



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL-OUED
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES ET PETROCHIMIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Industries Pétrochimiques

Thème :

Analyse comparative des méthodes de recyclage des
huiles lubrifiantes usagées : une approche théorique

Encadré par:

Dr. KHALED Bilal

Présenté par:

Elhareth Henka

Walid Ben Mesbah

Ahmed Madani

Le jury:

	M.CA	Président
	M.CA	Président
Dr. KHALED Bilal	M.CA	Encadré
	M.CA	Examineur

2024-2025

Remerciements

**Tout d'abord, nous tenons à remercier notre Dieu
qui nous a donné le pouvoir de faire ce travail.**

**Nous remercions monsieur l'encadreur Mr. Khaled Bilal pour
nous guider tout au long de ce travail, pour des éclaircissements,
des observations judicieuses et des conseils. Ce qui nous a été
précieux pour réaliser ce travail, Nous remercions tous les
enseignants pour leur
aide et leurs conseils durant notre étude.**

**Enfin, Nous remercions tous ceux qui ont contribué de
près ou de loin à la réalisation de cet humble
travail dans de meilleures conditions.**

Dédicace

Dieu merci

Nous dédions cet humble travail à :

À nos chers pères,

Chères Mères,

Chers frères et sœurs ,

Toute notre famille,

Et à tous nos amis

Elhareth _ Walid _ Ahmed

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
DEDICACE	II
SOMMAIRE	III
LISTE DE FIGURE	V
LISTE DE TABLEAU	VI
LISTE DES ABREVIATIONS	VII
RESUME	X
INTRODUCTION GENERALE	XI
CHAPITRE I	14
LES HUILES LUBRIFIANT DES MOTEURS	14
1.1 INTRODUCTION :	1
1.2 IMPORTANCE DE COMPRENDRE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'HUILE LUBRIFIANTE :	1
1.3 ROLE DU LUBRIFIANT :	2
1.4 L'IMPORTANCE DES HUILES LUBRIFIANTES :	3
1.5 CARACTERISTIQUES DES HUILES LUBRIFIANTES :	3
1.6 PROPRIETES DES HUILES LUBRIFIANTES :	4
1.6.1 Couleur :	5
1.7 CLASSIFICATION SCHEMATIQUE DES LUBRIFIANTS :	5
1.7.1 Les lubrifiants liquides :	5
1.7.2 Les lubrifiants solides :	6
1.7.3 Les lubrifiants plastiques :	6
1.8 COMPOSITIONS CHIMIQUE DES HUILES LUBRIFIANT :	6
1.8.1 Les huiles de base :	7
1.9 Les additifs:	11
1.13 Analyse des huiles lubrifiantes usagées :	13
Conclusion	14
CHAPITRE II	15
LA REGENERATION DES HUILES USAGEE	15
2.1 INTRODUCTION	20
2.2 DANGER DES HUILES USAGEES (RISQUES POUR L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT):	20
2.3 L'IMPORTANCE DE L'ANALYSE DE L'HUILE EN SERVICE :	20
2.4 RECYCLAGE DES HUILES USAGEES (DIFFERENTES METHODES) :	21
a. Régénération par Distillation sous Vide et Finition à l'Argile :	21
b. Incinération avec Récupération d'Énergie :	21

<i>c. Incinération par Évaporation :</i>	21
2.4.1 <i>Méthode de valorisation (le brûlage simple) :</i>	21
2.4.2 <i>L'incorporation d'huiles usagées dans le fuel lourd pour la combustion :</i>	22
2.4.3 <i>Brûlage propre des huiles usagées (une technologie respectueuse de l'environnement) :</i>	22
2.5 LES PROCEDES DE REGENERATION :	23
2.5.1 <i>La collecte :</i>	23
2.5.2 <i>La régénération des huiles usagées (Procédés et étapes clés) :</i>	23
2.5.3 <i>Quelques procédés Industriels de régénération :</i>	26
<i>Avantages clés du procédé</i>	30
2.6 <i>Méthodes modernes de traitement des huiles usagées :</i>	32
CONCLUSION	35
2.7 <i>Huiles régénérées :</i>	36
2.7.1 <i>Les types des huiles usagées :</i>	36
2.8 <i>Récupération des huiles usées :</i>	36
2.8.1 <i>Méthodes de récupération des huiles usées :</i>	36
2.8.2 <i>Étapes de récupération des huiles usées :</i>	37
2.9 <i>Utilisation des huiles :</i>	38
CHAPITRE III	39
ETUDE DE REVUES SIENTIFICES	39
3.1 INTRODUCTION	40
3.2 MATERIEL ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE :	40
3.2.1 <i>Matériel utilisé :</i>	41
3.2.2 <i>Protocole expérimental :</i>	44
3.2.2.1 <i>Analyse Conditions initiales :</i>	44
3.2.3 <i>Analyses effectués :</i>	48
3.3 RESULTATS ET DISCUSSION :	49
3.3.1 L'INFLUENCE SUE LES PROPRIETES PHYSIQUES :	49
3.3.1.1 <i>Point d'éclair</i>	49
3.3.2 <i>Indice d'acide total (TAN) :</i>	51
3.3.3 <i>Densité</i>	53
3.3.4 <i>Viscosité spécifique :</i>	54
3.3.5 <i>Indice de viscosité :</i>	56
3.3.6 <i>Teneur en cendres :</i>	57
3.3.7 <i>Pourcentage d'huile lubrifiante récupérée :</i>	58
3.4 ÉMISSIONS POLLUANTES ISSUES DU MOTEUR :	61
3.4.1 <i>Émissions d'hydrocarbures (HC) :</i>	61
SUR LA FIGURE 11, LA COURBE HC MONTRE CLAIREMENT CETTE DIMINUTION AVEC LE PETROLE RENOUEVABLE, TEMOIGNANT D'UNE COMBUSTION PLUS PROPRE. ^{8,9}	62
3.4.2 <i>ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE (CO₂):</i>	63
3.4.3 <i>ÉMISSIONS D'OXYDES D'AZOTE (NO_x):</i>	64
3.4.4 <i>Émissions de monoxyde de carbone (CO) :</i>	65
CONCLUSION GENERALE	67
BIBLIOGRAPHIE	70

Liste de Figure

Figure 1 : frottement entre deux solides en contact	2
Figure 2 : Illustration du banc d'essai.....	41
Figure 3 : Procédure de régénération ^{6,7}	46
Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'analyse des performances du moteur et des émissions. Il comprend un moteur à allumage commandé (SI), un dynamomètre numérique (THEPRA), un analyseur de gaz d'échappement (EMS-5002), un hygromètre et des thermocouples.	48
Figure 5 : comparaison le point d'éclair	51
Figure 6 : Comparaison en TAN	52
Figure 7 : Comparaison de densité.....	54
Figure 8 : Comparaison de la viscosité spécifique	55
Figure 9 : Comparaison du Indice de viscosité	57
Figure 10 : Teneur en cendres.....	58
Figure 11 : Effet du temps de raffinage sur le rendement	59
Figure 12 : Effet de la température sur le rendement	60
Figure 13 : Effet du rapport solvant/huile sur le rendement	60
Figure 14 : Comparaison des émissions d'hydrocarbures (HC) pour les huiles fraîche, usagée et régénérée	63
Figure 15 : : <i>Variation des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) en fonction du couple moteur</i>	64
Figure 16 : Émissions d'oxydes d'azote (NO _x) selon les types d'huile et le pourcentage de couple	65
Figure 17 : Variation des émissions de monoxyde de carbone (CO) selon l'état de l'huile	66

Liste de Tableau

Tableau 1 : Modifications chimiques dans les huiles lubrifiantes usagées ²	11
Tableau 2 : Modifications chimiques dans les huiles lubrifiantes usagées ²	12
Tableau 3 : Composés polluants des huiles usées ¹	38
Tableau 4 : Propriétés de l'huile lubrifiante ^{4,6}	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرّفة.

Liste des abréviations

TDA : Thermal DeAsphalting – Désasphaltage thermique.

DAO : Désasphaltage à l’Huile – Procédé d’extraction des huiles par solvant.

FT : Fischer-Tropsch – Procédé de synthèse d’hydrocarbures.

FIDW : Isodéparaffinage de Fushun – Procédé de déparaffinage spécifique.

HC : Hydrocraqué – Craquage par hydrogène.

VI : Indice de Viscosité – Mesure de la stabilité de la viscosité.

HVI : High Viscosity Index – Indice élevé de viscosité.

VHVI : Very High Viscosity Index – Indice très élevé de viscosité.

UHVI : Ultra High Viscosity Index – Indice ultra élevé de viscosité.

XHVI : Extra High Viscosity Index – Indice extrêmement élevé de viscosité.

SUS : Saybolt Universal Seconds – Unité de mesure de la viscosité.

TAN (NTA) : Total Acid Number (Nombre Total d’Acide) – Mesure de l’acidité.

BSFC : Brake Specific Fuel Consumption – Consommation spécifique de carburant.

PCB : Polychlorobiphényles – Composés toxiques.

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques – Polluants cancérigènes.

MEA : Monoéthanolamine – Flocculant utilisé dans la régénération.

SLES : Sodium Lauryl Ether Sulfate – Tensioactif chimique.

MEK : Méthyléthylcétone – Solvant industriel.

BRA : Brut Réduit Atmosphérique – Résidu de distillation atmosphérique.

RSV : Résidu Sous Vide – Résidu lourd de distillation sous vide.

VGO : Vacuum Gasoil – Gasoil issu de la distillation sous vide.

HVO : Heavy Vacuum Oil – Huile lourde de distillation sous vide.

MVO : Medium Vacuum Oil – Huile moyenne sous vide.

LND : Light Neutral Distillate – Distillat neutre léger.

MND : Medium Neutral Distillate – Distillat neutre moyen.

HND : Heavy Neutral Distillate – Distillat neutre lourd.

SPD : Spindle Distillate – Distillat de broche.

SPO : Spindle Oil – Huile de broche.

BS : Bright Stock – Huile de base très visqueuse.

R : Raffinat – Résidu après extraction.

E : Extrait – Phase extraite dans le traitement.

AFNOR : Association Française de Normalisation

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

ASTM : American Society for Testing and Materials

API : American Petroleum Institute

SAE : Society of Automotive Engineers

ARIEL : Association Technique de l'Industrie Européenne des Lubrifiants

AGMA : American Gear Manufacturers Association

AFS : Anderson – Flory – Schulz

EMS-5002 : Emission Measurement System – Appareil pour mesurer les émissions.

LOMBARDINI IM-359 : Type de moteur utilisé pour les tests.

G-97 : Type d'essence utilisé comme carburant dans les tests.

W : Winter – Classification d'huile pour l'hiver .

PONA : Paraffines, Oléfines, Naphtènes, Aromatiques – Classification des composants d'huile.

BSFC : (Brake Specific Fuel Consumption) Consommation spécifique de carburant au frein

Étude sur l'amélioration des méthodes de recyclage huiles lubrifiantes usagées

المخلص

تُعد زيوت التشحيم المستعملة من النفايات التي تطرح تحديات بيئية مهمة نظرًا لمكوناتها الضارة و تهدف هذه الدراسة إلى تقييم فعالية بعض الطرق المعتمدة في إعادة تكرير هذه الزيوت، مع التركيز على خصائصها الفيزيائية والكيميائية قبل وبعد المعالجة. تم الاعتماد على ثلاث مقالات علمية تناولت تقنيات مختلفة، منها المعالجة الحمضية، الاستخلاص بالمذيبات، والتليد الكيميائي. تم تحليل أداء الزيوت المعاد تكريرها مقارنة بالزيوت الجديدة والمستعملة من خلال أظهرت النتائج (HC ، CO₂ ,CO ،NO_x) مؤشرات مثل اللزوجة، الكثافة، الرقم الحمضي، والانبعاثات الغازية تحسناً ملحوظاً في جودة الزيوت المجددة، وانخفاضاً في الانبعاثات الضارة، مع تحديد شروط تشغيلية مثلى لكل طريقة. تسمح هذه الدراسة باقتراح حلول فعالة لمعالجة هذا النوع من النفايات البترولية، بما يحقق توازناً بين حماية البيئة وتحسين أداء المحركات.

الكلمات المفتاحية

زيوت التشحيم – إعادة التدوير – التكرير – المعالجة – البيئة

Résumé

Les huiles lubrifiantes usagées sont des déchets qui posent des défis environnementaux importants en raison de leurs composants nocifs. Cette étude vise à évaluer l'efficacité de certaines méthodes approuvées pour le raffinage de ces huiles, en se concentrant sur leurs propriétés physiques et chimiques avant et après traitement. Trois articles scientifiques ont été utilisés, couvrant différentes techniques, notamment le traitement acide, l'extraction par solvant et le Flocculation. Les performances des huiles re-raffinées par rapport aux huiles neuves et usagées ont été analysées à travers des paramètres tels que la viscosité, la densité, l'indice d'acidité et les émissions gazeuses (HC , CO₂ , CO et NO_x). Les résultats ont montré une amélioration significative de la qualité des huiles régénérées et une réduction des émissions nocives, avec des conditions de fonctionnement optimales identifiées pour chaque méthode. Cette étude propose des solutions efficaces pour traiter ce type de déchets pétroliers, en parvenant à un équilibre entre la protection de l'environnement et l'amélioration des performances du moteur.

Mots-clés

Huiles lubrifiantes - recyclage - raffinage - transformation - environnement

Introduction Générale

L'élimination inappropriée des huiles moteur usagées est l'un des principaux défis environnementaux de notre époque, car ces huiles contiennent des composés toxiques qui peuvent contaminer l'eau et le sol et menacer les organismes vivants. Dans le même temps, la consommation accrue de combustibles fossiles entraîne l'épuisement des ressources naturelles et l'émission de quantités croissantes de gaz nocifs. Compte tenu de ces considérations environnementales et économiques, il est devenu nécessaire de trouver des solutions efficaces pour réutiliser les huiles lubrifiantes usagées au lieu de les jeter. L'une des solutions les plus importantes est le re-raffinage des huiles usagées à l'aide de différentes technologies visant à restaurer leurs propriétés physiques et chimiques et à améliorer leurs performances dans les moteurs. Dans ce mémorandum, nous avons étudié et analysé les résultats de trois articles scientifiques qui ont abordé le sujet du re-raffinage des huiles moteur usagées en utilisant différentes méthodes et technologies, et l'effet de ces huiles re-raffinées sur les performances des moteurs à combustion interne (en particulier les moteurs à allumage commandé) et sur les émissions gazeuses qui en résultent. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur la comparaison des propriétés physiques et chimiques de l'huile moteur dans trois cas : l'huile neuve, l'huile détériorée (usagée) et l'huile re-rafinée. Il vise également à mettre en évidence l'efficacité des procédés de raffinage dans l'amélioration des propriétés du pétrole et la restauration de ses performances dans des conditions de fonctionnement réelles, en plus de déterminer leur impact sur la réduction des émissions nocives telles que HC, CO_x et NO_x. Trois articles ont été adoptés, chaque article adoptant une méthode comme suit : Le premier article a utilisé un traitement acide à l'aide d'acide acétique, suivi d'une filtration et d'une modification chimique. Le deuxième article a utilisé un traitement acide à l'acide phosphorique, suivi d'un blanchiment et d'une neutralisation avec du KOH. Le troisième article a utilisé l'extraction par solvant (i-butanol ou n-butanol) combinée au Flocculation à l'aide de monoéthanolamine (MEA).

À partir de ces articles, nous avons pu identifier les meilleures méthodes de recyclage des huiles lubrifiantes usagées et déterminer les meilleures conditions pour chaque méthode, comme suit : La première méthode, qui repose sur un traitement acide à l'aide d'acide acétique, s'est avérée efficace pour restaurer une partie importante des propriétés perdues de l'huile après utilisation. L'huile a été chauffée à 45°C sous agitation continue, puis de l'acide a été ajouté et le mélange a été laissé reposer pendant 24 heures, permettant aux

impuretés lourdes de précipiter. Ensuite, une solution d'eau de Javel a été utilisée pour éliminer les composés restants, et le processus a été suivi d'une étape de modification chimique utilisant de l'hydroxyde de potassium jusqu'à ce qu'un pH neutre soit atteint. Cette méthode a contribué à améliorer la viscosité, le point d'éclair et à réduire l'indice d'acidité, et a également conduit à une réduction significative des émissions telles que les oxydes d'azote et le monoxyde de carbone lors de l'utilisation d'huile raffinée dans le moteur. La deuxième méthode reposait sur un traitement acide similaire, mais utilisant de l'acide phosphorique. L'huile détériorée a été chauffée et agitée, puis de l'acide a été ajouté et laissé se déposer avant d'être filtrée et neutralisée avec de l'hydroxyde de potassium, suivi d'un processus final de précipitation et de filtration. Cette méthode a montré des résultats similaires en termes d'amélioration des propriétés physiques et chimiques de l'huile, puisque la viscosité cinématique a augmenté d'environ 15,6 %, la gravité spécifique s'est améliorée de 6,75 % et les émissions gazeuses, en particulier de NOx, ont diminué de 42,2 % en comparant l'huile re-rafinée avec l'huile dégradée, ce qui reflète la faisabilité et l'efficacité de la méthode. La troisième méthode a été distinguée en combinant la technique d'extraction par solvant avec la technique de floculation chimique, où l'i-butanol ou le n-butanol a été utilisé comme solvant, avec l'ajout de monoéthanolamine (MEA) comme floculant qui aide à collecter et à séparer efficacement les polluants. Les expériences ont été menées dans des conditions précises définies comme suit : température 30°C, temps de traitement 20 min, rapport massique solvant/huile 5:1 et concentration en MEA 2 g/kg de solvant. Les résultats ont démontré que cette méthode était capable d'éliminer efficacement les impuretés métalliques et les composés d'oxydation, ce qui a donné lieu à une huile raffinée d'une qualité très proche de celle de l'huile vierge HVI150, la rendant apte à une réutilisation industrielle dans la production de nouvelles huiles lubrifiantes. Ainsi, on peut dire que chaque méthode est caractérisée par des caractéristiques opérationnelles spécifiques et des conditions optimales pour assurer la qualité du raffinage, ce qui permet de sélectionner la méthode la plus appropriée en fonction des capacités disponibles et des objectifs environnementaux et industriels souhaités.

Dans ce mémoire, nous aborderons trois chapitres comme suit :

Chapitre un : Lubrifiants pour moteurs

Ce chapitre couvre les bases des huiles lubrifiantes, y compris leurs composants chimiques, leurs rôles, leurs propriétés physiques et chimiques, leur classification et leurs composants

de base. Il aborde également l'effet des polluants sur les huiles et les mécanismes de leur détérioration au fil du temps.

Chapitre deux : Raffinage des huiles usagées

Ce chapitre se concentre sur l'importance du raffinage des huiles usagées, leur impact sur l'environnement et les méthodes d'élimination sûres. Il examine également divers procédés de raffinage, tels que la distillation sous vide, le traitement à l'acide et à l'argile, l'hydrotraitement et l'extraction par solvant, ainsi que les technologies modernes telles que la biorestauration.

Chapitre trois : ETUDE DE REVUES SIENTIFICES

Ce chapitre présente une analyse des données et des résultats obtenus à partir d'expériences sur des huiles raffinées, en se concentrant sur leurs propriétés physiques et chimiques, telles que la densité, la viscosité, l'indice d'acidité et les émissions gazeuses. Il compare également les huiles neuves, usagées et raffinées pour déterminer l'efficacité de chaque méthode dans l'amélioration de la qualité de l'huile.

Chapitre I

Les huiles lubrifiant des moteurs

1.1 Introduction :

L'huile de lubrification est un élément essentiel pour réduire la friction et l'usure entre les pièces mobiles d'un moteur. Il est produit à partir d'un mélange complexe composé principalement d'huiles de base et d'additifs. Les huiles de base sont divisées en trois principaux types : les huiles minérales, largement utilisées en raison de leur coût économique ; Huiles synthétiques, qui offrent des performances élevées dans des conditions de fonctionnement difficiles ; Et les huiles végétales, qui sont biodégradables. Des additifs sont utilisés pour améliorer les propriétés de l'huile et comprennent des antioxydants, des agents anticorrosion, des détergents et des agents améliorant la viscosité. La composition chimique finale d'une huile lubrifiante dépend du type d'huile et des additifs utilisés. Il comprend des composants tels que des hydrocarbures, des composés organiques et des composés inorganiques, qui contribuent à améliorer l'efficacité et les performances de l'huile dans diverses conditions de fonctionnement .

