de la solution de KOH 0,1 N utilisé (ml),
- N : la normalité de la solution de KOH (eqg/L),
- 56.1 : la masse molaire de l'acide oléique (g/mol),
- m : la masse de l'échantillon du biodiesel (g).

III.6.7. Indice de saponification

C'est une mesure de la quantité de KOH nécessaire pour saponifier complètement une quantité donnée de graisse ou de biodiesel, donnant ainsi une indication de la longueur des chaînes d'acides gras dans les triglycérides ou les esters éthyliques présents dans l'huile ou le biocarburant. Pour le déterminer celui du biodiesel, on pèse entre 1 et 2 g de biodiesel et on les place dans un ballon à reflux. Ensuite, on ajoute 25 ml d'une solution alcoolique de KOH 0,5 N. Le mélange est porté à ébullition avec agitation constante pendant 1 heure. Après chauffage, on laisse refroidir le mélange et on titre avec une solution de HCl 0,5 N jusqu'au point d'équivalence marqué par la disparition de la couleur rose. La phénolphaléine est utilisée comme indicateur coloré. Un titrage à blanc est effectué dans les mêmes conditions, mais sans échantillon du biodiesel

L'indice de saponification (IS) est calculé à partir du volume de HCl utilisé pour titrer l'excès de KOH non réagi en utilisant la relation suivante :

$$IS = \frac{(V_{\text{blanc}} - V_{\text{échantillon}}) \times N \times 56.1}{m} \text{ où :}$$

- IS : l'indice de saponification,
- V_{blanc} : le volume de la solution de HCl 0,5 N utilisé pour le blanc (ml),
- $V_{\text{échantillon}}$: le volume de la solution de HCl 0,1 N utilisé pour l'échantillon (ml),
- N : la normalité de la solution de HCl (eqg/L),
- 56.1 : la masse molaire de l'acide oléique (g/mol),
- m : la masse de l'échantillon de biodiesel (g).

III.6.8. Indice d'esters

C'est une mesure spécifique de la quantité d'esters éthyliques présents dans le biodiesel. Contrairement à l'indice de saponification, qui mesure la quantité totale d'esters éthyliques et d'acides libres, l'indice d'esters exclut les acides libres présents dans le biodiesel. Cela permet d'obtenir une évaluation plus précise de la pureté des esters éthyliques formés par transestérification. Il est calculé en soustrayant l'indice d'acide de l'indice de saponification.

$$IE = IS - IA$$

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. La teneur en matière sèche :

$$\text{TMS}(\%) = 36.2\%$$

Une TMS de 36,2% signifie que sur 100 g de marc de café sec, il y a 36,2 g de matières solides, le reste étant de l'eau. Ce résultat est cohérent avec les valeurs trouvées dans la littérature, généralement comprises entre 20% et 45%[19]. Cette valeur indique qu'après séchage, une proportion significative du marc de café est constituée de matières solides, ce qui inclut les lipides et autres composés organiques. Une TMS élevée est favorable pour le rendement de l'extraction d'huile, car elle offre une plus grande quantité de matières utilisables pour la production de biodiesel.

En plus, la TMS influence les propriétés physiques du marc de café, telles que sa densité et sa capacité d'absorption, ce qui peut affecter les étapes ultérieures de traitement et de transformation. Une meilleure compréhension de la TMS permet d'améliorer non seulement le rendement de l'huile extraite mais aussi la qualité du biodiesel produit, en assurant une conversion plus efficace des lipides en esters éthyliques. Cela contribue à rendre le processus de production plus durable et économiquement viable.