1.2 Importance de comprendre la composition chimique de l'huile lubrifiante :

Comprendre la composition chimique d'une huile lubrifiante aide à sélectionner l'huile adaptée à l'application souhaitée. L'huile doit correspondre aux exigences de la machine et aux conditions de fonctionnement pour garantir des performances optimales et protéger l'équipement contre l'usure et les dommages.

La composition chimique d'une huile lubrifiante est un mélange complexe et diversifié de produits chimiques, chaque composant ayant une fonction spécifique pour conférer les propriétés souhaitées à l'huile. La compréhension de cette composition permet de sélectionner l'huile adaptée à l'application requise, garantissant des performances optimales, une protection de l'équipement et une durée de vie prolongée.

1.3 Définition de l'huile lubrifiant :

Un lubrifiant – du latin lubricus, signifiant « glissant » – est une substance que l'on insère entre deux surfaces en mouvement relatif afin d'en faciliter le déplacement. Il agit principalement en réduisant le frottement, ce qui diminue l'énergie dissipée sous forme de chaleur et préserve ainsi l'efficacité mécanique des systèmes. Le frottement, dans sa forme la plus élémentaire, se manifeste lorsqu'un corps en mouvement est en contact avec un

autre, et génère une résistance proportionnelle à la force normale qui les maintient ensemble. Cette résistance est caractérisée par le coefficient de frottement, un paramètre sans dimension qui dépend fortement des conditions de contact, des matériaux impliqués, du type de lubrifiant utilisé et de l'environnement opératoire. Selon que le contact s'effectue entre solides ou avec un fluide, on parle respectivement de frottement solide ou fluide. Les effets induits par le frottement incluent une dissipation énergétique, une élévation thermique locale, ainsi qu'une usure mécanique à plus ou moins long terme.

Figure 1 : Représentation schématique du frottement entre deux solides en contact.

Le frottement résulte du contact entre deux surfaces solides soumises à une force normale P . La force de frottement F , opposée au mouvement, est proportionnelle à P et caractérisée par le coefficient de frottement $F/P=f$

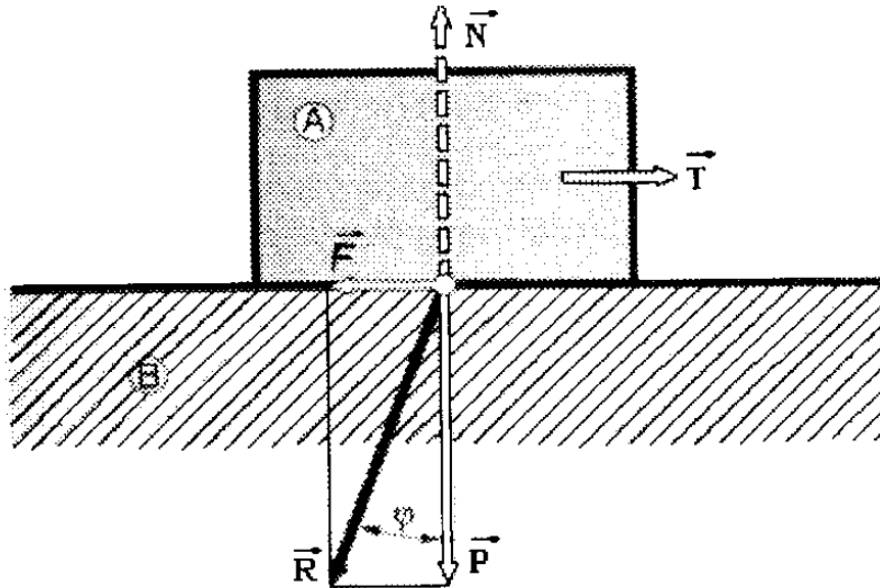


Figure 1 : frottement entre deux solides en contact

1.3 Rôle du lubrifiant :

Au-delà de sa fonction de réduction du frottement, le lubrifiant joue un rôle central dans la préservation, l'efficacité et la longévité des systèmes mécaniques. Il limite l'usure par adhésion, fatigue ou corrosion, tout en assurant une barrière protectrice contre l'humidité et les agents acides. Le lubrifiant agit également comme fluide caloporteur : il absorbe la chaleur générée au sein des pièces en mouvement et la transfère vers l'extérieur lorsqu'il circule dans le système. En parallèle, il améliore l'étanchéité des assemblages, notamment

dans les moteurs à combustion interne où il contribue à minimiser les fuites de gaz et à maintenir la compression. Il assure aussi une fonction de nettoyage interne en capturant les impuretés telles que les suies, poussières, produits de dégradation ou particules métalliques, qu'il transporte vers les dispositifs de filtration. Dans les circuits hydrauliques, il permet la transmission d'énergie. Enfin, le lubrifiant participe à l'absorption des chocs, à la réduction des vibrations, et garantit le démarrage à froid des équipements. Il doit également résister au feu, à l'oxydation, à la contamination biologique et être compatible avec les matériaux présents dans le système.

1.4 L'importance des huiles lubrifiantes :

Les huiles lubrifiantes occupent une place fondamentale dans les secteurs industriels et des transports. En réduisant la friction et l'usure entre les pièces mécaniques en mouvement, elles permettent non seulement d'améliorer l'efficacité énergétique des machines, mais aussi de prolonger leur durée de vie opérationnelle. Cette fonction protectrice est essentielle pour maintenir la fiabilité des équipements, minimiser les pannes, et optimiser les performances dans des conditions de fonctionnement variées. De plus, en assurant des rôles complémentaires tels que le refroidissement, le nettoyage, et l'étanchéité, les lubrifiants contribuent au bon fonctionnement des systèmes complexes, qu'il s'agisse de moteurs, de transmissions, ou d'installations industrielles automatisées.

1.5 Caractéristiques des huiles lubrifiantes :

Les huiles lubrifiantes minérales pour moteurs sont constituées :

- d'une ou d'un mélange d'huiles de base, obtenues après traitement de distillats sous-vide huileux,
- de composés chimiques appelés additifs, en teneur globale très variable, qui permettent d'atteindre les spécifications d'emploi des huiles finies.

Les caractéristiques physico-chimiques d'une huile de base à obtenir sont fonction : - de la nature chimique prépondérante du distillat sous-vide huileux utilisé comme charge (tendance paraffinique, naphénique ou mixte),

- des propriétés, notamment la viscosité, de l'huile finie recherchée,
- des additifs utilisables, puisque l'efficacité de ces derniers peut varier selon la

structure chimique de la charge huileuse ainsi que selon le type de traitement que subit cette dernière.

1.6 Propriétés des huiles lubrifiantes :

L'huile, dont le rôle est de lubrifier les pièces mécaniques internes d'un moteur, est soumise à de nombreuses contraintes d'ordre thermique et mécanique. Ces contraintes, en rapport avec les performances des moteurs à combustion, sont d'autant plus fortes que les températures de fonctionnement des internes sont élevées .

Viscosité-Température : l'utilisation d'un moteur dans une très large gamme de températures (démarrage à froid - température de régime du moteur) impose la nécessité d'employer une huile dont la viscosité varie peu avec la température. La variation maximale de viscosité qui en découle est exprimée, d'une façon empirique, par l'indice de viscosité (VI). Celui-ci sera d'autant plus élevé que l'intervalle de variation de la viscosité sera faible.

Indice de viscosité : l'huile d'excellente qualité si son VI est égal à 100 et plus et celle d'asphaltiques le plus mauvais.

Stabilité à l'oxydation (propriétés anti oxydante) : sous l'action de l'oxygène de l'air et aux températures de fonctionnement du moteur, l'huile de graissage peut s'altérer et provoquer la formation de produits acides volatils corrosifs et de dépôts de carbone. Cette oxydation est favorisée par la température et il convient donc d'assurer au lubrifiant une grande résistance vis-à-vis de la thermo-oxydation. Les hydrocarbures qui s'oxyde difficilement sont les paraffines et les naphthéniques, ceux qui s'oxyde facilement sont les aromatiques, pour cette raison l'huile doit comporter au moins 30% des aromatiques monocycliques et 3 à 5% des aromatiques polycycliques afin de former un écran à l'oxydation ; en plus de cela on ajoute des additifs antioxydants à l'huile de base.

Susceptibilité à la carbonisation Au cours du fonctionnement du moteur, une partie des hydrocarbures se transforme par polycondensation en carbone (coke). Ce dernier peut accélérer l'usure du moteur en se disposant sur les parois du cylindre etc ...elle est caractérisée par l'indice conradson.

Détergence Cette propriété est importante pour l'huile pour maintenir le moteur propre en dispersant puis en évacuant les impuretés obtenues par exemple par décomposition

thermique des hydrocarbures. Cette propriété n'étant pas innée avec l'huile, elle lui est donnée grâce à l'ajout des additifs détergents et dispersants.

Onctuosité Cette propriété est importante lors du démarrage du moteur ainsi qu'au moment où sont exercées de fortes charges sur les pièces frottantes. Donc l'onctuosité caractérise la continuité et la solidité du film graisseux entre les pièces. On améliore cette propriété par des additifs à base de S, Cl, Zn.

Point d'éclair Cette valeur de température peut être une indication précieuse, soit sur la volatilité propre, soit sur l'existence de matières inflammables qui auraient été incorporées à l'huile au cours de service, le point d'éclair varie de 200 à 300°C. **Point de congélation** La congélation d'huile est due à la formation de structures cristallines des hydrocarbures solides. Ces cristaux retiennent la partie liquide dans ces mailles ce qui gêne l'écoulement d'huile.

1.6.1 Couleur :

La coloration anormalement sombre dans une huile lubrifiante est une indication de la présence d'oléfines. Ceux-ci sont indésirables dans les huiles lubrifiantes car ils sont thermiquement instables. Les huiles lubrifiantes sont souvent filtrées à travers un lit d'argile (généralement de bauxite) pour améliorer la couleur. L'hydrotraitement entraîne toujours des huiles lubrifiantes de bonne couleur.

1.7 Classification schématique des lubrifiants :

Les premières huiles utilisées par l'homme provenaient des animaux ou des végétaux (huile de poisson, de foie de morue, d'olive, de maïs,...). Ces huiles sont utilisées en pharmacie et dans l'alimentation. Dans la pratique industrielle courante, on est amené à utiliser trois types de lubrifiants : des liquides, des corps plastiques et des solides.

1.7.1 Les lubrifiants liquides :

1.7.1.1 Les huiles minérales

Elles sont obtenues par raffinage du pétrole brut. Elles subissent des opérations de raffinage plus ou moins poussées qui les débarrassent des corps instables qu'elles contiennent. On leur rajoute fréquemment des additifs qui renforcent certaines de leurs propriétés ou leur confèrent de nouvelles. Elles sont utilisables dans une plage de température très étendue de -40°C à +140°C. Leurs bonnes propriétés générales et leur prix relativement bas font de ces lubrifiants les produits les plus employés dans la pratique.

1.7.1.2 Les huiles de synthèse :

Le qualificatif synthétique résulte de ce que, les produits qui se trouvent à la base de ces huiles sont obtenus par synthèse, c'est-à-dire par réaction chimique entre deux types différents de fluides. Ces fluides synthétiques permettent la lubrification dans une plage de température plus étendue encore, de -70°C à $+250^{\circ}\text{C}$. Leur résistance à l'oxydation est meilleure que celle des huiles minérales mais elles présentent l'inconvénient d'être beaucoup plus chères que celles-ci.

Nous pouvons citer encore parmi les autres types de lubrifiants liquides :

Les huiles (huiles de ricin par exemple) parfois utilisées dans les réducteurs à vis,

Les émulsions : eau/huile et les solutions : eau, alcools, sels, etc....employées dans le travail des métaux par exemple.

1.7.2 Les lubrifiants solides :

Ils ne présentent une action lubrifiante que s'ils sont incorporés à un milieu porteur, par exemple, de l'huile. Ils doivent avoir :

un faible coefficient de frottement,

une grande résistance à la charge,

aucune réaction avec la surface,

aucune dissolution,

une bonne adhérence à la surface.

Nous pouvons citer le graphite, le bisulfure de molybdène (MoS_2). Ces lubrifiants sont très utilisés quand les charges sont très élevées et les vitesses de déplacement très faibles.

1.7.3 Les lubrifiants plastiques :

Ces lubrifiants sont constitués de corps gras d'origine animale ou végétale, de corps gras saponifiés, de gels divers. Parmi ces lubrifiants, on peut citer le savon, les bitumes, les vaselines. Ils sont utilisés respectivement pour le graissage des roulements, pour le garnissage de la denture des engrenages et pour l'imprégnation des câbles afin de les protéger contre la corrosion.

1.8 Compositions chimique des huiles lubrifiant :

Une huile lubrifiante standard se compose généralement de 80% d'huile de base et de 20% d'additifs et parfois des solvants. La combinaison de ces éléments est ajustée en fonction de l'application spécifique du lubrifiant, qu'il s'agisse de moteurs automobiles, d'équipements industriels, d'engrenages.



Figure 2 Principe de composition d'un huile lubrifiante

1.8.1 Les huiles de base :

Il existe quatre groupes d'huile de base lubrifiante :

- Les huiles de base naturelles dérivées d'huiles végétales
- Les huiles de base minérales provenant du pétrole brut
- Les huiles de base synthétiques formulées à partir des composés synthétisés
- Les huiles semi-synthétiques ou partiellement synthétiques

La qualité des huiles de base détermine la performance et les propriétés d'un lubrifiant

8.1.1 Les huiles de base naturelles :

Ce sont des huiles soit d'origine animale, soit d'origine végétale. Parmi les exemples d'huiles végétales, l'huile de ricin, de palme et de colza, tandis que les huiles animales incluent celles du poisson et de laine de mouton.

En général les huiles de base d'origine naturelle sont des combinaisons d'acides gras peu ou pas estérifiées.

Les huiles lubrifiantes issues d'huiles végétales, pour la production des lubrifiants verts ou lubrifiants biodégradables, sont destinées soit à des applications de graissage à l'huile perdue, soit à l'application de matériel hydraulique opérant à l'extérieur, mais présentent peu de contraintes hermétiques. Certaines sont couramment utilisées en addition dans les huiles de pétrole ou dans les graisses

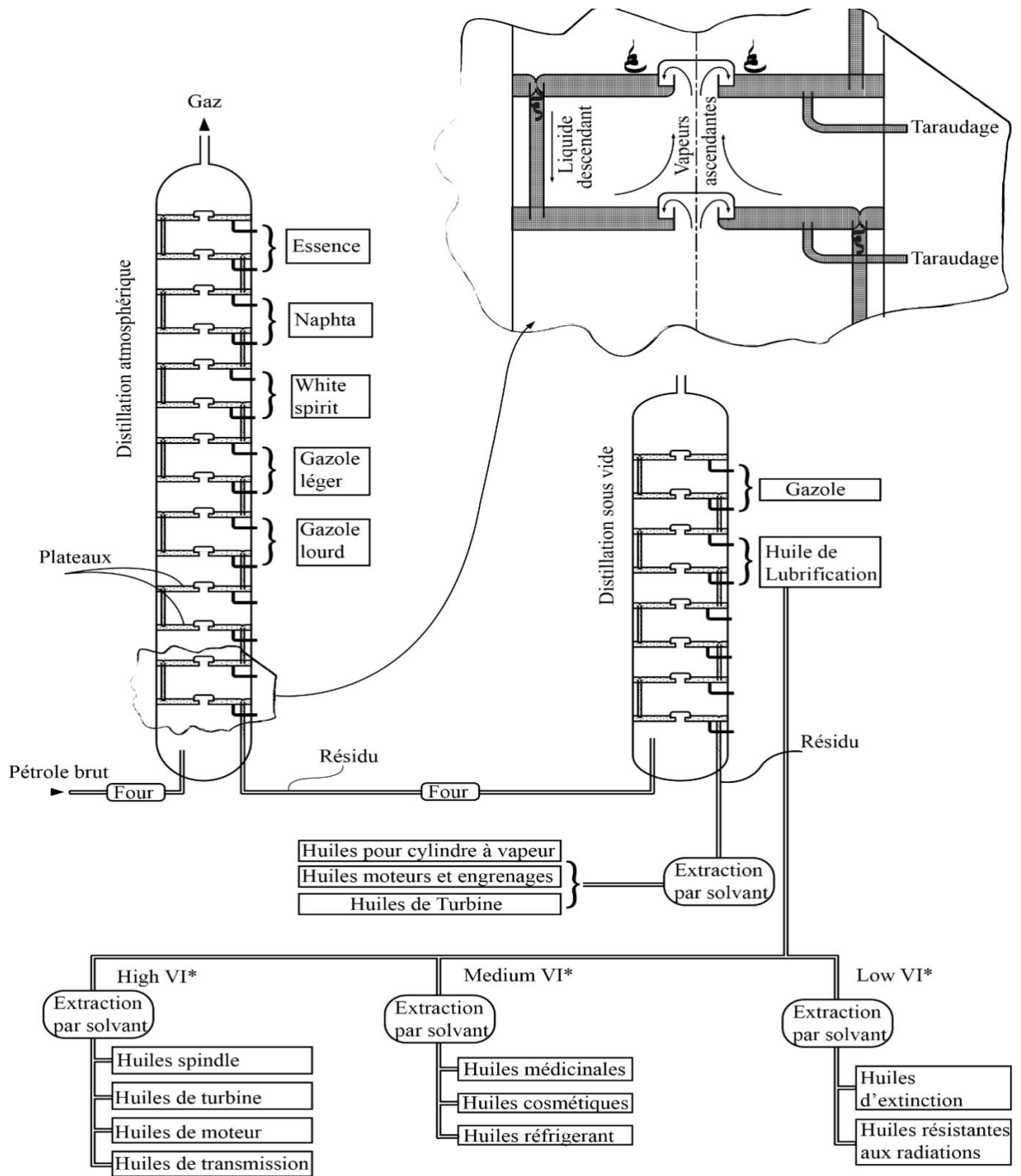
1.8.2 Les huiles de base minérales :

Les huiles de base minérales sont les lubrifiants les plus couramment utilisées dans l'industrie. Elles proviennent de la distillation du pétrole brut.

Selon la Figure 1, l'obtention des huiles de base minérales comporte :

- La séparation des produits pétroliers en fonction de leurs points d'ébullition par distillation atmosphérique du pétrole brut ;
- La distillation sous vide du résidu résultant de la distillation atmosphérique pour obtenir divers distillats ayant des viscosités variées, ainsi que des produits très denses appelés résidu sous vide. Ce dernier est utilisé dans la production de bitumes et d'huiles lubrifiantes à haute viscosité dans l'unité de désasphaltage au propane

Voir Figure suivant :¹



*VI - Viscosity Index (Indice de viscosité)

Figure 3 Diagramme schématique d'un procédé d'obtention des huiles de base

Diagramme schématique d'un procédé d'obtention des huiles de base

Les procédés de raffinage pour l'obtention des huiles lubrifiantes varient selon les sources du pétrole brut, ce qui permet d'avoir plusieurs traitements à la fabrication des différentes huiles minérales pour avoir de différentes qualités d'huile de base .

1.8.2.1 Les huiles de base minérales :

Les huiles minérales sont des mélanges d'un très grand nombre d'hydrocarbures de structures et de masses molaires différentes et d'une petite quantité d'impuretés résiduelles oxygénées, azotées et soufrées. Elles sont distinguées en fonction des proportions relatives des composants paraffiniques, naphthéniques et aromatiques qu'elles contiennent.

- Les paraffines sont des hydrocarbures saturés linéaires (n-paraffines) ou ramifiés (isoparaffines) caractérisés par une assez bonne stabilité à l'oxydation, un indice de viscosité élevé (de l'ordre de 100), une faible agressivité vis-à-vis des élastomères, mais un pouvoir solvant limité et un point de congélation relativement élevé.
- Les naphthènes, hydrocarbures saturés cycliques et souvent ramifiés, sont moins stables à l'oxydation que les précédents, possèdent des indices de viscosité faibles (0 à 60), sont plus agressifs vis-à-vis des élastomères, mais ont un bon pouvoir solvant et possèdent de très bonnes caractéristiques d'écoulement aux basses températures.
- Les aromatiques, produits insaturés cycliques, présentent des caractères encore plus accusés que les naphthènes : très denses, généralement peu stables à l'oxydation, ils sont très agressifs vis-à-vis des élastomères, et leurs indices de viscosité sont très bas ou même négatifs. Compte tenu de ces mauvaises caractéristiques, il est nécessaire de les éliminer au maximum par raffinage. De plus, ces hydrocarbures sont dangereux envers le milieu naturel (toxiques et difficilement biodégradables) et pour la santé des utilisateurs (caractères toxiques et mutagènes).

Donc les huiles de base sont dites à tendance paraffinique, à tendance naphthénique ou à tendance aromatique selon leurs compositions

1.8.2.2 Les huiles de base synthétiques

Les huiles de base synthétiques sont issues de la synthèse chimique, et possèdent parfois des propriétés intéressantes que celles des huiles minérales :

- Un indice de viscosité plus élevé et stable ;

- Une meilleure stabilité thermique ;
- Une meilleure résistance à l'oxydation ;

Ce qui fait que les huiles de base synthétiques offrent des qualités supérieures dans la préservation des performances du moteur et dans l'optimisation de sa durabilité.

Il existe plusieurs familles chimiques à l'origine des bases de synthèse telles que les :

- Hydrocarbures de synthèse
- Esters
- Polyglycols
- Esters-phosphates Phosphates d'alkyles et/ou d'aryles
- Dérivés siliciés
- Polyphénylethers
- Composés organiques halogénés (PCB)

Ces bases peuvent être mélangées avec des additifs spécifiques pour créer des lubrifiants adaptés à différentes applications, telles que les moteurs automobiles, les engrenages industriels, ou d'autres équipements nécessitant une lubrification avancée

1.8.3 Les huiles de base semi-synthétiques :

Les huiles semi-synthétiques sont obtenues par mélange d'huile minérale et d'huile synthétique

1.9 Les additifs:

Les additifs sont des composés chimiques incorporés dans la formulation pour améliorer les propriétés et les performances du lubrifiant. Leurs quantités sont variables selon l'application et sont dosées à des valeurs n'excédant pas 25 % par rapport à l'huile de base afin de permettre au film d'huile d'assurer ses fonctions dans le cadre de la lubrification. Les différents types d'additif les plus utilisés dans la formulation des lubrifiants sont regroupés dans le Tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : Modifications chimiques dans les huiles lubrifiantes usagées²

Additif	Action	Exemples
Modificateurs de viscosité	Ajustent la viscosité du lubrifiant, assurant un comportement optimal à différentes températures	<ul style="list-style-type: none"> Le PMA ou polyacrylate de méthyle, un solide caoutchouteux blanc à température ambiante L'OCP ou copolymères d'oléfines
Anti usure (AU)	Réduire les couples de frottement et par conséquent économiser l'énergie.	<ul style="list-style-type: none"> Les Dithiocarbamates Le zinc dialkyldithiophosphate Les phosphates organophosphorés Les composés organométalliques à base de bore

Tableau 2 : Modifications chimiques dans les huiles lubrifiantes usagées²

Agent dispersant	Maintiennent les particules en suspension pour éliminer toutes les impuretés qui se forment quand un moteur fonctionne	Les esters succiniques ou les alkénylsuccinimides
Inhibiteurs de corrosion et antirouille	Protègent les surfaces métalliques de la corrosion	<ul style="list-style-type: none"> Les sulfonates Les phosphates d'amines Les dérivés du benzotriazole, etc.
Anti mousse	Évite et empêche l'émulsion à une présence en quantité importante d'eau dans l'huile	<ul style="list-style-type: none"> Les silicones
Antioxydants	Prévient la dégradation du lubrifiant due à l'oxydation ;	<ul style="list-style-type: none"> Les phénols substitués comme le dibutyle tertiaire paracrésol (ou BHT) qui réagit avec les radicaux peroxy R-C-O-O. Les amines comme la N-butyldiéthanolamine (BDEA)

1.10 Mécanismes de détérioration chimique :

Les huiles lubrifiantes usagées subissent une détérioration chimique en raison de plusieurs facteurs, notamment :

* Oxydation : Les huiles réagissent avec l'oxygène de l'air, formant des acides et des dépôts.

* Décomposition thermique : les molécules d'huile sont décomposées par une chaleur élevée.

* Hydrolyse : l'huile réagit avec l'eau, ce qui entraîne la formation d'acide et la corrosion.

1.11 Effet des contaminants :

La contamination des huiles lubrifiantes par de l'eau, des minéraux et des particules solides accélère le processus de dégradation chimique et de détérioration des propriétés de l'huile.

1.12 Formation de sous-produits :

À la suite de réactions chimiques dans les huiles lubrifiantes usagées, des sous-produits, tels que des acides, des dépôts et des vernis, se forment, qui affectent négativement les performances de l'huile.

1.13 Analyse des huiles lubrifiantes usagées :

* Importance de l'analyse : L'analyse des huiles lubrifiantes usagées permet de déterminer l'état de l'huile, de prédire ses performances futures et de détecter tout problème dans l'équipement.

1.14 Méthodes d'analyse :

Diverses méthodes d'analyse sont utilisées pour évaluer les propriétés des huiles lubrifiantes usagées, notamment :

* Analyse spectrale : utilisée pour déterminer le type et la quantité de contaminants et de métaux dans l'huile.

* Viscosité : Mesure la résistance de l'huile à l'écoulement.

* Acidité : Détermine la quantité d'acides formés dans l'huile.

* Autres méthodes : inclure l'indice de basicité total, le point d'éclair et la teneur en eau.

* Informations pouvant être obtenues : L'analyse des huiles lubrifiantes usagées fournit des informations précieuses sur le type d'huile, l'état de l'huile, la présence de contaminants, le taux d'usure et d'autres indicateurs qui aident à prendre des décisions appropriées concernant l'entretien de l'équipement.

1.15 Applications des huiles lubrifiantes usagées :

* Recyclage : Les huiles lubrifiantes usagées peuvent être recyclées après avoir été traitées pour éliminer les contaminants et restaurer leurs propriétés.

* Autres utilisations : Les huiles lubrifiantes usagées peuvent être utilisées dans la production d'énergie, les matériaux de construction et d'autres applications.

* Impact environnemental : L'élimination incorrecte des huiles lubrifiantes usagées présente un risque pour l'environnement, car elles peuvent contaminer le sol et l'eau.

Conclusion

Comprendre la composition chimique des lubrifiants usagés est essentiel pour évaluer leur état et prédire leurs performances.

Les changements chimiques qui se produisent dans les huiles lubrifiantes usagées affectent leurs performances et provoquent une détérioration de leurs propriétés.

L'analyse des huiles lubrifiantes usagées permet de prendre des décisions appropriées quant à leur entretien ou leur recyclage, ce qui contribue à préserver l'environnement et à réduire les coûts.

Chapitre II

La régénération des huiles usagée

2.1 Introduction

Les huiles lubrifiantes usagées sont un problème environnemental majeur en raison de leur toxicité et de leur impact sur les sols, l'eau et l'air. Le recyclage de ces huiles est donc essentiel pour réduire la pollution et préserver les ressources naturelles. Cet article présente les méthodes modernes de recyclage des huiles lubrifiantes usagées, en détaillant leurs principes, leurs coûts et la qualité des produits finaux obtenus.

2.2 Danger des huiles usagées (risques pour l'homme et l'environnement):

Malgré leur valeur calorifique élevée, équivalente à environ 90% de celle du fuel lourd, faisant des huiles usagées une source d'énergie envisageable, leur combustion dans des conditions non optimales représente un danger significatif pour l'environnement et la santé. La combustion à basse température génère des composés chimiques nocifs, notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des substances à l'effet cancérigène avéré. La présence de chlore dans ces huiles exacerbe ce danger, entraînant l'émission d'acide chlorhydrique gazeux si les fumées ne sont pas traitées. De surcroît, le chlore peut réagir avec les composés aromatiques pour former des substances extrêmement dangereuses telles que les polychlorobiphényles (PCB) et les dioxines, particulièrement en présence de phénols. La dégradation des phtalates à basse température contribue également à la formation d'anhydride phtalique et de HAP, des composés connus pour leur toxicité et leurs propriétés mutagènes. Ces conséquences négatives soulignent la nécessité impérieuse d'une manipulation précautionneuse et d'une élimination des huiles usagées par des procédés scientifiques contrôlés.

2.3 L'importance de l'analyse de l'huile en service :

Étant donné que l'huile et le moteur sont étroitement liés, la vitesse à laquelle un lubrifiant se détériore est directement affectée par les conditions de fonctionnement du moteur. C'est pourquoi des analyses régulières de l'huile lubrifiante fournissent des indications non seulement sur son propre état, mais aussi sur celui du moteur et de ses composants essentiels. En effet, durant son utilisation, l'huile accumule diverses impuretés, notamment : de l'eau, qu'elle soit libre ou liée chimiquement, des produits résultant de l'oxydation, et des particules de carbone issues d'une combustion partielle de l'huile elle-même. Par

conséquent, le lubrifiant en service s'use progressivement et, passé un certain point, ne peut plus remplir adéquatement les nombreuses fonctions qui lui sont confiées. Cependant, il est important de noter qu'un lubrifiant ne perd jamais subitement ses propriétés lubrifiantes ; la diminution de l'efficacité des additifs et la contamination de l'huile sont des processus qui se déroulent lentement.

2.4 Recyclage des Huiles Usagées (Différentes Méthodes) :

Voici différentes méthodes utilisées pour le recyclage des huiles usagées :

a. Régénération par Distillation sous Vide et Finition à l'Argile :

Ce procédé de régénération produit une huile de base à laquelle des additifs sont ajoutés pour créer de nouvelles huiles. Cette méthode est fréquemment employée pour les huiles claires.

b. Incinération avec Récupération d'Énergie :

Cette méthode consiste à brûler les huiles usagées avec récupération de l'énergie sous forme d'électricité ou de chaleur. Elle peut également être utilisée comme combustible de substitution dans les cimenteries. Cette approche est souvent appliquée aux huiles noires.

c. Incinération par Évaporation :

Cette technique, utilisée pour les huiles solubles, implique l'évaporation de l'eau suivie de l'incinération des résidus huileux. L'énergie est également récupérée sous forme d'électricité ou de chaleur.

2.4.1 Méthode de valorisation (le brûlage simple) :

Le brûlage simple des huiles usagées, encore trop courant dans des installations de chauffage rudimentaires, représente une pratique dangereuse en raison du risque d'explosion qu'elle engendre. De plus, elle est fortement nocive pour l'environnement, libérant dans l'atmosphère des quantités considérables de substances préjudiciables.

2.4.2 L'incorporation d'huiles usagées dans le fuel lourd pour la combustion :

Conscients des dangers et de la nocivité du brûlage pur des huiles usagées, certains ont envisagé de les mélanger en très faible proportion au fuel lourd. Bien que ce mélange, réalisé avec un dosage minime, puisse conférer au combustible des caractéristiques proches des normes établies pour le fuel lourd, il ne s'agit que d'une dissimulation. La dilution ne réduit en aucun cas la quantité de métaux rejetés lors de la combustion.

2.4.3 Brûlage propre des huiles usagées (une technologie respectueuse de l'environnement) :

L'unique manière de brûler les huiles usagées sans impacter négativement l'atmosphère réside dans un prétraitement rigoureux. Avant toute utilisation comme combustible, cette étape préparatoire doit être approfondie, s'apparentant de fait à un véritable processus de régénération. Ce prétraitement implique nécessairement :

- Un traitement à l'acide sulfurique ou l'utilisation d'un solvant approprié.
- Une centrifugation à chaud après déshydratation et distillation, ou le recours à des techniques encore plus complexes.

2.5 Les procédés de régénération :

2.5.1 La collecte :

La collecte constitue l'étape initiale et déterminante du processus de régénération, car une sélection rigoureuse en amont améliore directement la qualité du recyclage. En optant pour une collecte sélective des huiles usagées, on préserve deux propriétés essentielles—le point de congélation et l'indice de viscosité—ce qui permet d'appliquer des traitements de régénération plus efficaces et quasi universels, favorisant ainsi une valorisation optimale des déchets huileux.

2.5.2 La régénération des huiles usagées (Procédés et étapes clés) :

Les huiles usagées présentent des propriétés similaires, notamment en termes de **point de congélation** et d'**indice de viscosité**, mais elles contiennent également des contaminants (composés chlorés, oxydés, résidus d'additifs, impuretés en suspension et particules métalliques issues de l'usure des moteurs). Une **régénération efficace** doit donc intégrer plusieurs étapes pour éliminer ces impuretés et restaurer les propriétés de l'huile . La régénération des huiles usagées repose sur une **succession d'étapes** (distillation, purification, raffinage) permettant d'éliminer les contaminants tout en préservant les propriétés essentielles de l'huile. Le choix des procédés dépend des impuretés présentes et des contraintes économiques et techniques.

2.5.2. Première étape (Distillation douce) :

Cette étape initiale, commune à la plupart des procédés de régénération, vise à éliminer

- **L'eau** (2 à 4%)
- **Les hydrocarbures légers** (essence, solvants, 1 à 2%)
- **Le glycol** et certains **dérivés d'additifs**

2.5.2.2 Deuxième étape (Purification physique) :

Plusieurs méthodes peuvent être employées pour éliminer les impuretés en suspension :

2.5.2.2.1 La distillation sous vide :

Historiquement utilisée après un traitement à l'acide sulfurique, cette technique permet de séparer l'huile en fractions légères, moyennes et visqueuses. Aujourd'hui, elle sert surtout à maximiser l'extraction d'huile purifiée.

2.5.2.2.2 La clarification au solvant(propane ou butane) :

Développée par l'IFP, cette méthode (coûteuse mais efficace) utilise 10 à 15 % de solvant et est particulièrement adaptée aux résidus de distillation sous vide.

2.5.2.2.3 L'ultrafiltration :

Basée sur une **filtration tangentielle**, cette technique exige des conditions opératoires strictes (haute pression, vitesse de circulation élevée) et un prétraitement pour éviter le colmatage des membranes.

2.5.2.2.4 La floculation :

Certains procédés utilisent des **agents déstabilisants** (en phase aqueuse ou alcaline) pour séparer les contaminants par centrifugation ou distillation sous vide poussé.

2.5.2.3 Troisième étape :

L'huile purifiée doit subir un dernier traitement pour éliminer les résidus solubles, oxydés ou azotés et atteindre les standards d'une huile de base vierge (couleur, indice d'acide, etc.). Deux approches sont possibles :

Avec distillation sous vide préalable :

Traitement à l'acide sulfurique (2-3%) + terre (3%)

Ou terre seule (8-10%) (moins efficace)

Sans distillation sous vide :

Acide sulfurique (4-5%) + terre (3%)

Ou hydrogénation catalytique renforcée

La régénération des huiles usagées repose sur une **succession d'étapes** (distillation, purification, raffinage) permettant d'éliminer les contaminants tout en préservant les

propriétés essentielles de l'huile. Le choix des procédés dépend des impuretés présentes et des contraintes économiques et techniques.³

2.5.3 Quelques procédés Industriels de régénération :

2.5.3.1 Le procédé meinken à l'acide et à la terre :

Procédé de régénération par traitement acide-terre

Le schéma illustré par la **figure** décrit une méthode classique de régénération des huiles usagées, basée sur un **traitement combiné acide sulfurique et terre décolorante**. Ce procédé comprend plusieurs phases thermiques et chimiques clés :

1. Prétraitement thermique

- L'huile usagée est d'abord **chauffée entre 160 et 180°C** sous pression atmosphérique pour éliminer les composés volatils et améliorer sa stabilité.
- Après déshydratation, elle est **refroidie à environ 30°C** avant l'ajout d'acide sulfurique.

2. Traitement à l'acide sulfurique et décantation

- L'huile est mise en contact avec **l'acide sulfurique**, provoquant la précipitation des impuretés (résidus oxydés, soufrés, composés polaires).
- La phase de **décantation (environ 24 heures)** permet la séparation des boues acides.

3. Adsorption sur terre activée

- L'huile décantée est ensuite **mélangée à de la terre décolorante** (bentonite ou terre activée).
- Le mélange est injecté dans un **réacteur à haute température (270°C)**, où les dernières impuretés (gouttelettes d'acide résiduelles, acides sulfoniques, produits oxydés) sont **adsorbées sur la terre**

4. Séparation et récupération des fractions

- En tête de colonne : Les fractions légères (huile légère et gasoil) sont récupérées.
- Au fond du ballon : L'huile régénérée est **refroidie à 120°C**, puis filtrée pour éliminer les résidus de terre et obtenir une huile épurée.

Avantages et limites du procédé

- ✓ Efficace pour éliminer les contaminants polaires et les composés soufrés.
- ✓ Restaure les propriétés physico-chimiques de l'huile (couleur, stabilité).
- Génère des déchets acides (boues sulfuriques) nécessitant une élimination appropriée.
- Coûts énergétiques élevés en raison des étapes thermiques intensives.

Ce procédé, bien que progressivement remplacé par des méthodes plus écologiques (comme l'hydrotraitement), reste une référence dans la régénération traditionnelle des huiles usagées.⁴

Voir Figure suivant :

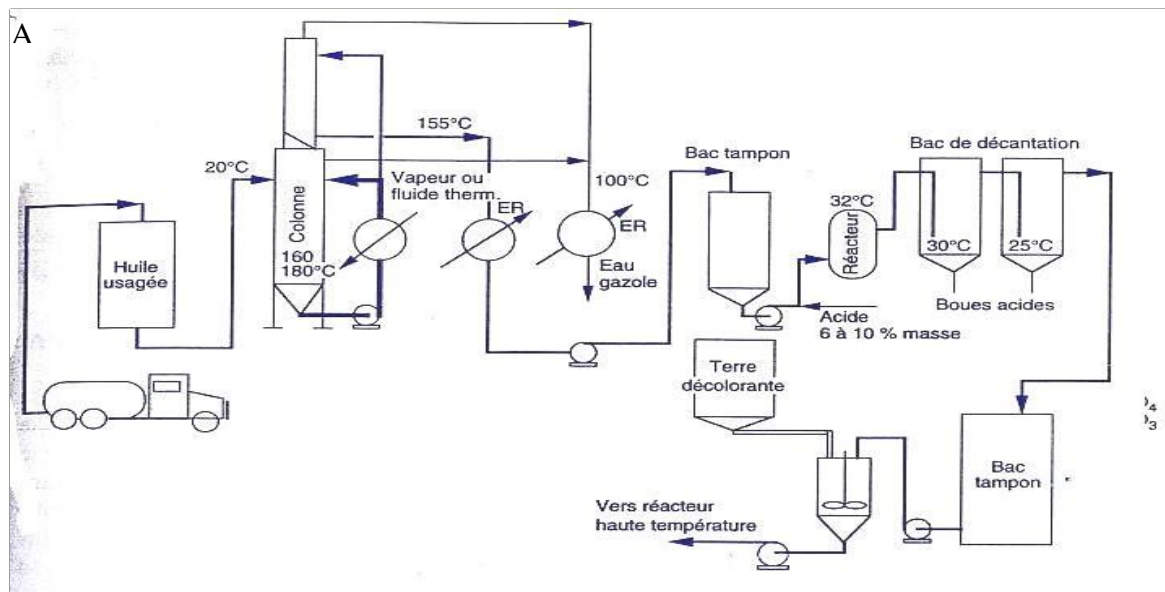


Figure 4 : Le procédé MEINKEN. .A. Section déshydratation et action de l'acide sulfurique.