IV.2. Le rendement des deux différentes méthodes de production du biodiesel

Le rendement de l'extraction de l'huile par décoction : $R_1(\%) = 11.2\%$

Le rendement de la méthode indirecte : $R_{2,I}(\%) = 60\%$

Le rendement de la méthode directe : $R_{2,D}(\%) = 97.3\%$

Les résultats obtenus montrent une différence notable dans les rendements des deux méthodes de production de biodiesel à partir de marc de café. En considérant un rendement de 11.2% pour l'étape d'extraction par décoction de l'huile pour les deux méthodes, la méthode directe a donné un rendement de 97.3%, tandis que la méthode indirecte a produit un rendement de 60%. Cette différence significative s'explique par la complexité de la méthode indirecte, qui comporte des étapes supplémentaires telles que la décantation dans une ampoule à décanter, le lavage, et la séparation du biodiesel. Chacune de ces étapes supplémentaires peut entraîner des pertes de matière, réduisant ainsi le rendement global. En revanche, la méthode directe permet de récupérer le biodiesel directement par évaporation sous vide, puis de le laisser décanter naturellement, minimisant ainsi les pertes et améliorant l'efficacité et la simplicité du processus.

IV.3. Indice de réfraction

Celui du biodiesel produit avec la méthode indirecte $n_1=1.4455$

Celui du biodiesel produit avec la méthode directe $n_2=1.4456$

On observe que les indices de réfraction des biodiesels produits par les deux méthodes sont très proches l'un de l'autre, mais légèrement inférieurs à la valeur de référence de la littérature qui est près de 1.4535 [20]. Cela peut être dû à la présence des impuretés ou de substances non complètement converties lors de la transestérification. Ou bien à la nature de la matière première utilisée dans notre cas le marc de café, ainsi que les conditions de réaction telles que la température, le temps de réaction et la pureté des réactifs.

Il est également possible que des différences dans la technique de purification après la réaction aient un impact. Par exemple, des résidus de catalyseur ou des solvants non évaporés pourraient influencer sur l'indice. Une analyse plus approfondie des conditions de réaction et des procédés de purification pourrait aider à identifier les causes exactes de ces écarts et à améliorer la qualité du biodiesel produit. En fin de compte, ces résultats montrent l'importance de contrôler strictement tous les paramètres de production pour obtenir un biodiesel de qualité optimale.

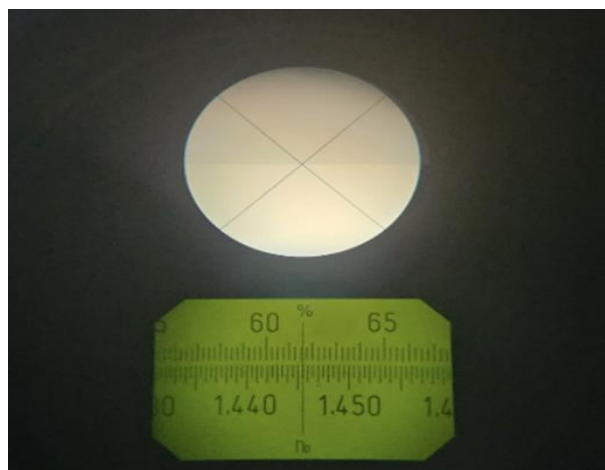


Figure IV.1 : L'indice de réfraction du biodiesel.

IV.4. Test d'inflammabilité

Observations

- **Allumage** : La goutte de biodiesel s'est enflammée rapidement au contact de la flamme.
- **Combustion** : La combustion s'est propagée uniformément à travers la goutte.
- **Durée de la Flamme** : La flamme a persisté pendant une période notable.
- **Couleur de la Flamme** : La flamme produite était principalement jaune.



Figure IV.2 : Test d'inflammabilité du biodiesel extrait du marc de café

Ces observations montrent que notre biodiesel possède de bonnes propriétés combustibles, avec un allumage rapide et une combustion uniforme et continue. La persistance de la flamme indique une libération d'énergie adéquate, comparable à celle des carburants fossiles. La flamme jaune observée suggère une combustion propre et efficace. Cependant, ces résultats soulignent aussi la nécessité de manipuler le biodiesel avec précaution en raison de son inflammabilité. En somme, le biodiesel produit ici présente des caractéristiques favorables pour une utilisation comme carburant alternatif, tout en nécessitant des mesures de sécurité similaires à celles des carburants traditionnels.