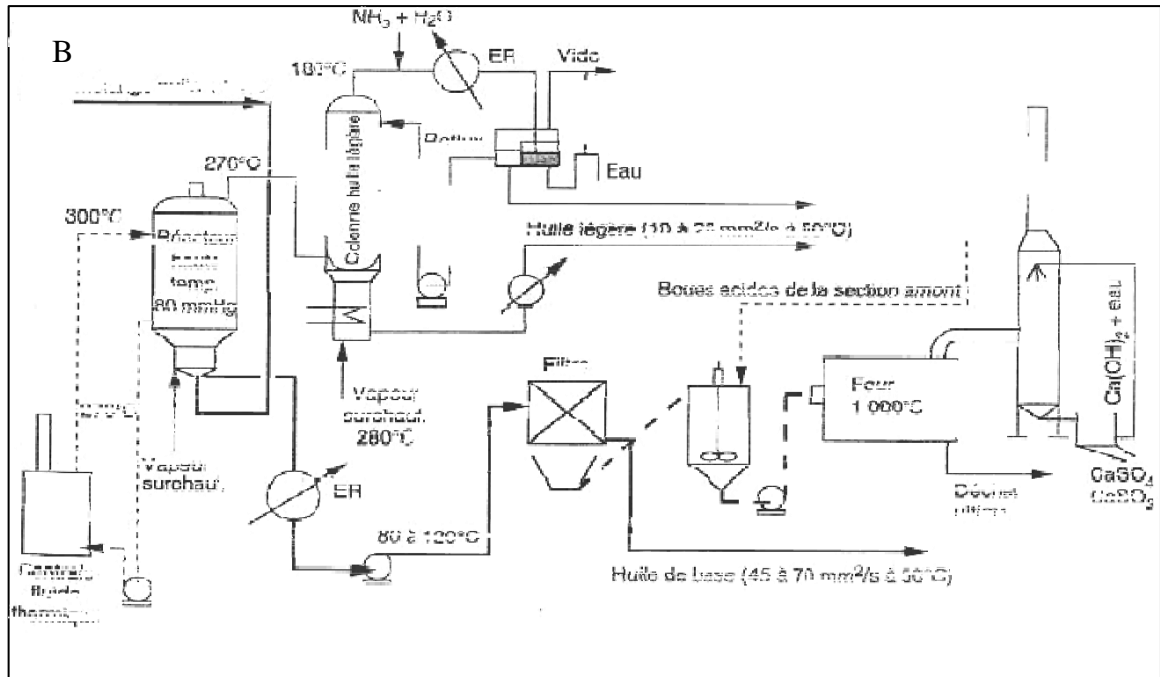


Figure 5 : Le procédé MEINKEN. . B. Section contact terre haute température

2.5.3.2 Le procédé Revivoil :

Ce procédé innovant associe deux expertises complémentaires :

1. **La technologie de distillation sous vide (TDA) de Viscolub** pour l'élimination des asphaltènes
2. **Le savoir-faire de l'IFP** en raffinage catalytique et traitement des huiles

Ce procédé hybride illustre la tendance du secteur à combiner purification physique et traitement catalytique, pour concilier efficacité et respect de l'environnement. L'investissement de Viscolube dans la catalyse marque une étape clé vers des méthodes de régénération plus propres et durables.

1. Étape de Thermal DeAsphalting (TDA) :

- **Conditions opératoires :**
 - Distillation sous **vide poussé (15 Torr absolus)**
 - Utilisation d'une **colonne à garnissage haute efficacité**
- **Objectif :**
 - Éliminer les **asphaltènes** et autres résidus lourds après déshydratation et décantation préalable

2. Raffinage sur terre décolorante (alternative à l'acide sulfurique) :

- **Substitution de l'acide sulfurique :**
 - Pour des raisons environnementales, l'acide est remplacé par **7 à 8 % de terre décolorante** (ex. bentonite)
- **Optimisation du procédé :**
 - **Température élevée (275°C)** pour améliorer l'adsorption des impuretés (colorants, oxydes, résidus polaires)
 - Refroidissement avant **filtration sur filtres-presses**

3. Transition vers le raffinage catalytique (innovation Viscolube) :

- **Évolution technologique :**
 - Investissement dans un **traitement catalytique** (hydrogénation ou procédé IFP) pour remplacer la terre

- Avantages attendus :
 - Réduction des déchets solides (boues de terre)
 - Meilleure qualité d'huile régénérée (stabilité, couleur)
 - Processus plus durable (moins énergivore et sans produits chimiques agressifs)

Avantages clés du procédé

- Élimination efficace des asphaltènes par TDA
- Abandon de l'acide sulfurique (solution plus écologique)
- Optimisation thermique pour une décoloration performante
- Transition verte vers le raffinage catalytique (futur standard industriel)

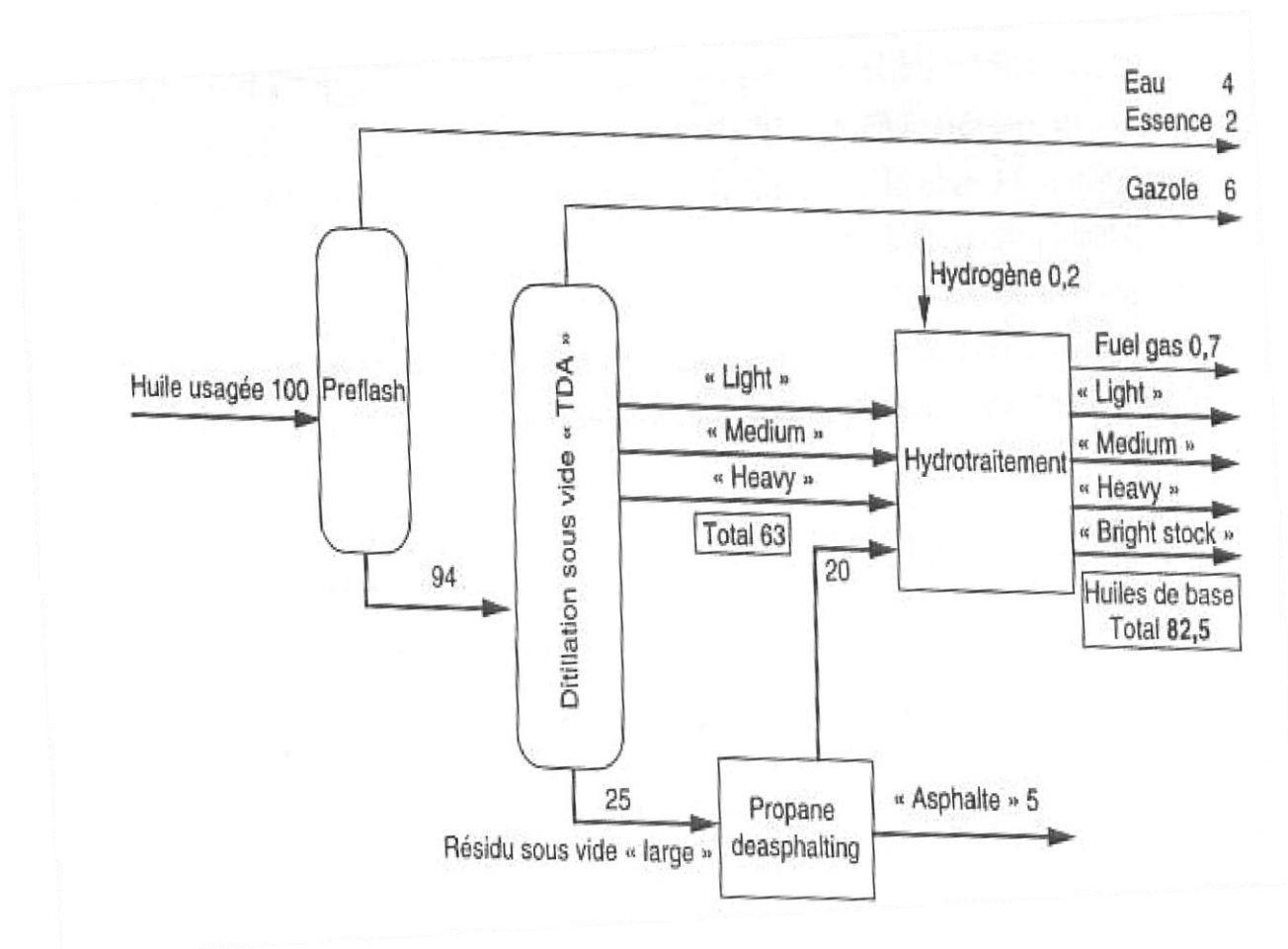


Figure 6 : Schéma général optimisé du procédé REVIVOIL⁵

2.5.3.3 Le procédé Zimmark :

Technologie de régénération décentralisée

La société canadienne **Zimmark Inc.** a développé une **solution mobile de régénération d'huiles lubrifiantes usagées**, permettant un traitement **directement sur les lieux de production**. Son procédé repose sur une **précipitation chimique** efficace pour éliminer :

- Les contaminants accumulés (résidus métalliques, particules, oxydes)
- Les déchets issus des huiles de moteurs diesel après utilisation prolongée

Cette technologie d'économie circulaire répond aux enjeux de :

- Réduction des déchets (moins de transport, moins de rejets).
- Autonomie des sites industriels (traitement in situ).
- Compétitivité via des coûts maîtrisés.

Avantages économiques et environnementaux

- Économies significatives :
 - 0,50 CAN par litre *re'cupe're'* (soit *500000 CAN par litre re'cupe're'* (soit *500000 CAN* par an pour 1 million de litres traités).
 - Réduction de l'empreinte énergétique : Économie de 12,6 MJ par litre comparé à la production d'huile neuve.
- Déploiement industriel :
 - 11 installations actives au Canada, traitant 1,2 million de litres/an.
 - Présence internationale : États-Unis, Mexique, Asie.

Cas concret : Canadian National (CN)

- 6 unités Zimmark en service pour le groupe ferroviaire.
- Optimisation des coûts : Réduction des frais d'élimination et d'achat d'huile neuve.

Zimmark Inc. positionne le Canada comme leader dans la régénération mobile d'huiles usagées.

2.6 Méthodes modernes de traitement des huiles usagées :

Il existe plusieurs méthodes modernes de recyclage des huiles lubrifiantes usagées, et chaque méthode vise à éliminer les contaminants et à restaurer les propriétés de l'huile pour la rendre réutilisable.

Voici quelques-uns des moyens les plus importants :

2.6.1 Filtration et séparation physique :

Il repose sur l'élimination des impuretés solides et de l'eau à l'aide de filtres et de sédimentation gravitationnelle.

Convient aux huiles n'ayant pas subi de détérioration chimique significative.

1. Résumé du processus :

La filtration et la séparation physique sont les méthodes les plus simples et les plus courantes de recyclage des huiles lubrifiantes usagées. Elles consistent à éliminer les impuretés solides (particules métalliques, poussières, etc.) et l'eau de l'huile usagée par des techniques telles que la décantation, la centrifugation et la filtration à travers différents types de filtres.

2. Coût :

Le coût de la filtration et de la séparation physique est relativement faible, ce qui en fait une méthode accessible pour de nombreuses entreprises et particuliers.

3. Qualité du produit final et possibilités pratiques :

Les huiles lubrifiantes recyclées par filtration et séparation physique sont généralement de qualité inférieure à celle des huiles neuves. Elles peuvent être utilisées pour des applications moins exigeantes, telles que la lubrification de machines industrielles ou agricoles

2.6.2 Distillation sous vide :

L'huile est chauffée dans un environnement sous vide pour séparer ses composants à des températures relativement basses.

Aide à restaurer les huiles de base de haute qualité.

1. Résumé du processus :

La distillation sous vide est une méthode plus avancée qui permet de séparer les différentes fractions d'hydrocarbures de l'huile usagée en fonction de leur point d'ébullition. Ce processus se déroule à des températures élevées et sous vide pour éviter la décomposition thermique des hydrocarbures.

2. Coût :

Le coût de la distillation sous vide est plus élevé que celui de la filtration et de la séparation physique, en raison de la complexité de l'équipement et des besoins énergétiques importants.

3. Qualité du produit final et possibilités pratiques :

Les huiles lubrifiantes recyclées par distillation sous vide sont de meilleure qualité que celles obtenues par filtration et séparation physique. Elles peuvent être utilisées pour des applications plus exigeantes, telles que la lubrification de moteurs automobiles.

2.6.3 Traitement à l'acide et à l'argile (Traitement Acide-Argile) :

Les acides sont utilisés pour éliminer les composés indésirables, puis les contaminants restants sont absorbés à l'aide d'argile activée.

Une méthode traditionnelle, mais qui produit des déchets acides qui nécessitent un traitement particulier.

1. Résumé du processus :

Le traitement à l'acide et à l'argile est une méthode chimique qui consiste à utiliser de l'acide sulfurique pour éliminer les impuretés et les produits de dégradation de l'huile usagée, puis à utiliser de l'argile pour adsorber les résidus acides et les autres contaminants.

2. Coût :

Le coût du traitement à l'acide et à l'argile est relativement élevé, en raison de l'utilisation de produits chimiques et de la production de déchets acides qui nécessitent un traitement spécifique.

3. Qualité du produit final et possibilités pratiques:

Les huiles lubrifiantes recyclées par traitement à l'acide et à l'argile sont de qualité variable, en fonction des conditions de traitement et de la qualité de l'huile usagée de départ. Elles peuvent être utilisées pour certaines applications industrielles, mais leur utilisation est de plus en plus limitée en raison des préoccupations environnementales liées à la production de déchets acides.

2.6.4 Hydrotraitement :

Faire passer l'huile à travers l'hydrogène à des températures et pressions élevées à l'aide de catalyseurs métalliques.

Fournit des huiles de haute qualité comparables aux huiles neuves.

1. Résumé du processus :

L'hydrotraitement est une méthode avancée qui consiste à traiter l'huile usagée avec de l'hydrogène en présence d'un catalyseur. Ce processus permet d'éliminer les impuretés, les produits de dégradation et les métaux lourds de l'huile usagée, tout en améliorant sa qualité et sa stabilité.

2. Coût :

Le coût de l'hydrotraitement est élevé, en raison de la complexité de l'équipement, des besoins énergétiques importants et de l'utilisation de catalyseurs coûteux.

3. Qualité du produit final et possibilités pratiques :

Les huiles lubrifiantes recyclées par hydrotraitement sont de très haute qualité, comparable à celle des huiles neuves. Elles peuvent être utilisées pour toutes les applications, y compris la lubrification de moteurs automobiles.

2.6.5 Extraction par solvant :

Utilisez des solvants pour séparer les contaminants et les composés indésirables.

Il contribue à améliorer la pureté et la qualité de l'huile.

1. Résumé du processus :

L'extraction par solvant est une méthode qui consiste à utiliser un solvant pour séparer les différentes fractions d'hydrocarbures de l'huile usagée. Ce processus permet d'éliminer les impuretés et les produits de dégradation, tout en préservant la structure chimique des hydrocarbures.

2. Coût :

Le coût de l'extraction par solvant est élevé, en raison de l'utilisation de solvants coûteux et de la nécessité de récupérer et de recycler ces solvants.

3. Qualité du produit final et possibilités pratiques :

Les huiles lubrifiantes recyclées par extraction par solvant sont de bonne qualité, mais leur utilisation est limitée en raison des préoccupations environnementales liées à l'utilisation de solvants.

2.6.6 Bioremédiation :

Utiliser des bactéries ou des champignons pour décomposer certains contaminants présents dans l'huile.

Une technologie respectueuse de l'environnement mais encore en développement.

1. Résumé du processus :

La bioremédiation est une méthode innovante qui consiste à utiliser des micro-organismes (bactéries, champignons) pour dégrader les hydrocarbures et les autres contaminants présents dans l'huile usagée. Ce processus est respectueux de l'environnement, mais il est encore en développement et son efficacité dépend de nombreux facteurs (type de micro-organismes, conditions environnementales, etc.).

2. Coût :

Le coût de la bioremédiation est variable, en fonction des conditions de traitement et de la complexité du processus.

3. Qualité du produit final et possibilités pratiques :

Les huiles lubrifiantes recyclées par bioremédiation sont de qualité variable, en fonction de l'efficacité du processus. Cette méthode est prometteuse pour l'avenir, mais elle nécessite encore des recherches et des développements pour être appliquée à grande échelle.

Conclusion

Le recyclage des huiles lubrifiantes usagées est un enjeu environnemental majeur. Les méthodes modernes de recyclage présentées dans cet article offrent des solutions efficaces pour réduire la pollution et préserver les ressources naturelles. Le choix de la méthode de recyclage dépend de nombreux facteurs, tels que le coût, la qualité du produit final

souhaitée et les préoccupations environnementales. Il est important de continuer à investir dans la recherche et le développement de nouvelles technologies pour améliorer l'efficacité et la durabilité du recyclage des huiles lubrifiantes usagées.

2.7 Huiles régénérées :

Ce sont des huiles de récupération (vidange moteurs) qui retournent sur le marché après un traitement souvent sommaire. Elles posent un problème important car leur tonnage est loin d'être négligeable. Leur structure est identique aux huiles pétrolières avec une concentration plus importante en polyaromatiques (enrichissement dû à l'utilisation à chaud dans les moteurs)

2.7.1 Les types des huiles usagées :

A. Les huiles usagées claires :

D'origine industrielle et légèrement détériorées à l'usage .

les huiles claires provenant des transformateurs, des circuits hydrauliques et des turbines

Elles sont peu contaminées et chargées en général d'eau et de particules

B. Les huiles usagées noires :

Sont les huiles qui proviennent généralement de la lubrification automobile, elles sont obtenues par un mélange des résidus lourds .

Qui comprennent les huiles moteurs (essence et gasoil)

2.8 Récupération des huiles usées :

L'utilisation de lubrifiants, indispensable à tout travail mécanique, génère le plus souvent des huiles usées qui sont des produits pétroliers visqueux au cours de l'utilisation ces huiles se dégradent après un certain temps, par l'influence des différents types de contaminants. Elles considèrent comme des déchets dangereux pouvant avoir un impact négatif sur la santé humaine et l'environnement, mais également pouvant être traitées et réutilisées comme huile de base ou simplement comme combustible dans certaines industries dans le but de réduire la quantité des huiles usées, et protéger l'environnement et la santé humaine

2.8.1 Méthodes de récupération des huiles usées :

Le processus de recyclage des huiles lubrifiantes usagées comporte plusieurs étapes, dont la collecte et le traitement, qui peuvent être mises en œuvre à l'aide de plusieurs méthodes (telles que la régénération par distillation sous vide ou le traitement par filtration/boues).

A. La méthode de régénération ou re-raffinage :

Consiste à refabriquer une huile de base semblable aux huiles neuves où les installations de régénération sont de véritables petites raffineries

B. La méthode de valorisation :

La valorisation énergétique est l'une des possibles voies d'application des huiles usées. Elle prévoit de brûler ces déchets pour l'obtention de la chaleur qu'est l'application la plus courante, particulièrement dans les cimenteries, les raffineries, etc.

2.8.2 Étapes de récupération des huiles usées :

Les processus ayant pour objectif la minimisation à la source sont basés sur les étapes suivantes

A. Distillation sous vide :

Phase de déshydratation et de dégazage, ce qui élimine également d'autres polluants volatiles.

B. Ultrafiltration :

Cette étape est une Phase dans laquelle huile usée est soumise à des processus de sédimentation et de filtration afin d'éliminer les particules métalliques et les autres solides présents dans l'huile.

C. Ré- addition :

Tout au long de ce processus, on incorpore des additifs afin d'obtenir de l'huile propre, aux caractéristiques désirées. Avant l'introduction de l'huile dans le système, on effectue des analyses chimiques, afin de connaître l'état de l'huile usée, et donc de pouvoir définir l'intensité de traitement et l'addition à mettre en place pour obtenir les caractéristiques finales désirées.