IV.5. Viscosité cinématique

$$\nu = 7.114 \text{ mm}^2/\text{s}$$

La viscosité mesurée du biodiesel est de $7.114 \text{ mm}^2/\text{s}$, elle est considérablement élevée par rapport à la valeur théorique (voir **tableau II.2**)[15], [16] Cette différence suggère que la viscosité du notre biodiesel est basse, ce qui peut avoir des implications sur sa fluidité et son utilisation dans les moteurs. Elle peut ainsi entraîner des problèmes de démarrage à froid, de circulation dans le système de carburant et de la performance générale du moteur. Toutefois, il est essentiel de noter que la viscosité seule ne détermine pas la qualité globale du biodiesel.

IV.6. La densité

La densité du biodiesel produit par méthode indirecte : $\rho_1 = 0.8418 \text{ g/cm}^3$

La densité du biodiesel produit par méthode directe : $\rho_2 = 0.8676 \text{ g/cm}^3$

Les densités de biodiesel obtenues par les deux méthodes sont relativement proches de la valeur théorique de 0.895 g/cm^3 (voir **tableau II.2**) [15], [16], indiquant une conversion et une pureté élevées. Ces résultats suggèrent que les deux méthodes produisent un biodiesel de qualité satisfaisante

IV.7. La couleur ASTM

L'échelle de couleur ASTM contient 16 indices de couleur ASTM allant de 0,5 pour la couleur la plus claire à 8,0 pour la couleur la plus foncée, avec des intervalles de 0,5 comme illustré dans la Figure IV.3 [21]

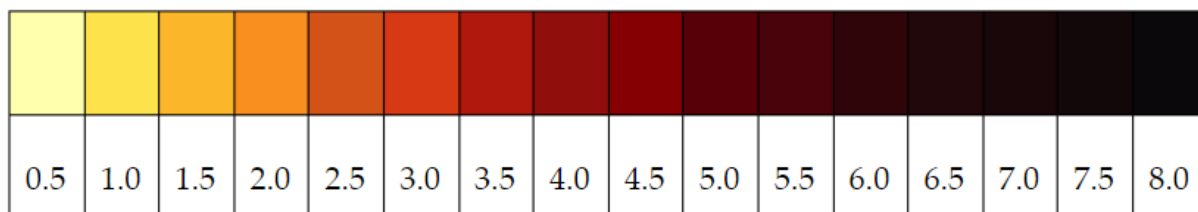


Figure IV.3 : L'échelle de la couleur ASTM D 1500

On a trouvé les valeurs suivantes :

La couleur ASTM du biodiesel produit par la méthode Indirecte : 4

La couleur ASTM du biodiesel produit par la méthode Directe : 6

Sur une échelle ASTM de couleur allant de 0 à 8, la méthode indirecte a donné une note de 4, tandis que la méthode directe a donné une note de 6. Une couleur plus élevée correspond généralement à une plus grande quantité d'impuretés ou de composants non désirés dans le biodiesel. Cela suggère que la méthode indirecte a produit un biodiesel de meilleure qualité visuelle, avec une note de couleur plus basse par rapport à la méthode directe. Cela peut s'expliquer par la présence des grains de marc de café qui ont participé au processus de transestérification.

IV.8. Indice d'acide :

IA= 8.23mgKOH/g

L'indice d'acide mesuré pour notre biodiesel est de 8.23 mgKOH/g, il est considérablement élevé par rapport à la valeur théorique de 0.54 mgKOH/g[15], [16]. indique une concentration relativement élevée d'acides libres Cette valeur peut être attribuée à la présence d'impuretés acides dans la matière première, confirmée par l'indice d'acide de l'huile de marc de café qui est de 22.95 mgKOH/g, ainsi qu'aux conditions de production. Cette acidité élevée peut endommager les pièces métalliques du moteur, entraîner une détérioration de ses performances, et altérer la qualité de sa combustion.