Tableau 3 : Composés polluants des huiles usées

Polluants	Exemples	Source
Hydrocarbures aromatiques polynucléaires	/	Pétrole-base lubrifiante
Hydrocarbures aromatiques Mononucléaires	Alkyl benzènes	Pétrole-base lubrifiante
Hydrocarbures aromatiques di-nucléaires	Naphtalènes	Pétrole-base lubrifiante
Hydrocarbures chlorés	Trichloréthylène	Utilisation huile polluée
Métaux	Baryum Aluminium Plomb	Dans les additifs Dans les moteurs Dans le combustible

2.9 Utilisation des huiles :

A l'exception des huiles blanches, des huiles de trempe, des huiles diélectriques, c'est le pouvoir lubrifiant qui fait en général leur intérêt. Cependant, il leur est souvent demandé d'autres qualités qui nécessitent d'ailleurs l'emploi d'additifs divers

A. Huiles blanches :

Bien que les plus élaborées actuellement, ce sont paradoxalement les plus anciennement connues: elles étaient déjà employées comme laxatif trois siècles avant J.C. En fait, d'origine minérale, elles se purifiaient par l'équivalent d'une chromatographie à travers les couches souterraines et suintaient le long de parois rocheuses

B. Huiles moteurs :

Ce sont des huiles de graissage, mais dont le rôle réfrigérant est tout aussi important. Elles doivent être suffisamment fluides à basse température (démarrage) tout en restant visqueuses à température plus élevée

C. Huiles d'usinage :

Elles comprennent les huiles de coupe, de brochage, de taraudage.

CHAPITRE III

ETUDE DE REVUES SIENTIFICES

3.1 Introduction

La protection de l'environnement et la lutte contre la pollution représentent aujourd'hui un véritable défi. Parmi les principales sources de pollution figurent les huiles de lubrification usagées, qu'il est impératif d'éliminer de manière respectueuse de l'environnement.

Dans ce cadre, nous avons étudié trois articles traitant des méthodes de recyclage de ces huiles comme les suivants.

Premier article : Refining and Reuse of Waste Lube Oil in SI Engines: A Novel Approach for a Sustainable Environment

Préparé par : Muhammad Usman, Muhammad Kashif Jamil, Fahid Riaz, Haris Hussain, Ghulam Hussain, Muhammad Haris Shah, Muhammad Abdul Qyyum, Chaudhary Awais Salman et Moonyong Lee

Deuxième article : Experimental assessment of regenerated lube oil in spark-ignition engine for sustainable environment

Préparé par : Muhammad Usman, Syed Saqib, Syed Wasim Hassan Zubair, Muneeb Irshad, Ammar Hussain Kazmi, Ahmed Noor, Hafiz Umer Zaman, Zaheer Nasir et Muhammad Ali Ijaz Malik

Troisième article : Regeneration of Waste Lubricant Oil by Extraction–Flocculation Composite Refining

Préparé par : Xin Yang, Ligong Chen, Shuo Xiang, Liang Li et Di Xia

Le premier article a utilisé la méthode d'extraction, de même que le deuxième. Quant au troisième article, il a eu recours à la même méthode, en y ajoutant la technique de floculation.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les outils utilisés, le déroulement de la méthode, les résultats obtenus, ainsi que nos commentaires à leur sujet

3.2 Matériel et Méthodologie expérimentale :

Les trois études ont montré des différences significatives en termes de matériaux et de méthode utilisés.

3.2.1 Matériel utilisé :

3.2.1.1 Moteur :

Les deux premiers articles utilisaient un moteur monocylindre à quatre temps, à essence et à allumage commandé, du type Lombardini IM-359 (type G-97). Ce moteur a été choisi pour sa simplicité, sa stabilité et sa capacité à reproduire de manière fiable les conditions de fonctionnement réelles d'un moteur thermique. Il est équipé de capteurs permettant de mesurer des paramètres tels que la température, la vitesse, la consommation de carburant et les émissions (HC, CO et NOx). Ce banc d'essai permet de comparer les performances des lubrifiants neufs, usagés et régénérés dans des conditions contrôlées. Le montage expérimental est illustré à la figure 2. En revanche, le troisième article n'a pas utilisé de moteur expérimental. L'évaluation de l'efficacité du processus de régénération a été réalisée uniquement par des analyses physiques et chimiques (viscosité, densité, point éclair, TAN), sans fonctionnement du moteur. Cette approche permet une évaluation en laboratoire, mais ne reflète pas directement les effets sur la fonction motrice.



1.Boîtier du dynamomètre 2.Moteur testé 3.Lecture du couple 4.Lecture du régime moteur (tr/min) 5.Réservoir de carburant 6.Démarreur du moteur 7.Filtre à air

Figure 2 : Illustration du banc d'essai

3.2.1.2 Huiles :

Dans cette étude, les huiles utilisées variaient selon les trois éléments analysés. L'article de 2021 utilisait l'huile PSO CARIENT 20W-50, utilisée dans les moteurs à allumage commandé. Cette huile a été testée dans trois conditions différentes : neuve, utilisée après 100 heures de fonctionnement, puis régénérée par un processus de traitement acide.

L'analyse s'est concentrée sur ses propriétés physiques et chimiques (viscosité, TAN, point d'éclair, teneur en cendres, densité) et ses effets sur les performances du moteur et les émissions. Dans l'article de 2020, le même type d'huile (PSO 20W-50) a été utilisé, qui a également subi un cycle complet de fonctionnement du moteur, de dégradation, de renouvellement et de réutilisation. Les résultats ont montré une amélioration significative des propriétés de l'huile renouvelée, permettant d'évaluer son comportement réel dans les conditions de fonctionnement. Quant à l'article de recherche de 2013, il n'utilisait pas de moteur pilote mais se concentrait sur l'extraction de lubrifiants de base à partir d'huiles usagées en utilisant un système combiné de n- ou i-butanol comme solvant et de MEA (monoéthanolamine) comme coagulant. L'objectif de cette étude est d'améliorer le rendement d'extraction et les propriétés de l'huile régénérée en laboratoire, sans la placer dans des conditions réelles de fonctionnement du moteur. Cette approche fournit des données précises sur la qualité chimique de l'huile, mais ne permet pas une évaluation directe de ses performances mécaniques .

Tableau 4 : Propriétés de l'huile lubrifiante^{6,7}

huile	Nombre Total d'Acide (NTA)	Masse Volumique Relative (Densité)	Teneur en Cendres	Viscosité Cinématique	Point de Éclair
	(mg. KOH/g)		%	(cSt)	°C
Normes	D974	D1298	D482	D445	D92
	1.69	0.905	0.1	10.52	250

3.2.1.3 carburants :

Le carburant utilisé dans les expériences dépend du protocole adopté dans chaque étude. Dans les articles de 2021 et 2020, les auteurs ont employé de l'essence de type G-97, un carburant à indice d'octane élevé, adapté aux moteurs à allumage commandé utilisés dans les tests. Ce carburant a été choisi pour assurer une combustion stable, une compatibilité avec les huiles testées, et pour reproduire les conditions de fonctionnement réelles d'un moteur à essence. Les propriétés physico-chimiques du G-97 sont clairement détaillées dans les deux articles, incluant une densité comprise entre 0.71 et 0.775 g/mL, une teneur réduite en soufre, et une composition sans impuretés apparentes, ce qui en fait un carburant standard pour les essais de performance et d'émissions. En revanche, dans l'étude de 2013, aucun moteur n'a été utilisé, donc aucun carburant n'a été impliqué dans le protocole expérimental. L'objectif de cette étude étant limité à l'optimisation du procédé de régénération en laboratoire, seule l'huile usagée a été traitée sans passage par un cycle de combustion, ce qui élimine la nécessité d'un carburant dans cette méthodologie. Ainsi, l'utilisation ou non du carburant reflète la différence d'orientation entre les approches expérimentales axées sur les performances en moteur et celles concentrées sur la chimie du traitement.

3.2.1.4 Produits chimiques :

Les produits chimiques utilisés dans les trois études varient en fonction de la méthode de régénération appliquée. Dans l'article de 2021, l'huile usagée a été traitée par une méthode acide impliquant l'usage de l'acide acétique, combiné à un agent de blanchiment liquide (type eau de Javel) et à une solution de neutralisation à base d'hydroxyde de potassium (KOH). Cette séquence permettait de précipiter les contaminants, de purifier l'huile, puis de neutraliser les résidus acides. L'article de 2020 a adopté une approche similaire, mais en utilisant principalement l'acide phosphorique à 95 %, suivi également d'un traitement à l'eau de Javel et d'une neutralisation avec KOH. Ces réactifs ont été choisis pour leur efficacité à éliminer les impuretés organiques et métalliques tout en restaurant les propriétés de base de l'huile. En revanche, dans l'étude de 2013, le processus repose sur une combinaison de solvants et d'agents flocculants, sans traitement acide classique. Le n-butanol et le i-butanol ont été utilisés comme solvants, tandis que la monoéthanolamine (MEA) a joué le rôle d'agent flocculant. Ce choix chimique visait à améliorer la séparation des composés oxydés, métalliques et carbonés présents dans l'huile usagée, en exploitant

l'effet synergique du solvant et de l'agent flocculant pour produire une huile récupérée proche des standards des huiles de base HVI150. Chaque étude reflète ainsi une stratégie différente selon qu'elle vise une évaluation en laboratoire ou une application directe dans un moteur thermique.

3.2.2 Protocole expérimental :

3.2.2.1 Analyse Conditions initiales :

Les conditions initiales et le protocole expérimental varient selon les objectifs spécifiques de chaque étude. Dans l'article de 2021, le moteur LOMBARDINI IM-359 a été soumis à un essai prolongé de 100 heures de fonctionnement afin de simuler les conditions réelles de détérioration de l'huile. Le banc d'essai comprenait un dynamomètre numérique, des thermocouples, un débitmètre, un hygromètre, ainsi qu'un analyseur de gaz d'échappement EMS-5002. Les essais de performance ont été réalisés à différentes vitesses allant de 1200 à 3200 tr/min, avec un ouverture de papillon de 80 %, et des mesures d'émissions ont été relevées à différents niveaux de couple moteur (de 0 à 100 %). Les mesures ont été prises pour trois types d'huiles : neuve, usagée, et régénérée. Le protocole permettait une comparaison directe des effets de chaque huile sur les performances et les émissions.

Dans l'article de 2020, une méthodologie très similaire a été adoptée, utilisant le même moteur et des équipements comparables, mais avec un régime de fonctionnement de 75 % d'ouverture de papillon. La vitesse a été modifiée en ajustant la charge appliquée, et les paramètres mesurés comprenaient la puissance au frein, le couple moteur, la consommation spécifique de carburant (BSFC), ainsi que les émissions de CO, NO_x et HC.

Quant à l'article de 2013, il ne présente pas de protocole basé sur l'utilisation d'un moteur thermique. Les essais ont été exclusivement réalisés en laboratoire, avec des expériences de centrifugation, chauffage sous vide, et extraction à l'aide de solvants. Les paramètres tels que le temps d'agitation, la température (fixée à 30 °C), le rapport masse solvant/huile, et la concentration de l'agent flocculant ont été systématiquement étudiés pour optimiser le rendement d'extraction. L'approche de cet article se limite à l'analyse des propriétés physico-chimiques de l'huile récupérée, sans passage par un cycle moteur.

3.2.2.2 Régénération d'huile :

3.2.2.2.1 Prétraitement :

Le prétraitement des huiles usagées constitue une étape essentielle avant d'appliquer le processus de régénération dans les trois études analysées, bien que les méthodes diffèrent selon l'objectif expérimental. Dans les articles de 2020 et 2021, le prétraitement consistait principalement en une sédimentation statique de 24 heures, suivie d'une filtration pour éliminer les particules solides telles que la poussière, les limaille de métal et les résidus de combustion. L'huile a ensuite été chauffée à 45°C à l'aide d'un agitateur magnétique pour éliminer l'humidité et les hydrocarbures légers, qui pourraient interférer avec le processus de régénération chimique. Ce protocole a permis d'obtenir une huile suffisamment stable pour les traitements ultérieurs avec des acides, un blanchiment et une neutralisation. Dans un article de 2013, le prétraitement a été réalisé à l'aide d'une méthode plus technique. L'huile usagée a d'abord été soumise à une évaporation sous vide à 70°C, pour éliminer l'eau et les hydrocarbures volatils. Cette étape précède le processus d'extraction par solvant, car la présence d'humidité ou de composés légers peut affecter l'efficacité du processus de séparation. La suspension a ensuite été centrifugée à 600 tr/min pendant 8 min pour séparer les phases (huile, solvant et argile contenant des impuretés). Ce type de prétraitement est adapté à une approche purement physico-chimique en laboratoire, et non à une application directe dans le moteur. Ainsi, malgré les différences de méthodes, l'objectif du prétraitement dans les trois matériaux reste le même : réduire la charge contaminante initiale de l'huile usagée afin de maximiser l'efficacité du processus de régénération ou d'extraction.

3.2.2.2.2 Traitement chimique par méthode acide (études 2021 et 2020) :

Le processus de traitement appliqué aux huiles usagées dans les études de 2021 et 2020 repose sur la méthode du traitement acide, reconnue pour sa simplicité, son faible coût et son efficacité. Dans l'article de 2021, l'huile usée est d'abord chauffée à 45 °C après le prétraitement, puis mélangée à **30 mL d'acide acétique**, avec agitation constante pendant 10 à 15 minutes. Après un repos de 24 heures permettant la décantation des impuretés lourdes, l'huile subit un traitement à l'aide de **12 mL d'agent de blanchiment liquide**, avant d'être **neutralisée par une solution de KOH** jusqu'à atteindre un pH neutre. Enfin, elle est filtrée à travers un tissu filtrant pour obtenir l'huile régénérée . Le montage expérimental est illustré à la figure 3 , Dans l'étude de 2020, le procédé est similaire, à l'exception de l'acide utilisé : ici, c'est **l'acide phosphorique** à 95 % qui est employé.

L'huile est également blanchie, neutralisée à l'aide de KOH, et filtrée après repos. Ces étapes permettent de restaurer en grande partie les propriétés physico-chimiques de l'huile, ce qui la rend apte à une réutilisation dans un moteur à allumage commandé. Ces traitements visent non seulement à réduire la toxicité de l'huile usée, mais aussi à limiter les effets environnementaux liés à son élimination non contrôlée.

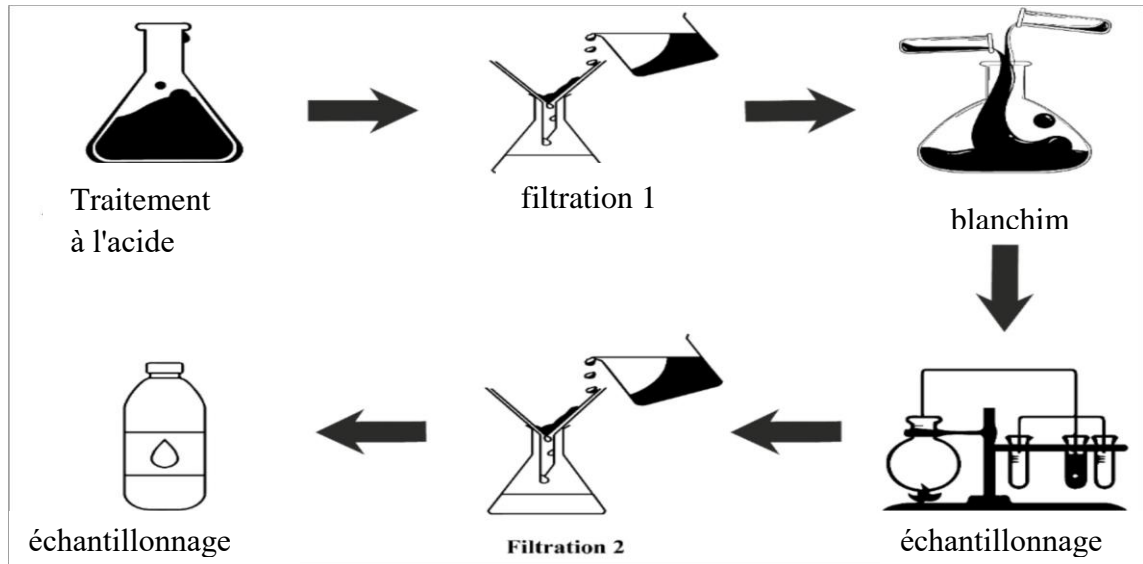


Figure 3 : Procédure de régénération^{6,7}

3.2.2.2.3 Extraction par solvant et floculation (étude 2013) :

L'étude de 2013 adopte une approche différente pour la régénération de l'huile usagée, reposant exclusivement sur une méthode d'extraction par solvant combinée à une floculation chimique. Aucune mise en service dans un moteur thermique n'a été réalisée. Le processus commence par une évaporation sous vide à 70 °C pour éliminer l'humidité et les hydrocarbures volatils, suivie de l'ajout d'un solvant organique, tel que le n-butanol ou le i-butanol, à différents rapports masse/masse allant de 1:1 à 11:1. Ensuite, une quantité déterminée de monoéthanolamine (MEA) est incorporée comme agent floculant à raison de 2 g/kg de solvant. Le mélange est ensuite agité, centrifugé à 600 rpm pendant 8 minutes, puis laissé en décantation pour séparer les phases.

La phase supérieure contenant l'huile régénérée est récupérée et purifiée par distillation du solvant. Cette technique permet une récupération significative de l'huile de base avec des caractéristiques proches d'une huile vierge de type HVI150. Toutefois, l'absence de validation par des essais moteurs ne permet pas de conclure sur les performances tribologiques réelles de l'huile extraite.

3.2.2.3 Mesure des émissions (HC, CO, NO_x) :

Pour la méthode de mesure des émissions, les études Usman 2020 et Usman 2021 se sont appuyées sur l'EMS-5002 pour analyser les émissions provenant de la combustion de l'huile régénérée à l'intérieur du moteur. En revanche, l'étude de Yang de 2013 n'a utilisé aucun appareil de mesure des émissions, limitant ses recherches à des analyses chimiques en laboratoire pour évaluer les propriétés de l'huile sans la tester réellement dans un moteur.

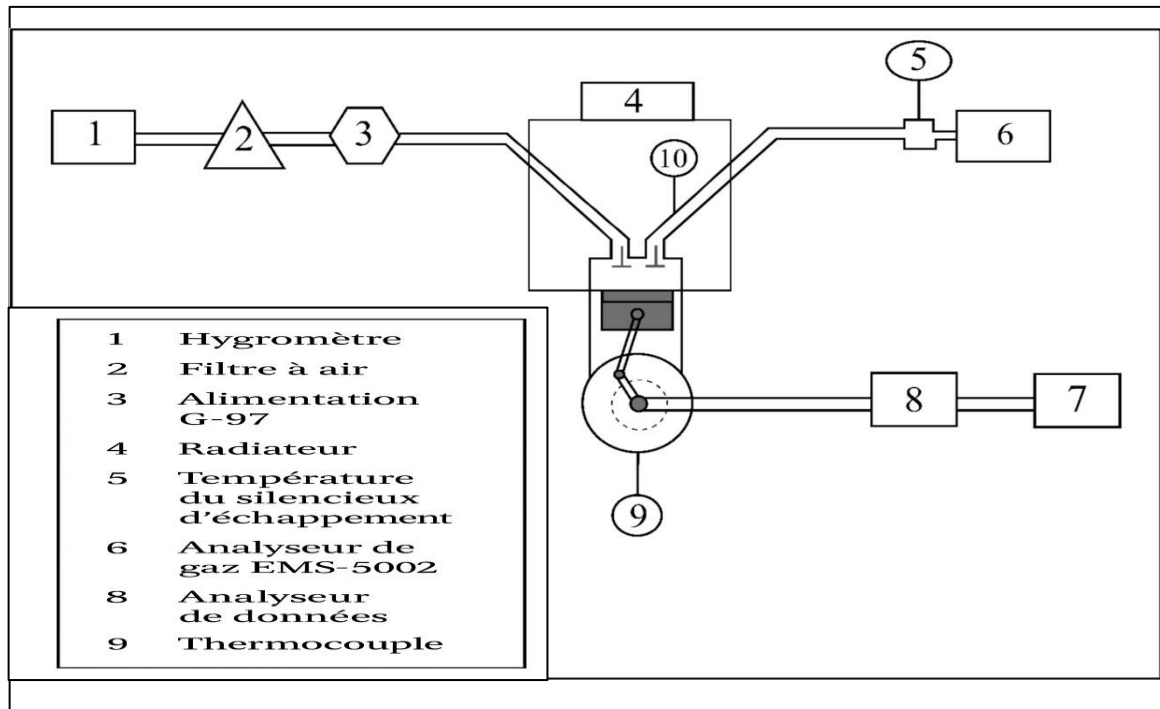


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'analyse des performances du moteur et des émissions. Il comprend un moteur à allumage commandé (SI), un dynamomètre numérique (THEPRA), un analyseur de gaz d'échappement (EMS-5002), un hygromètre et des thermocouples.

3.2.3 Analyses effectués :

Après avoir régénéré l'huile de lubrification usagée, plusieurs analyses physiques et chimiques ont été effectuées selon les normes ASTM pour évaluer l'efficacité du procédé et comparer les propriétés de l'huile régénérée avec celles de l'huile fraîche et usagée. La densité a été mesurée conformément à la norme ASTM D1298 pour surveiller les changements de densité, un indicateur de changements structurels après décomposition ou traitement. La viscosité cinématique, évaluée selon la norme ASTM D445, est utilisée pour juger de la lubrification, qui est souvent affectée par l'oxydation et la dilution avec le carburant. Le point d'éclair est déterminé selon la norme ASTM D92 pour déterminer les changements dans la volatilité des composés pétroliers, une diminution indiquant une contamination. La teneur en cendres sulfurées, mesurée selon la norme ASTM D482, fournit des informations sur la présence de résidus de corrosion inorganiques ou d'additifs. L'indice d'acidité totale (TAN), mesuré selon la norme ASTM D974, reflète le degré d'oxydation et la formation de composés acides corrosifs. Les résultats obtenus ont montré une amélioration significative des propriétés de l'huile renouvelée, avec une diminution du TAN et de la teneur en cendres, ainsi qu'une augmentation de la viscosité et du point d'éclair, indiquant une récupération partielle des propriétés de la nouvelle huile. Ces

observations confirment les résultats rapportés dans les travaux d'Usman (2020) et Usman (2021), où les huiles traitées à l'acide ont montré des améliorations significatives des performances physiques, chimiques et tribologiques par rapport aux huiles dégradées. Parallèlement, des essais pilotes ont été menés sur un banc d'essai pour évaluer les performances du moteur et les émissions de gaz polluants (CO, HC, NO_x) en utilisant l'huile régénérée. Ces tests ont montré que l'huile traitée contribue à une réduction significative des émissions et améliore les performances globales du moteur, renforçant ainsi les considérations environnementales et techniques du processus de renouvellement soigneusement étudié.

3.3 Résultats et discussion :

Après les procédures de traitement des huiles usagés nous nous sommes concentrés sur les résultats obtenus sur certaines propriétés physique, et l'émission des gaz qui sont les suivantes :

3.3.1 L'influence sue les propriétés physiques :

3.3.1.1 Point d'éclair :

Il s'agit de la température la plus basse à laquelle un liquide libère suffisamment de vapeurs pour former un mélange inflammable avec l'air près de la surface du liquide. À cette température, une flamme appliquée brièvement provoquera un éclair (une petite flamme qui se propage rapidement sur une surface) mais ne maintiendra pas une combustion continue. Son importance réside dans son rôle de norme de sécurité critique pour les liquides inflammables et combustibles, y compris les huiles lubrifiantes. Il indique le risque d'incendie lors du stockage, de la manipulation et de l'utilisation de l'huile. Une huile avec un point d'éclair élevé est moins inflammable et donc plus sûre à manipuler. Il donne une indication de la volatilité de l'huile lubrifiante. Une huile à faible point d'éclair contient des composants plus légers qui s'évaporent plus facilement. Une baisse significative du point d'éclair d'une huile pendant le service indique une contamination par des substances plus volatiles, telles que du carburant ou des solvants. La relation entre le point d'éclair et l'huile lubrifiante recyclée est une relation directe, car l'objectif du processus de régénération de l'huile lubrifiante est d'éliminer les contaminants, les produits d'oxydation et les additifs détériorés de l'huile usagée pour restaurer ses propriétés d'origine, et le point d'éclair est la norme pour évaluer l'efficacité du processus de régénération.

Tout d'abord, un processus de régénération efficace doit éliminer les contaminants volatils qui peuvent abaisser le point d'éclair de l'huile usagée. Un point d'éclair des huiles récupérées similaire ou supérieur à celui de l'huile neuve correspondante indique généralement une bonne élimination de ces contaminants.

Deuxièmement, si le point d'éclair de l'huile régénérée est significativement inférieur à celui de la nouvelle huile, cela peut indiquer que le processus de régénération n'a pas été suffisamment efficace pour éliminer tous les contaminants volatils ou que des produits de dégradation légers sont toujours présents.

Troisièmement, le point d'éclair extrêmement bas de l'huile renouvelable peut affecter ses performances en service, notamment en augmentant les pertes par évaporation à haute température et en posant un risque accru d'incendie.

Enfin, le point d'éclair est une propriété importante pour la sécurité et les performances des huiles lubrifiantes. Pour l'huile lubrifiante recyclée, le point d'éclair est un indicateur clé de l'efficacité du processus de régénération pour éliminer les contaminants volatils et restaurer les propriétés de l'huile à un niveau acceptable, voire similaire à celui de l'huile neuve. Il est important que l'huile recyclée ait un point d'éclair qui réponde aux spécifications optimales pour garantir un fonctionnement sûr et efficace.

L'huile véritable a un point d'éclair élevé, atteignant 251°C en 2020 et 250°C en 2021. Au fur et à mesure que l'huile est utilisée, ce nombre diminue considérablement. En 2020, le point d'éclair a atteint 228,91°C en raison de la contamination du carburant et des véhicules légers, tandis qu'en 2021, il a atteint environ 239°C, soit une diminution d'environ 4,4 %. Quant à l'huile recyclée, elle a enregistré 235°C en 2020, indiquant une amélioration de 2,66%, tandis qu'en 2021, sa valeur a atteint ~244°C, indiquant une récupération partielle des propriétés. Selon Yang 2013, aucune valeur spécifique n'a été donnée pour l'huile recyclée mais une nette amélioration a été constatée.⁶⁻⁹

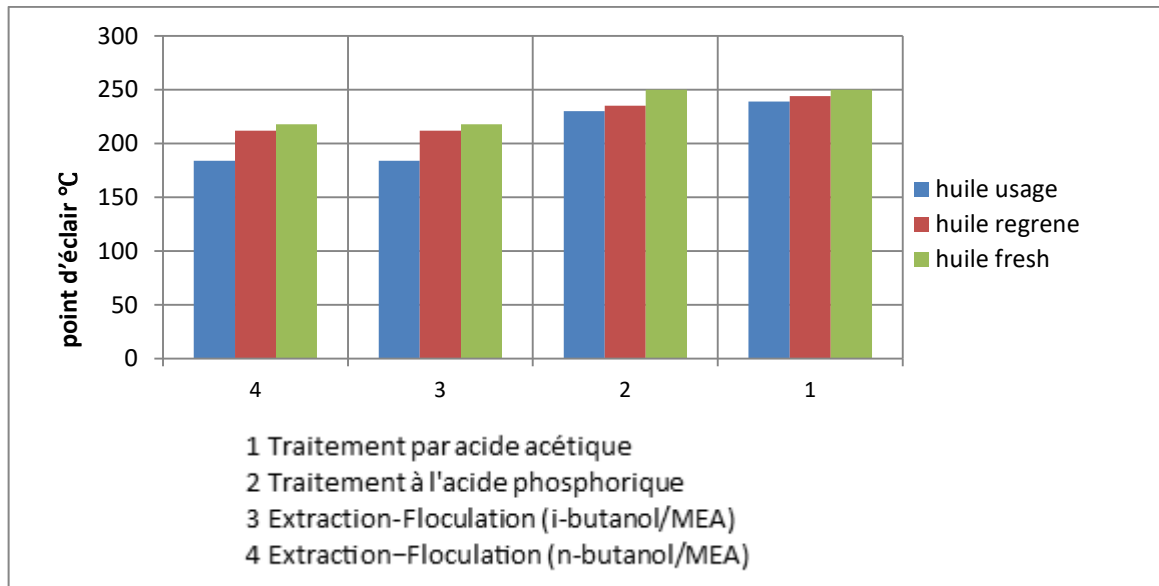


Figure 5 : comparaison le point d'éclair

3.3.2 Indice d'acide total (TAN) :

Il s'agit d'une mesure importante qui permet d'évaluer l'acidité d'une huile lubrifiante. Exprimée en mg KOH/g, elle indique la quantité d'hydroxyde de potassium nécessaire pour neutraliser les composants acides présents dans l'huile. Une valeur TAN élevée indique généralement une détérioration de l'huile causée par l'oxydation, la contamination ou la formation de sous-produits acides lors de la combustion. L'étude du troisième article, qui portait sur la purification des huiles usagées par extraction et coagulation, a permis d'obtenir une réduction significative du TAN, atteignant une valeur finale de 0,04 mg KOH/g. Cette valeur très faible reflète l'excellente qualité chimique de l'huile traitée, bien que cette étude n'inclue pas de validation par des tests moteurs. Cela met en évidence l'efficacité du procédé au niveau du laboratoire, mais ne garantit pas nécessairement la stabilité thermique et mécanique dans des conditions réelles. Dans la deuxième étude, l'huile fraîche utilisée (PSO 20W-50) avait une valeur TAN initiale de 1,69 mg KOH/g, ce qui est dans les spécifications normales pour les huiles moteur. Après une utilisation à long terme, le TAN est passé à 4,35 mg KOH/g, indiquant une forte décomposition chimique et une accumulation de produits acides. Après régénération par traitement acide, le TAN a été réduit à environ 2,20 mg KOH/g, soit une réduction d'environ 49 %. Ce résultat démontre l'efficacité partielle du procédé dans la restauration des propriétés chimiques de l'huile. Sur la base de l'étude précédente, les résultats du premier article confirment la même tendance. L'huile fraîche a un TAN d'environ 1,70 mg KOH/g, tandis que l'huile usagée dépasse 4,30 mg KOH/g. Après régénération, le TAN a diminué à environ 2,18 mg

KOH/g, un résultat presque identique au résultat de 2020. Cette stabilité entre les deux années démontre la reproductibilité du procédé utilisé et sa capacité à réduire significativement l'acidité, bien qu'elle ne permette pas d'atteindre les niveaux extrêmement bas observés en laboratoire comme chez Yang. Enfin, le TAN est un indicateur clé de la viabilité de l'huile régénérée. Des études expérimentales du moteur montrent une régénération partielle de cette propriété, suffisante pour permettre sa réutilisation dans des conditions contrôlées. Cependant, les valeurs TAN obtenues restent supérieures à celles de la nouvelle huile, soulignant la nécessité de compléter le processus avec des techniques de finition plus avancées pour obtenir des performances optimales.

Dans son état d'origine, l'huile a un indice d'acide total de 1,69 mg KOH/g pour 2020 et de 1,7 mg KOH/g pour 2021. Après utilisation, l'indice d'acide augmente suite aux processus d'oxydation, atteignant 2,35 mg KOH/g en 2020, puis augmentant significativement en 2021 à 4,3 mg KOH/g, soit une augmentation de 60,7 %. Quant à l'huile recyclée, elle a enregistré 2,1 mg KOH/g en 2020, soit une baisse de 10,64 %, tandis qu'en 2021 elle a atteint 2,2 mg KOH/g, soit une baisse de 48,8 % par rapport à l'huile usagée non traitée. Selon Yang 2013, la valeur après le processus d'arrondi n'est pas mentionnée.

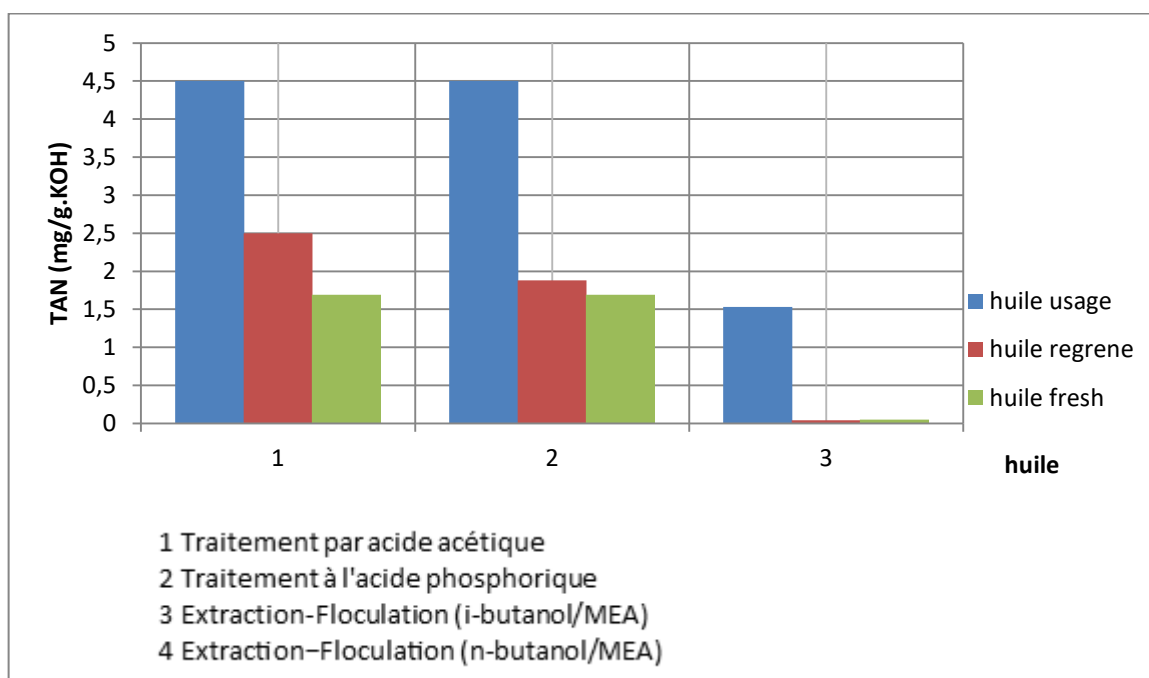


Figure 6 : Comparaison en TAN

3.3.3 Densité :

C'est une propriété physique importante qui reflète la densité d'un liquide par rapport à la densité de l'eau à température standard. Dans le cas des huiles lubrifiantes, cela affecte la capacité du lubrifiant à circuler dans le moteur et à former une couche protectrice entre les pièces mobiles. Toute différence notable de densité peut indiquer une détérioration, une contamination ou une oxydation du fluide. La troisième étude, qui a traité les huiles usagées à l'aide de méthodes de coagulation et d'extraction sans essai moteur, a montré que la densité de l'huile régénérée augmentait légèrement par rapport à l'huile usagée, reflétant une amélioration modeste de sa qualité. Cependant, la densité finale est restée inférieure à celle de la nouvelle huile de base, en raison des résidus fixés qui n'ont pas été éliminés. Dans le deuxième article, la densité de l'huile fraîche PSO 20W-50 est de 0,905 g/cm³. Après utilisation, la densité a diminué à 0,840 g/cm³, ce qui a été attribué à la perte d'additifs et à la détérioration thermique du fluide. Après régénération par traitement acide, la densité de l'huile a été ramenée à 0,890 g/cm³, soit une amélioration significative de +5,9% par rapport à l'huile usagée. Ce résultat démontre que le procédé utilisé a permis d'éliminer une partie importante des impuretés et de reconstituer partiellement la structure du fluide. L'étude du premier article, utilisant la même huile de base et les mêmes conditions expérimentales, a confirmé les tendances observées dans le deuxième article. L'huile fraîche avait une densité similaire d'environ 0,905 g/cm³, tandis que l'huile usagée diminuait à 0,838 g/cm³, ce qui est légèrement inférieur à ce qui a été trouvé dans l'étude de l'article précédent. Après régénération, la densité est passée à 0,892 g/cm³, ce qui représente une récupération de plus de 6,4 %. Cette constance entre les deux années confirme la fiabilité et la répétabilité du procédé de régénération utilisé, et prouve son efficacité à restaurer les propriétés physiques de l'huile. Enfin, en comparant les trois études, il apparaît clairement que la densité est un paramètre sensible et indique l'état des lubrifiants. L'amélioration significative de la densité après régénération dans les articles 1 et 2, cohérente avec les observations de l'article 3, indique que le traitement appliqué peut restaurer l'huile usagée à une qualité proche de celle de l'huile neuve, tant structurellement que fonctionnellement.

Dans son état d'origine, l'huile avait une densité de 0,906 en 2020 et de 0,91 en 2021. Avec l'utilisation, cette valeur diminue, atteignant 0,844 en 2020 et 0,84 en 2021, soit une diminution d'environ 6,7 %. Quant à l'huile recyclée, sa densité s'est améliorée à 0,901 en

2020, soit une augmentation de 6,75 %, tandis qu'en 2021 elle était de 0,89, indiquant une amélioration de 5,2 % par rapport à l'huile usagée. Selon Yang 2013, cette valeur n'est pas mentionnée.

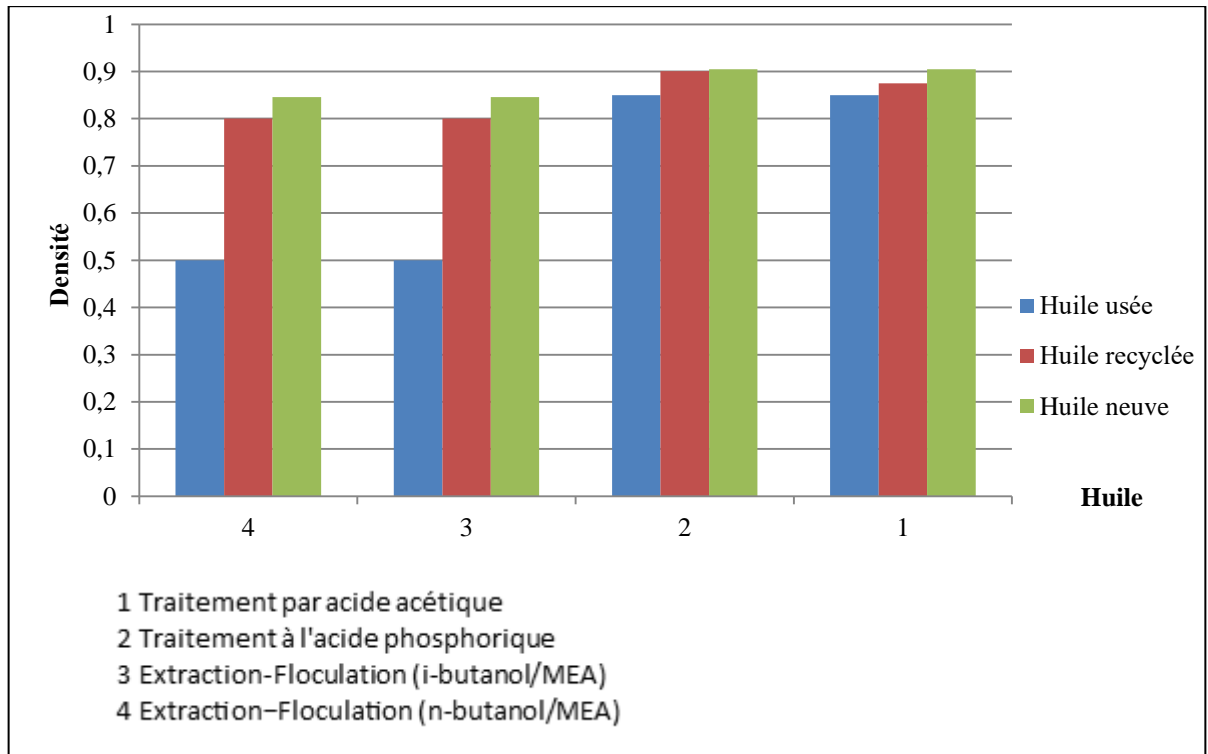


Figure 7 : Comparaison de densité

3.3.4 Viscosité spécifique :

C'est une mesure de la résistance d'un liquide à l'écoulement. Il reflète le frottement interne entre les différentes couches du fluide en mouvement. Plus la viscosité est élevée, plus le fluide s'écoule épais et lentement ; À l'inverse, une faible viscosité signifie une plus grande fluidité et cette propriété joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des moteurs et une viscosité suffisante contribue à former une couche protectrice entre les pièces mécaniques en mouvement, réduisant ainsi la friction et l'usure. Il contribue également au refroidissement, à l'étanchéité et à l'élimination des impuretés . Dans le domaine des lubrifiants, la viscosité détermine leur classification selon la norme SAE, avec des indicateurs tels que 5W-30 ou 10W-40. Le chiffre avant le « W » (pour hiver) indique la viscosité à froid, tandis que le chiffre qui suit correspond à la viscosité à chaud. Une huile trop fluide peut ne pas offrir une protection adéquate à haute température, tandis qu'une huile trop visqueuse à froid peut ralentir le démarrage du moteur . Au fil du temps, l'huile

se détériore : la viscosité diminue en raison de la chaleur et de la dilution du carburant, ou elle peut augmenter en raison de l'oxydation et des contaminants. De grandes différences de viscosité entraînent de mauvaises performances, une consommation accrue et une usure accélérée. Les résultats expérimentaux confirment ces effets. Dans le deuxième article, la viscosité de l'huile fraîche était de 10,53 cSt, contre 8,89 cSt après utilisation, ce qui représente une perte importante. L'huile renouvelée a retrouvé une viscosité de 10,28 cSt, soit une amélioration de 15,6 % par rapport à l'huile usagée. Dans le premier article, les valeurs étaient similaires : 10,52 cSt à neuf, avec une diminution à environ 8,89 cSt après utilisation, et une augmentation à 9,98 cSt après renouvellement, soit +12,2%. Dans le troisième article, l'étude a mesuré la viscosité à 40°C à 104,65 mm²/s et à 100°C à 11,58 mm²/s, mais n'a pas rapporté de valeurs post-régénération. Cependant, une amélioration qualitative significative a été observée et, en fin de compte, la viscosité spécifique est l'une des propriétés fondamentales de toute huile moteur. Cela affecte directement sa capacité à assurer une lubrification optimale, à s'adapter aux changements de température et à maintenir la durabilité du moteur. Il est nécessaire de surveiller son évolution et de choisir des lubrifiants répondant aux spécifications du fabricant.