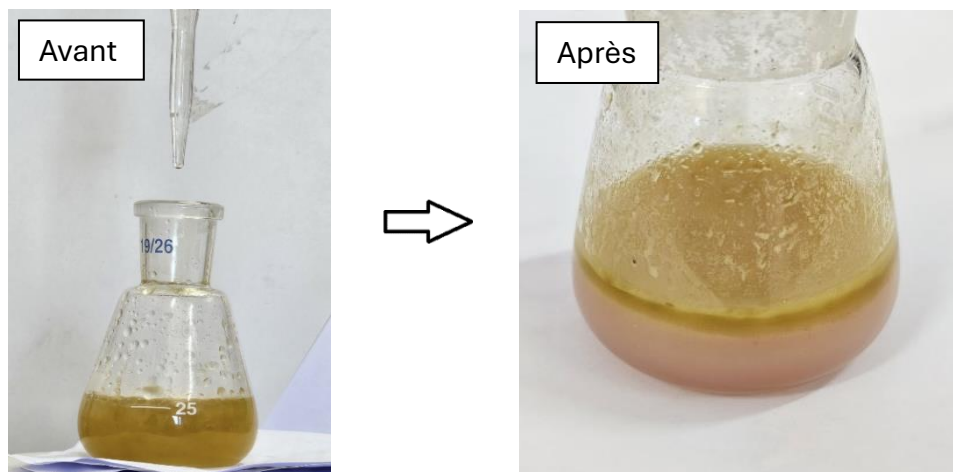


Figure IV.4 : La solution avant et après titrage avec le KOH pour le calcul d'IA

IV.9. Indice de saponification

IS=198.57 mg KOH/g

La valeur de l'indice de saponification du biodiesel obtenu à partir de marc de café est proche de celle mentionnée dans la partie théorique (209.54 mg KOH/g selon le **tableau II.2**[15], [16]). Cette similitude indique une concentration relativement élevée en esters éthyliques ce qui est favorable pour assurer une bonne qualité du carburant en termes de propriétés physiques et de performances.

Une telle valeur d'IS indique une présence d'acides gras à chaînes courtes qui présentent plusieurs avantages significatifs. Ces derniers ont un point de gel plus bas, ce qui les rend appropriés pour les biodiesels utilisés dans des climats froids, et une viscosité plus faible, favorisant une atomisation efficace du carburant dans les moteurs pour une combustion propre et efficace. Cependant, leur sensibilité à l'oxydation peut réduire la durée de conservation du biodiesel.

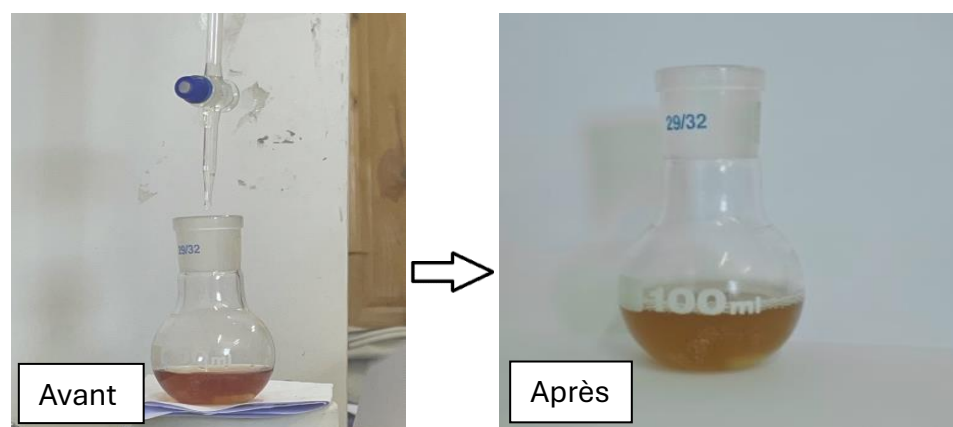


Figure IV.5 : La solution avant et après titrage avec HCL pour le calcul de l'IS.

IV.10. Indice d'esters

On a : IS = 198.57 mg KOH/g

et IA = 8.23 mg KOH/g

⇒ IE = 184.34 mg KOH/g

Une faible valeur d'indice d'ester, comme celle obtenue (184.34 mg KOH/g), suggère une concentration relativement élevée en acides gras libres dans le biodiesel. Cette situation peut être due à plusieurs facteurs, tels qu'une transestérification incomplète lors du processus de production, une qualité médiocre des matières premières utilisées ou des conditions de réaction inadéquates.