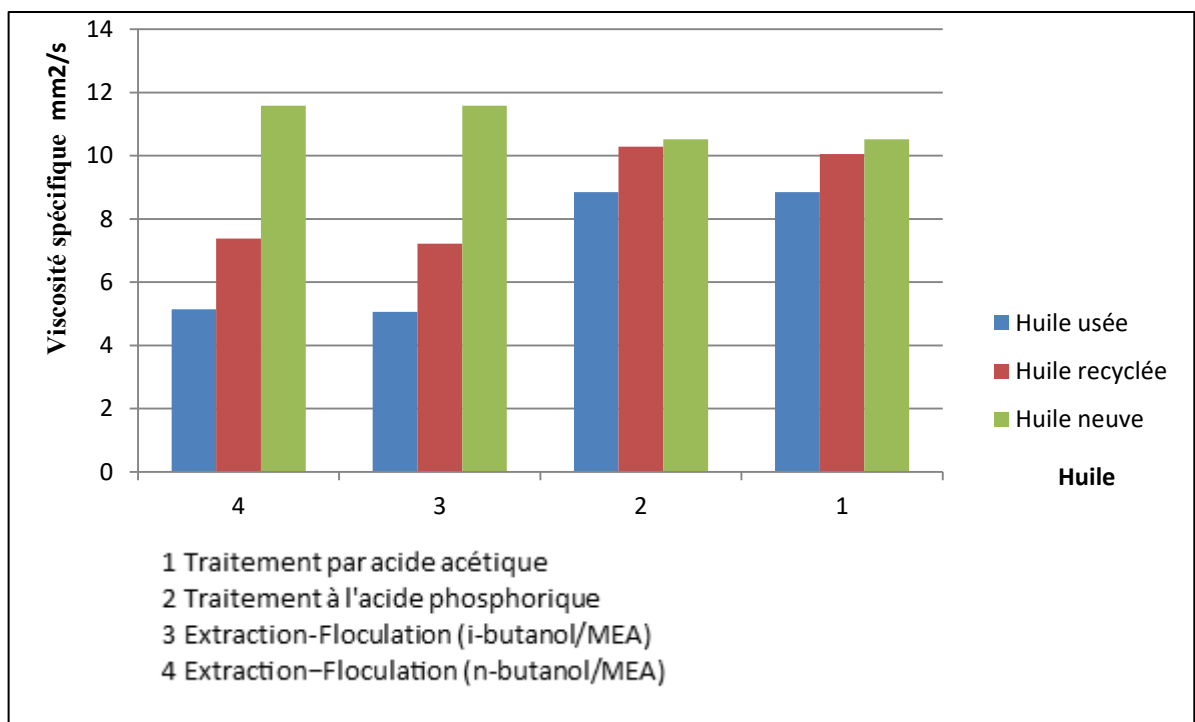


Figure 8 : Comparaison de la viscosité spécifique

3.3.5 Indice de viscosité :

Il s'agit d'un paramètre sans dimension qui évalue la stabilité de la viscosité de l'huile sous les changements de température. Plus l'indice de lubrification (VI) est élevé, mieux l'huile conserve ses propriétés lubrifiantes lorsque la température augmente, ce qui est particulièrement important dans les moteurs exposés à des conditions thermiques sévères. Une huile à faible indice de viscosité devient trop fluide à haute température, ce qui affecte négativement la formation d'un film protecteur entre les surfaces mécaniques. A l'inverse, une huile à indice de viscosité élevé conserve une viscosité suffisante, assurant ainsi une lubrification optimale du démarrage à froid jusqu'aux températures de fonctionnement les plus élevées. Le critère utilisé pour calculer (VI) est généralement basé sur la viscosité mesurée à 40°C et 100°C, selon les méthodes ASTM D2270. (VI) permet également de distinguer les huiles minérales classiques ($VI < 100$) et les huiles synthétiques ou améliorées ($VI > 120$). Les résultats expérimentaux des études analysées montrent l'effet de l'utilisation et du renouvellement sur ce paramètre. Dans la troisième étude, l'indice de viscosité de l'huile recyclée était de 96, contre 91 pour l'huile usagée, indiquant une amélioration significative de la stabilité thermique après traitement. Cette valeur est encore inférieure à celle de l'huile neuve de haute qualité, mais elle démontre une purification efficace. Les études menées dans les premier et deuxième articles n'incluent pas de valeurs explicites (VI), mais les résultats de viscosité spécifique à différentes températures indiquent une récupération partielle des performances thermiques. L'huile renouvelée, bien qu'améliorée, présente une sensibilité thermique légèrement plus prononcée que l'huile neuve, ce qui correspond à un VI modéré. Enfin, l'indice de viscosité est un indicateur clé pour juger de la capacité d'une huile à fonctionner sur une large plage de températures. Dans le cadre du recyclage, il s'agit d'un critère important à surveiller pour assurer une protection continue du moteur, tout en prolongeant la durée de vie des lubrifiants.

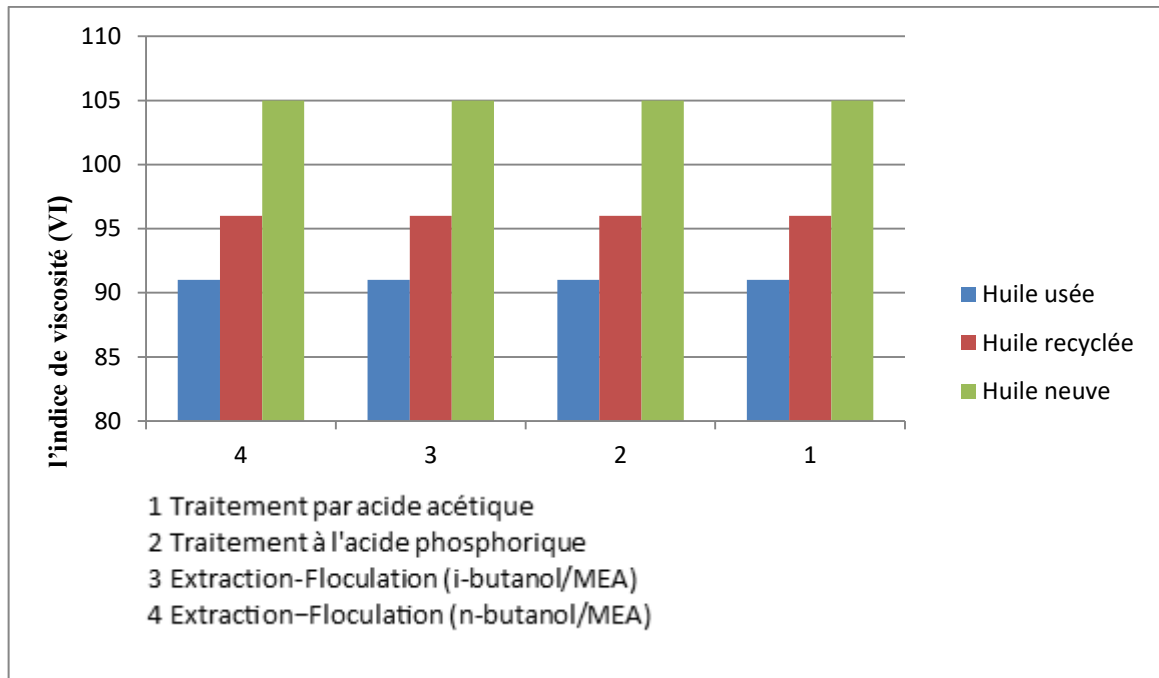


Figure 9 : Comparaison du Indice de viscosité

3.3.6 Teneur en cendres :

La teneur en cendres d'une huile lubrifiante représente la quantité de résidus inorganiques qui reste après une combustion complète. Elle est exprimée en pourcentage de la masse initiale et constitue un indicateur de base de la qualité et de la pureté de l'huile. Ces teneurs en cendres sont principalement produites par des additifs minéraux incorporés dans la formulation (notamment le calcium, le magnésium et le zinc), mais aussi par des contaminants externes tels que la poussière, les particules d'usure ou les produits de décomposition thermique. Une teneur en cendres trop élevée peut indiquer une suraccumulation d'additifs ou une contamination évidente par des impuretés solides, ce qui favorise la formation de dépôts et l'encrassement des pistons, et peut même endommager les systèmes de traitement ultérieurs tels que les catalyseurs. À l'inverse, une teneur très faible indique une carence en composants essentiels à la protection du moteur, notamment en détergents et en agents anti-usure. Parmi les différentes méthodes de mesure, la norme ASTM D482 spécifie la teneur totale en cendres, tandis que la norme ASTM D874 cible spécifiquement les cendres sulfatées, qui sont plus importantes pour évaluer les huiles moteur. Ces valeurs sont essentielles pour garantir que les huiles soient conformes aux spécifications industrielles, notamment celles exigeant une teneur inférieure à 1,5 % dans les huiles moteur modernes. Les résultats des études montrent clairement l'effet du vieillissement et du renouvellement de l'huile sur ce paramètre. Dans le deuxième article, la teneur en cendres de la nouvelle huile était proche de zéro (0,0%), tandis que dans le

premier article, elle était légèrement plus élevée, atteignant 0,1%. Après utilisation, cette valeur augmente significativement jusqu'à 2,5%, révélant une accumulation importante de polluants solides. Après le processus de régénération, la teneur en cendres a diminué à 0,8 % en 2020 et à 1,0 % en 2021, démontrant une amélioration significative et une efficacité remarquable du processus de purification. Bien qu'aucune valeur précise après régénération n'ait été rapportée dans le troisième article, une diminution significative de la teneur en cendres sulfatées a été observée, la valeur initiale atteignant 0,77 %. Cette diminution qualitative confirme l'efficacité du traitement appliqué, même en l'absence de données numériques précises. En bref, la teneur en cendres est un critère important pour évaluer la performance des huiles, qu'elles soient neuves, usagées ou recyclées. Un contrôle précis permet de maintenir les composants internes du moteur, d'empêcher la formation de dépôts nocifs et de prolonger la durée de vie des systèmes mécaniques.

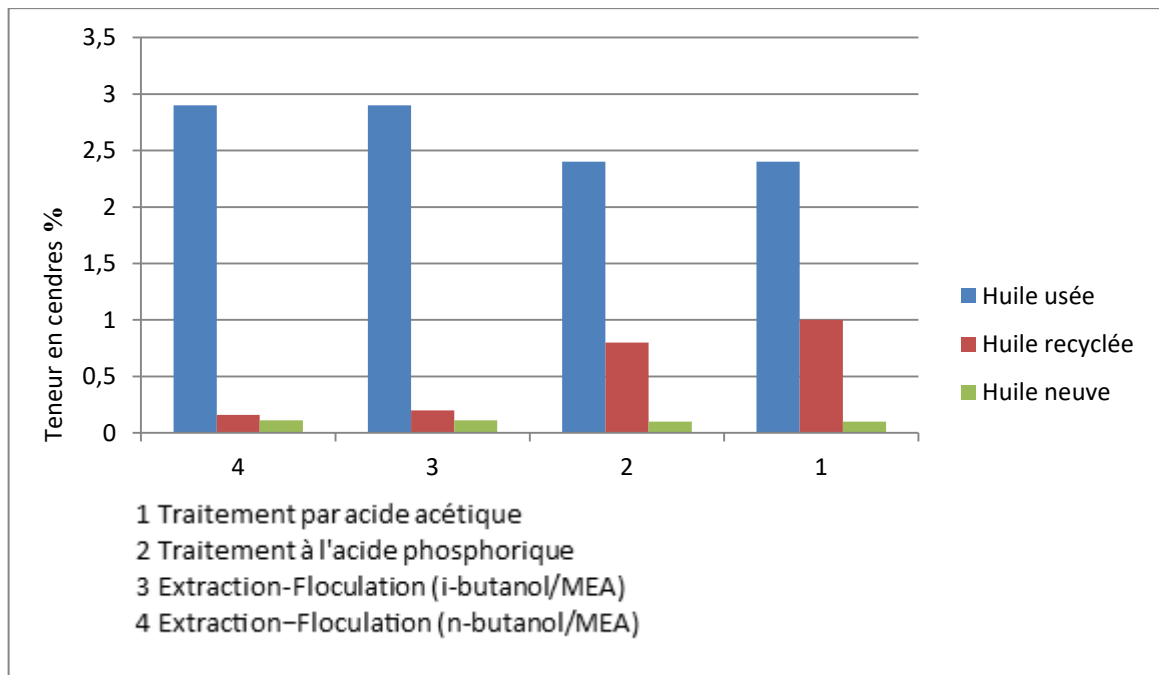


Figure 10 : Teneur en cendres

3.3.7 Pourcentage d'huile lubrifiante récupérée :

Le pourcentage d'huile lubrifiante récupérée est un indicateur clé de l'efficacité du processus de régénération. Ce paramètre permet d'évaluer la quantité d'huile de base extraite par rapport à la quantité initiale d'huile utilisée. Cela dépend de plusieurs facteurs tels que le temps de traitement, la température d'extraction, le rapport massique solvant/huile et la concentration de coagulant utilisée. Dans cette section, nous présentons

nos conclusions de l'article 3 concernant l'impact de ces informations sur l'efficacité de récupération de l'huile de lubrification.

3.3.7.1 taux de récupération de l'huile lubrifiante au fil du temps :

Le rendement de récupération de l'huile augmente avec le temps de traitement jusqu'à atteindre une valeur constante. Selon le premier article , une durée optimale de 20 minutes permet d'obtenir un rendement stable d'environ 81 à 83 %, en particulier avec le système i-butanol/MEA. Au-delà de cette durée, le rendement ne s'améliore plus de manière significative, ce qui suggère que l'équilibre du système est atteint.¹⁰

Voir Figure suivante :

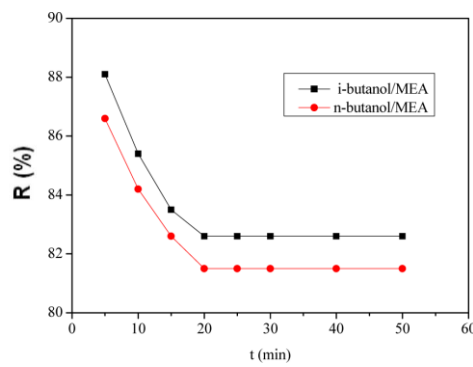


Figure 11 : Effet du temps de raffinage sur le rendement

3.3.7.2 Pourcentage d'huile lubrifiante récupérée en fonction de la température :

La température du processus joue un rôle clé dans l'efficacité de l'extraction. Les résultats montrent que l'augmentation de la température améliore initialement le rendement, car elle réduit la viscosité du mélange et facilite la dissolution de l'huile de base. Toutefois, à des températures plus élevées, certains contaminants peuvent également être dissous, ce qui nuit à la qualité du produit final. La température optimale déterminée est de **30 °C**.^{6,16-18}

Voir Figure suivant :

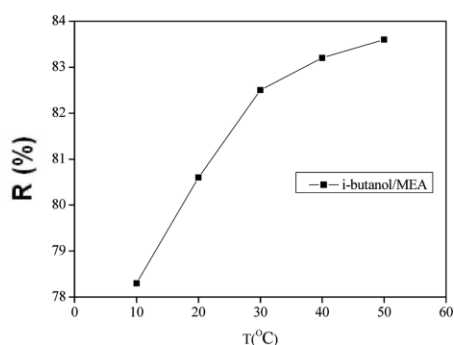


Figure 12 : Effet de la température sur le rendement

3.3.7.3 Pourcentage d'huile lubrifiante récupérée en fonction du degré de mélange du solvant :

Le rapport masse solvant/huile est un facteur critique dans le processus de récupération. D'après les données expérimentales, l'augmentation de ce rapport améliore le rendement jusqu'à un plateau observé à **5 g de solvant par g d'huile usée**. L'utilisation du système **i-butanol/MEA** permet d'atteindre un rendement plus élevé avec une quantité de solvant inférieure, ce qui le rend plus économique et efficace.^{6,18,19}

Voir Figure suivant :

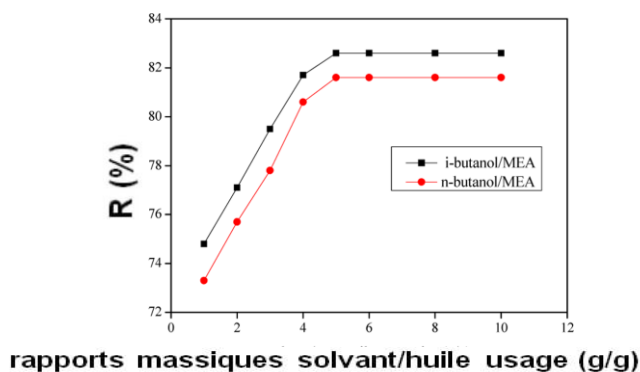


Figure 13 : Effet du rapport solvant/huile sur le rendement

3.3.7.4 Les conditions optimales déterminées :

Les conditions optimales pour maximiser l'efficacité de récupération de l'huile lubrifiante ont été déterminées comme suit :

Le temps de raffinage optimal est de 20 minutes, ce qui permet au système de s'équilibrer et favorise une séparation efficace des impuretés. La température de traitement idéale est de 30°C, ce qui est suffisant pour réduire la viscosité du mélange sans favoriser une dissolution excessive des contaminants.

Le rapport optimal entre la masse de solvant et la masse d'huile usagée est de 5 grammes de solvant pour 1 gramme d'huile. Au-delà de ce pourcentage, l'augmentation du rendement devient négligeable.

Le solvant recommandé est l'i-butanol, en combinaison avec l'agent de charge efficace : la monoéthanolamine (MEA). La concentration optimale de coagulant est de 2 grammes de MEA par kilogramme de solvant, ce qui permet une collecte efficace des impuretés minérales, des composés oxydés et des particules carbonées.

Ces conditions ont permis un rendement d'extraction d'environ 83%, tout en assurant une qualité d'huile similaire à celle de l'huile de base HVII150.¹¹⁻¹³

3.4 Émissions polluantes issues du moteur :

Les huiles lubrifiantes usagées ont un impact notable sur les émissions produites par les moteurs à combustion. Les essais menés dans les études de Usman ont permis de quantifier cet effet. L'étude de 2021 a montré que l'utilisation d'huile non renouvelée entraîne une augmentation significative des polluants, notamment une hausse de 23 % des hydrocarbures imbrûlés (HC), indiquant une combustion incomplète. Le monoxyde de carbone (CO) est également présent en plus grande quantité dans ce contexte, mais sa concentration diminue de 9,7 % après régénération de l'huile. En parallèle, l'étude de 2020 rapporte une réduction de 17,9 % des oxydes d'azote (NO_x), due à une combustion plus stable et plus homogène obtenue avec l'huile recyclée.