IV.11. Diagramme de Flux de Procédé (PFD) des deux méthodes

Les deux schémas qui suivent ont été réalisés à l'aide du logiciel HYSYS et représentent un aperçu simplifié des étapes des deux méthodes de production de biodiesel. À première vue, la méthode directe semble beaucoup plus simple avec moins d'étapes et de matériel, tandis que la méthode indirecte apparaît plus complexe, avec de nombreuses étapes supplémentaires et des équipements plus sophistiqués.

Le tableau qui suit les PFD présente une comparaison détaillée entre ces deux méthodes, mettant en évidence les principales différences en termes de complexité, efficacité temporelle, consommation d'énergie, avantages économiques, popularité, qualité et rendement, équipements requis, contrôle et surveillance.

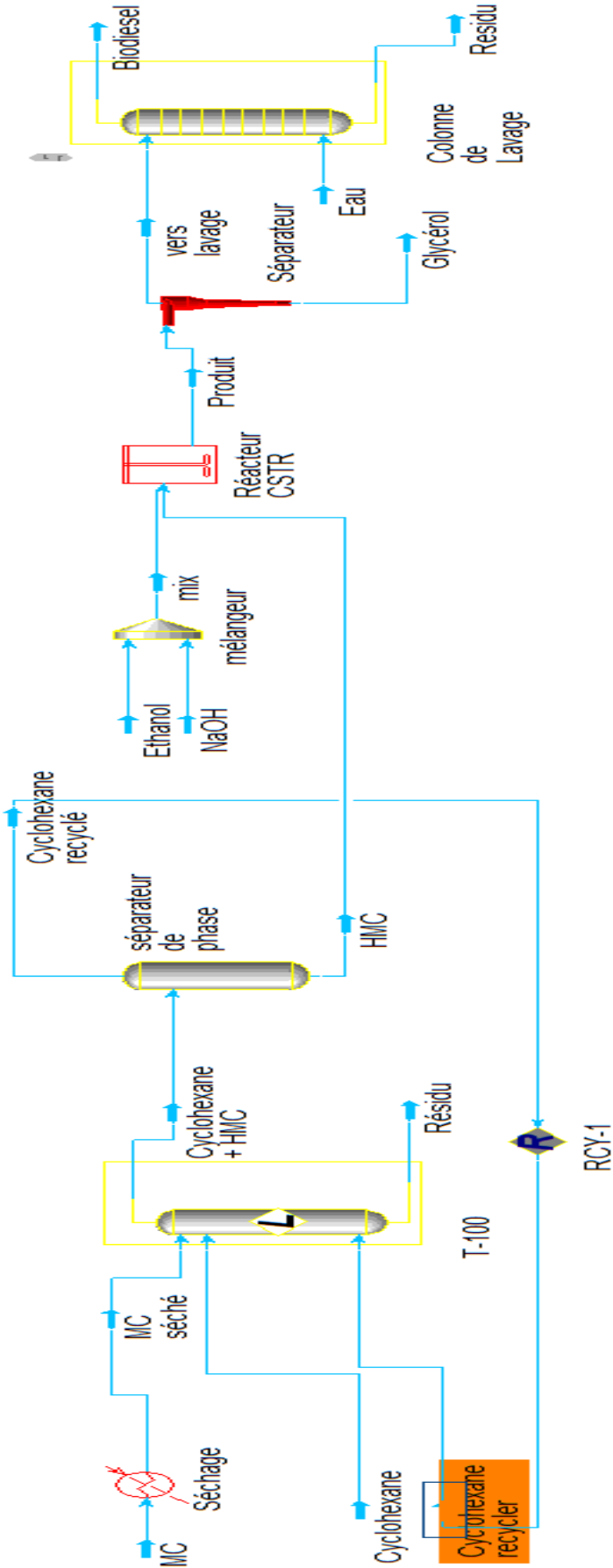


Figure IV.6 Le PFD de la méthode indirecte réalisé avec HYSIS

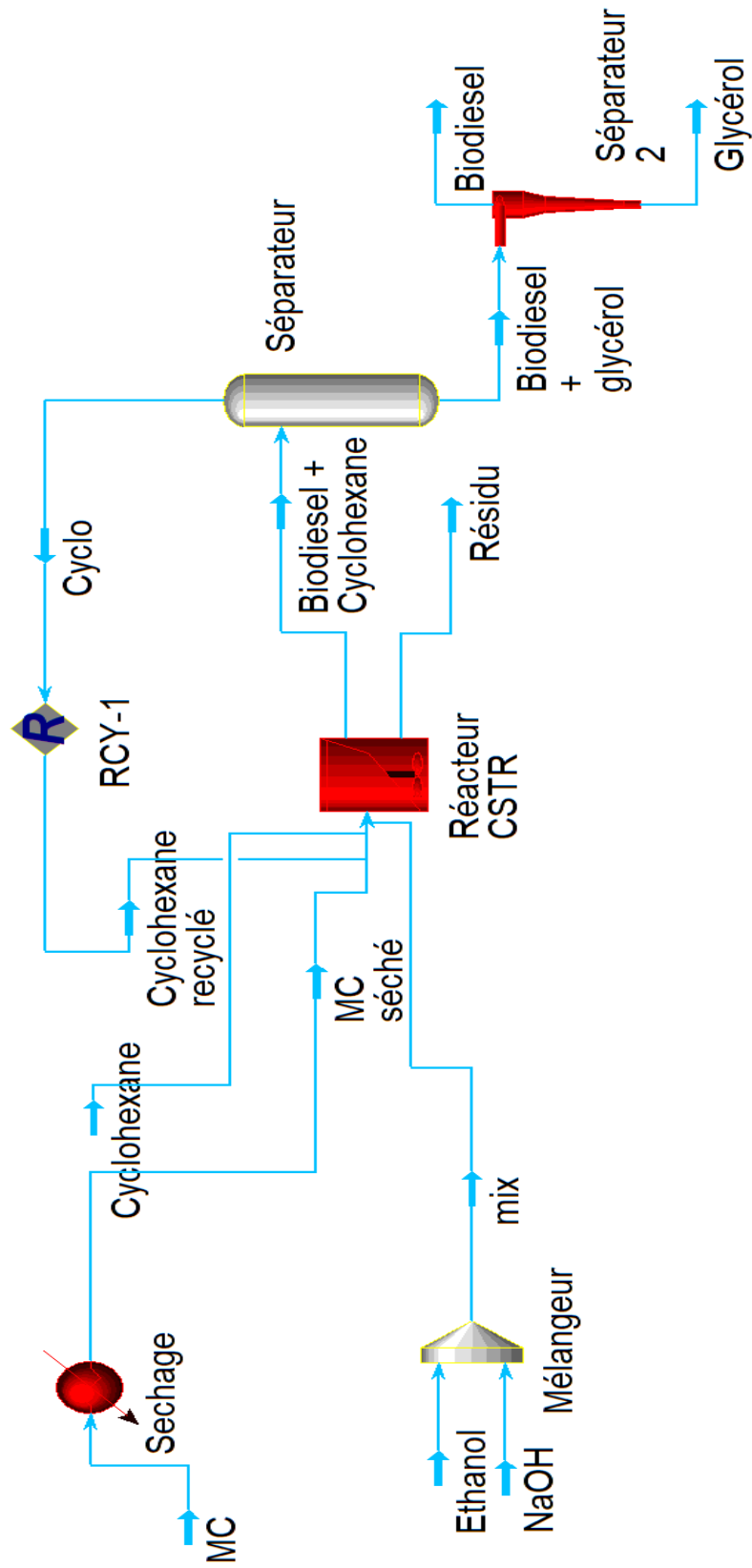


Figure IV.7 :Le PFD de la méthode directe réalisée avec HYSIS

Tableau IV.4 : Comparaison des méthodes directe et indirecte déduites de notre étude.

Critère	Méthode Directe	Méthode Indirecte
Complexité du processus	Le procédé est simple et comporte moins d'étapes, ce qui le rend facile à gérer et à mettre en œuvre	Le procédé est complexe avec plusieurs étapes, nécessitant une gestion et une mise en œuvre plus critique.
Efficacité temporelle	Le traitement est rapide, avec un temps de traitement global plus court.	Le traitement prend plus de temps, avec un temps de traitement global plus long en raison des nombreuses étapes intermédiaires (séparation, lavage..)
Consommation d'énergie	La consommation d'énergie est faible car moins d'équipements sont nécessaires, rendant le processus moins énergivore.	La consommation d'énergie est élevée en raison de l'utilisation de nombreux équipements sophistiqués, rendant le processus plus énergivore
Rendement	Très rentable	Relativement moins rentable
Qualité	Qualité potentiellement inférieurs	Qualité potentiellement élevés
Fréquence d'utilisation	Moins utilisée, plus adaptée aux petites installations	Largement plus utilisée dans l'industrie.
Avantages économiques	La méthode est rentable et simple, avec des coûts de production réduits, ce qui en fait une option économique pour les petites entreprises.	La méthode est moins rentable en raison des coûts plus élevés et de la complexité.
Équipements requis	Les équipements nécessaires sont moins sophistiqués et moins nombreux, ce qui simplifie l'installation et réduit les coûts d'investissement	Les équipements nécessaires sont plus sophistiqués et plus nombreux, ce qui augmente les coûts d'investissement et la complexité de l'installation.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Cette étude a exploré la possibilité de valoriser le marc de café, un déchet abondant et polluant, en le transformant en biodiesel via des méthodes de transestérification. L'objectif principal était de produire un biodiesel de qualité satisfaisante en utilisant deux approches différentes : une méthode indirecte et une méthode directe.

L'approche directe, combinant l'extraction de l'huile et la transestérification en une seule étape, a montré des résultats prometteurs en termes de rendement et de simplification du processus. Cette méthode pourrait potentiellement offrir une solution plus efficace et pour la production de biodiesel à partir de matières premières non conventionnelles comme le marc de café. Les résultats obtenus indiquent une conversion significative des huiles en esters éthyliques, bien que des ajustements soient nécessaires pour optimiser les conditions de réaction et minimiser les impuretés.

Il est important de souligner que cette recherche représente une première étape dans l'exploration de la production de biodiesel à partir de marc de café. Les résultats obtenus, bien qu'encourageants, montrent qu'il existe encore des défis à relever pour améliorer la qualité du biodiesel et assurer sa conformité aux normes industrielles.

De plus, la mise en œuvre de cette technologie à une échelle industrielle nécessitera des équipements et des matériaux spécifiques, ainsi que des analyses plus approfondies pour évaluer les impacts environnementaux et économiques.

Pour finir, la valorisation du marc de café pour la production de biodiesel offre une opportunité intéressante pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et promouvoir une gestion durable des déchets. Cependant, pour maximiser le potentiel de cette approche, il est crucial de poursuivre les recherches et de développer des solutions innovantes qui répondent aux exigences techniques et environnementales du secteur énergétique moderne.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. N. Uddin, K. Techato, M. G. Rasul, N. M. S. Hassan, and M. Mofijur, "Waste coffee Oil: A promising source for biodiesel production," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 677–682. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.221.
- [2] F. Battista, L. Zuliani, F. Rizzioli, S. Fusco, and D. Bolzonella, "Biodiesel, biogas and fermentable sugars production from Spent coffee Grounds: A cascade biorefinery approach," *Bioresour Technol*, vol. 342, p. 125952, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2021.125952.
- [3] V. Kafková *et al.*, "Integrated Approach to Spent Coffee Grounds Valorization in Biodiesel Biorefinery," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/su15075612.
- [4] AISSANI Oumnia and DEROUICHE Oumeima, "Investigation chimique, phytochimique et biologique du café et du marc de café," 2019.
- [5] R. Campos-Vega, G. Loarca-Piña, H. A. Vergara-Castañeda, and B. Dave Oomah, "Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects," *Trends Food Sci Technol*, vol. 45, no. 1, pp. 24–36, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.TIFS.2015.04.012.
- [6] S. B. Kang, H. Y. Oh, J. J. Kim, and K. S. Choi, "Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW)," *Renew Energy*, vol. 113, pp. 1208–1214, 2017, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:116210335>
- [7] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Bio-refinery approach for spent coffee grounds valorization," *Bioresour Technol*, vol. 247, pp. 1077–1084, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2017.09.106.
- [8] S. Mayson and I. D. Williams, "Applying a circular economy approach to valorize spent coffee grounds," *Resour Conserv Recycl*, vol. 172, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105659.
- [9] Shanshan Chen, "Diesel exhaust," Elsevier eBooks , 2022.
- [10] S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Cenicerros, and M. Natarajan, "Review of biodiesel composition, properties, and specifications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1. pp. 143–169, Jan. 2012. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.143.
- [11] O. B. Popovicheva *et al.*, "Chemical composition of diesel/biodiesel particulate exhaust by FTIR spectroscopy and mass spectrometry: Impact of fuel and driving cycle," *Aerosol Air Qual Res*, vol. 17, no. 7, pp. 1717–1734, 2017, doi: 10.4209/aaqr.2017.04.0127.

Références bibliographiques

- [12] P. McCarthy, M. G. Rasul, and S. Moazzem, "Comparison of the performance and emissions of different biodiesel blends against petroleum diesel," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 255–260, Jun. 2011, doi: 10.1093/ijlct/ctr012.
- [13] M. Cui *et al.*, "Measurement of PM and its chemical composition in real-world emissions from non-road and on-road diesel vehicles," *Atmos Chem Phys*, vol. 17, no. 11, pp. 6779–6795, Jun. 2017, doi: 10.5194/acp-17-6779-2017.
- [14] L. Blinová, A. Bartošová, and M. Sirotiak, "Biodiesel Production from Spent Coffee Grounds," *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, vol. 25, no. 40, pp. 113–121, Jun. 2017, doi: 10.1515/rput-2017-0013.
- [15] N. S. Caetano, V. F. M. Silva, A. C. Melo, A. A. Martins, and T. M. Mata, "Spent coffee grounds for biodiesel production and other applications," *Clean Technol Environ Policy*, vol. 16, no. 7, pp. 1423–1430, 2014, doi: 10.1007/s10098-014-0773-0.
- [16] M. N. Uddin, K. Techato, M. G. Rasul, N. M. S. Hassan, and M. Mofijur, "Waste coffee oil: A promising source for biodiesel production," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 677–682, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.221>.
- [17] M. Haddoudi, H. Mellouk, B. Bejjany, A. Dani, and K. Digua, "Valorisation du marc du café : extraction de l'huile et évaluation de son activité antioxydante
Valorization of spent coffee grounds: oil extraction and evaluation of antioxidant activity," 2014.
- [18] C. Corgozinho, M. Carvalho, and P. Barbeira, "Spectrophotometric and Chemometric Determination of the ASTM Color of Automotive Diesel," *Energy & Fuels - ENERG FUEL*, vol. 23, Jun. 2009, doi: 10.1021/ef801019s.
- [19] BENSAAIDA Ichrak and BENAMOR Hadjer, "Valorisation du marc de café - caractérisations et applications (Adsorbant et inhibiteur de corrosion) - ," 2023.
- [20] Z. Bettahar, B. Cheknane, and K. Boutemak, "Etude de la transestérification d'un mélange des huiles usagées pour la production du biodiesel," 2016.
- [21] M. H. Hasnul Hadi *et al.*, "The Amber-Colored Liquid: A Review on the Color Standards, Methods of Detection, Issues and Recommendations," *Sensors*, vol. 21, p. 6866, Jun. 2021, doi: 10.3390/s21206866.