En revanche, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) ont connu une légère augmentation après traitement, ce qui peut être interprété comme le résultat d'une combustion plus complète. Ce phénomène est généralement perçu comme un indicateur d'une meilleure efficacité énergétique. L'ensemble de ces résultats souligne l'intérêt environnemental du recyclage des lubrifiants : en réduisant les émissions nocives sans compromettre les performances du moteur, l'huile régénérée s'affirme comme une solution plus propre et plus durable.

3.4.1 Émissions d'hydrocarbures (HC) :

Des études menées par usman 2020 et usman 2021 montrent que les émissions d'hydrocarbures (HC) augmentent lors de l'utilisation d'huile dégradée par rapport à l'huile fraîche raffinée. En 2020, les émissions maximales d'hydrocarbures à usman City ont atteint 142 ppm, en raison de l'absorption/libération excessive de G-97 provenant de

l'huile de lubrification en détérioration. Les opérations de raffinage ont montré que certaines propriétés du pétrole ont été restaurées, ce qui a entraîné une réduction moyenne de 9,9 % des émissions. Dans l'étude d'Usman de 2021, il a été confirmé que le mince film d'huile sur les parois des cylindres est un facteur majeur dans les émissions d'hydrocarbures en raison du phénomène d'absorption et de libération pendant le cycle à quatre temps. Les données ont montré que la viscosité plus faible de l'huile dégradée a conduit à une absorption accrue de carburant dans le film d'huile, contribuant à une augmentation de 0,30 g/kW/h des émissions à 100 % de couple, tandis que la viscosité améliorée après régénération a entraîné une réduction de 9,7 % des émissions moyennes par rapport à l'huile usagée. La principale différence entre les deux études réside dans les détails analytiques, car Usman 2020 s'est concentré sur l'effet du G-97 sur l'absorption/libération de HC, tandis qu'Usman 2021 a abordé le rôle de la viscosité et son impact sur les émissions de HC, en plus d'analyser la tendance globale des émissions sur une courbe changeante. Les deux études s'accordent sur le fait que la régénération réduit les émissions, mais elles divergent sur les raisons derrière ce phénomène. Les hydrocarbures imbrûlés sont produits par une combustion incomplète du carburant. Lors de l'utilisation d'huiles usagées, leurs concentrations augmentent en raison d'une mauvaise qualité de lubrification, ce qui entraîne une combustion inefficace. En revanche, l'huile régénérée montre une réduction significative de la teneur en HC grâce à ses propriétés réparatrices.

Sur la figure 11, la courbe HC montre clairement cette diminution avec le pétrole renouvelable, témoignant d'une combustion plus propre.^{16,17}

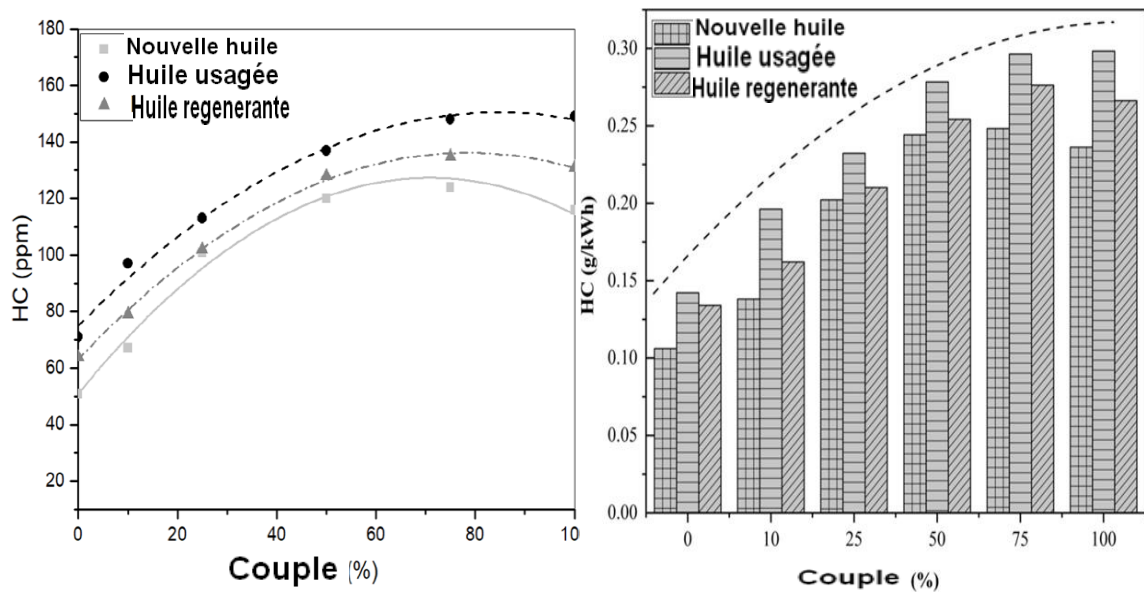


Figure 14 : Comparaison des émissions d'hydrocarbures (HC) pour les huiles fraîche, usagée et régénérée

3.4.2 Émissions de dioxyde de carbone (CO₂):

Les deux articles, Usman 2020 et Usman 2021, traitent des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) provenant de la combustion de carburant à différents niveaux de couple. Ils conviennent que l'augmentation de la demande énergétique entraîne une augmentation de la consommation de carburant, ce qui provoque davantage de combustion et libère de plus grandes quantités de dioxyde de carbone. Usman (2020) note que les émissions de dioxyde de carbone à couple élevé sont plus élevées avec l'huile neuve par rapport aux huiles traitées à l'acide et usagées, en raison d'une moindre dilution du carburant et d'une meilleure combustion du moteur. Quant à Usman 2021, il confirme que la tendance générale des émissions de CO₂ augmente avec un couple plus élevé pour tous les types d'huile, mais il montre également que l'huile reconditionnée a des émissions différentes par rapport à l'huile usagée, étant plus faibles à faible couple mais plus élevées à couple élevé, avec une augmentation globale des émissions de CO₂ de 0,3% par rapport à l'huile usagée. La principale différence entre les deux sources réside dans l'analyse des performances de l'huile reconditionnée, qui n'a pas été mentionnée dans Usman 2020, alors qu'elle a été étudiée dans Usman 2021, qui a ajouté des détails sur son effet sur les émissions de CO₂ à différents niveaux de couple. Le CO₂ est produit par une combustion complète, mais la quantité accrue de CO₂ indique des températures plus élevées en raison de la dégradation de l'huile. L'utilisation d'huile usagée augmente la température dans la chambre de combustion, ce qui entraîne une diminution de 4,9 % de la consommation de liquide de

refroidissement, indiquant une augmentation du stress thermique. Le renouvellement de l'huile permet de réduire cette augmentation.^{18,19}

Bien que cette tendance ne soit pas explicitement énoncée, elle peut être déduite des données d'efficacité thermique et du moteur. Il complète les notes de la figure 12.

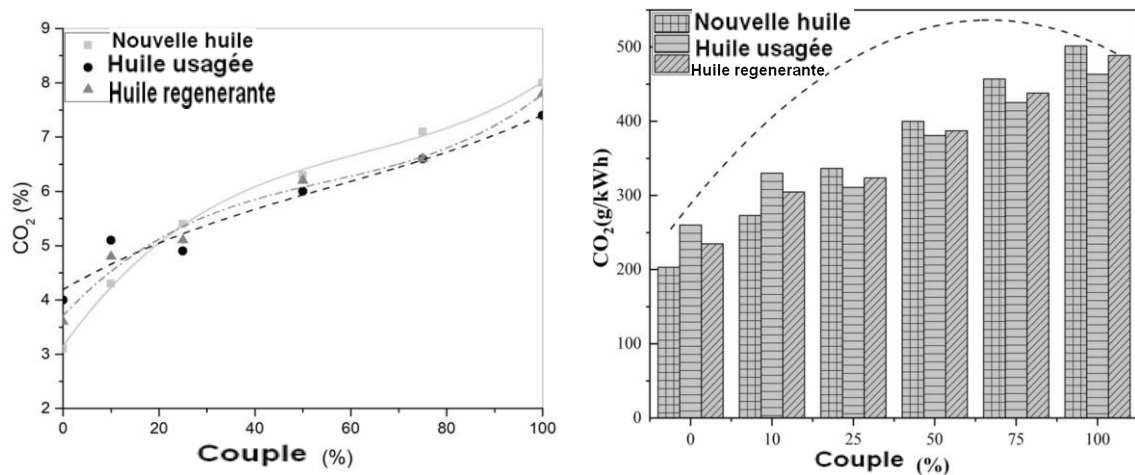


Figure 15 : : Variation des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) en fonction du couple moteur

3.4.3 Émissions d'oxydes d'azote (NO_x):

Les émissions d'oxydes d'azote présentent une dépendance claire à la température, car l'azote n'est pas réactif à des températures normales, mais produit des oxydes d'azote à des températures plus élevées. Selon Usman 2020, les émissions d'oxyde d'azote dans l'huile récupérée se situent entre celles de l'huile usagée et de l'huile neuve, une charge accrue entraînant des températures plus élevées et donc des émissions d'oxyde d'azote plus élevées. La friction accrue entre les pièces mobiles dans l'huile en détérioration entraîne également des températures plus élevées et une production accélérée d'oxyde d'azote, avec une réduction moyenne de 18,7 % lorsque l'huile est traitée à l'acide. Quant à Usman 2021, il confirme que les émissions d'oxydes d'azote suivent une tendance similaire à la température des gaz d'échappement, étant faibles à faible couple et augmentant considérablement à couple élevé en raison de la forte dépendance à la température de la formation d'oxydes d'azote. L'huile recyclée présente une réduction de 17,9 % des émissions par rapport à l'huile usagée, tandis que les émissions plus élevées provenant de l'huile dégradée sont dues aux changements des propriétés de l'huile lubrifiante et à l'effet de la température des gaz d'échappement. La faible viscosité cinématique de l'huile en détérioration augmente également la friction entre les pièces mobiles, ce qui entraîne une

augmentation des émissions d'oxydes d'azote en raison des températures plus élevées dans la chambre de combustion. Un maximum de 2,7 g/kWh a été enregistré pour un moteur fonctionnant à l'huile usagée à 100 % de couple. La principale différence entre les deux sources réside dans les détails de la réduction des émissions d'oxyde d'azote lors de l'utilisation d'huile traitée ou récupérée, Usman 2020 indiquant 18,7 %, tandis qu'Usman 2021 indique 17,9 %. Usman 2021 ajoute également des valeurs numériques pour les émissions de NO_x à couple élevé, qui n'étaient pas mentionnées dans Usman 2020. Les oxydes d'azote sont générés à des températures élevées dans la chambre de combustion. Une huile détériorée avec une viscosité insuffisante entraîne une augmentation excessive de la température, ce qui favorise la formation d'oxydes d'azote. Les tests montrent que le pétrole récupéré réduit ces émissions jusqu'à 18,7 % (Usman 2020) et 17,9 % (Usman 2021).¹⁸⁻²⁰

La figure 13 montre la réduction des oxydes d'azote en présence d'huiles recyclées, ce qui améliore l'efficacité du traitement thermique et chimique appliqué à ces huiles.

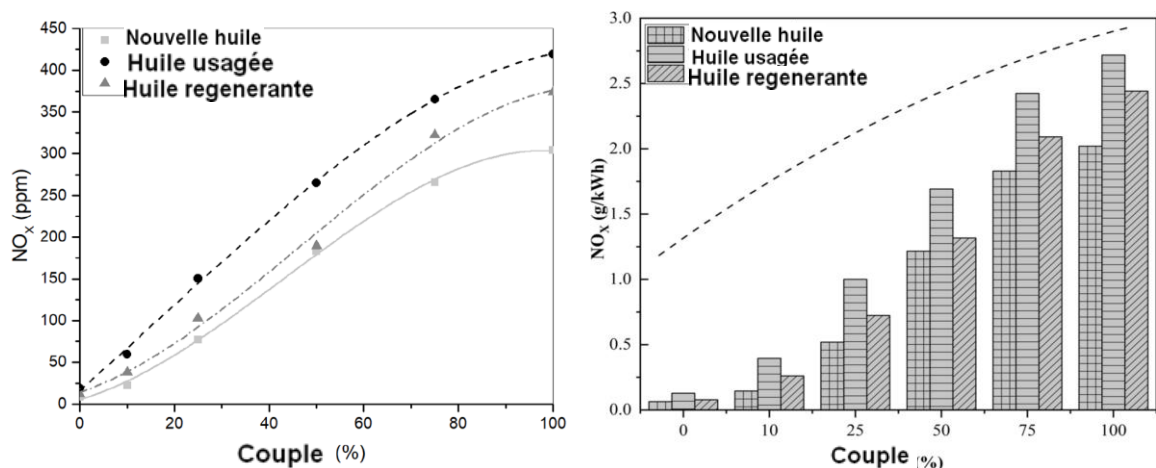


Figure 16 : Émissions d'oxydes d'azote (NO_x) selon les types d'huile et le pourcentage de couple

3.4.4 Émissions de monoxyde de carbone (CO) :

Dans le deuxième article, il a été constaté que les émissions de dioxyde de carbone dans les hôpitaux à couple élevé résultent de l'inertie accrue des composants du moteur, ce qui limite le temps de contact air-carburant et conduit à une combustion incomplète. Cette détérioration est due à une diminution de 4,9 % de la consommation totale d'eau. En revanche, l'étude du premier article n'a pas identifié d'émissions de monoxyde de carbone.

Le monoxyde de carbone est produit par une combustion partielle due à une mauvaise évaporation du carburant, souvent associée à une détérioration de l'huile. L'étude d'Usman de 2020 montre une augmentation significative du dioxyde de carbone avec l'huile usagée,

en particulier à couple élevé. Cependant, l'étude de 2021 ne fournit pas de résultats précis sur ce sujet.^{19,21,22}

Dans la figure 14, les émissions de CO₂ montrent une nette diminution avec l'utilisation de pétrole renouvelable, démontrant un meilleur mélange air-carburant et une combustion améliorée.

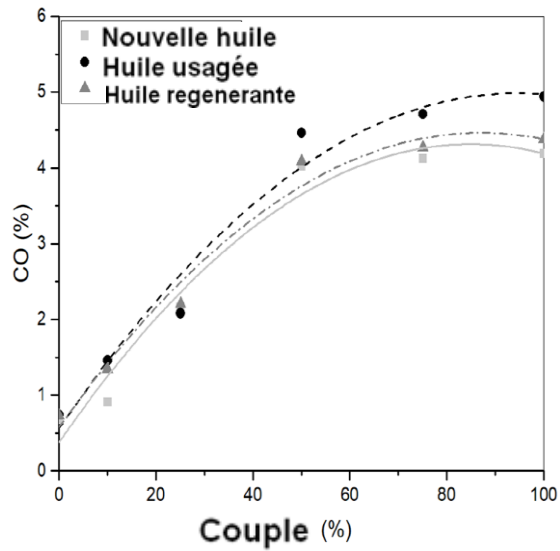


Figure 17 : Variation des émissions de monoxyde de carbone (CO) selon l'état de l'huile

Conclusion Générale

Le recyclage des huiles lubrifiantes usagées est un sujet vital d'une importance environnementale croissante, car ces huiles présentent un risque de pollution de l'eau, de l'air et du sol si elles ne sont pas traitées correctement. Avec l'utilisation toujours croissante des véhicules et la prolifération des huiles usagées, il est devenu impératif de trouver des solutions technologiques qui assurent la réutilisation efficace et durable de ces ressources pétrolières, tout en réduisant les émissions nocives qui en résultent.

Cet article se concentre sur l'étude de l'impact des procédés de raffinage des huiles moteur usagées sur les propriétés physiques et chimiques de ces huiles, leurs performances dans les moteurs à combustion interne, en particulier les moteurs à allumage commandé, et leur impact sur la réduction des émissions de gaz. Trois articles scientifiques évalués par des pairs ont été analysés, chacun utilisant une technique de raffinage différente :

En ce qui concerne les propriétés physiques des huiles raffinées, le troisième article, qui s'appuyait sur la méthode d'extraction par solvant et de floculation chimique utilisant MEA, a montré des performances exceptionnelles. Cette méthode a permis de récupérer des propriétés très proches de celles de l'huile vierge HVI-150, notamment en termes de stabilité à l'oxydation, de point éclair, de point d'écoulement et de viscosité, ce qui en fait la meilleure en termes de qualité du produit final. Il a également montré une grande efficacité dans l'élimination des impuretés minérales et des composés oxydants, ce qui se reflète directement dans la réduction de la teneur en cendres. Alors que le premier article, qui s'appuyait sur un traitement acide utilisant de l'acide acétique, a enregistré la plus forte réduction de l'indice d'acidité total (TAN) de 48,8 % et une amélioration significative de la viscosité et de la densité, avec environ 50 % des propriétés perdues récupérées.

En ce qui concerne les émissions gazeuses provenant de l'utilisation d'huiles dans les moteurs à quatre temps, le premier ingrédient (l'acide acétique) s'est à nouveau révélé le plus efficace pour réduire les émissions d'hydrocarbures (HC), de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO₂). Les résultats de l'expérience ont montré une nette diminution de ces polluants après le processus de raffinage, reflétant l'efficacité de cette technologie pour réduire l'impact environnemental des huiles usagées. En termes d'oxydes d'azote (NO_x), la deuxième étude, qui a utilisé l'acide phosphorique dans le traitement, a

obtenu de meilleurs résultats, enregistrant une réduction de 42,2 %, le taux le plus élevé parmi toutes les études, démontrant la capacité de cette méthode à réduire l'un des polluants les plus dangereux associés à la combustion d'huiles détériorées.

Sur la base de ce qui précède, on peut dire que chaque technologie a excellé dans un aspect spécifique : le MEA avec extraction par solvant s'est avéré supérieur dans la restauration des propriétés physiques de l'huile, tandis que le traitement à l'acide acétique s'est avéré le plus complet dans la réduction des émissions gazeuses, tandis que le traitement à l'acide phosphorique était le meilleur en termes de réduction des émissions de NOx spécifiquement. Cela permet d'orienter le choix entre les méthodes en fonction de la priorité recherchée : la qualité de l'huile obtenue, la performance environnementale ou la réduction de certains polluants indésirables.

Dans un contexte mondial caractérisé par la transition énergétique et le développement durable, plusieurs approches peuvent être envisagées pour améliorer encore le recyclage des huiles usagées. Il s'agit notamment d'améliorer les procédés existants en intégrant des technologies plus propres telles que l'hydrotraitement avancé, le raffinage catalytique ou le développement de procédés de bioremédiation basés sur des micro-organismes capables de dégrader les polluants de manière plus respectueuse de l'environnement . Automatiser et miniaturiser les unités de régénération pour faciliter leur déploiement sur site (approche décentralisée) ou renforcer les politiques de collecte sélective et de traçabilité des huiles usagées, afin d'assurer une régénération de qualité. Enfin, l'intégration de systèmes de diagnostic intelligents sur site (sur les moteurs) pour surveiller l'état de dégradation de l'huile en temps réel, facilitant un recyclage plus ciblé et plus efficace. Ces axes ouvrent la voie et participent activement à la réduction de l'empreinte environnementale de l'industrie pétrochimique.

1

1

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Nacer, M.; Bahi, I. Recyclage des huiles usées par extraction liquide liquide. Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2024. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/37592> (accessed 2025-05-21).
- (4) Madani, A. Contribution à La Caractérisation et à La Régénération d'huiles Usagées Moteur Par Percolation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2008. <https://www.ccdz.cerist.dz/admin/notice.php?id=00000000000000867470000610> (accessed 2025-05-21).
- (5) tice.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/ORGANIQUE.htm. <https://tice.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/ORGANIQUE.htm> (accessed 2025-05-21).
- (6) Usman, M.; Jamil, M. K.; Riaz, F.; Hussain, H.; Hussain, G.; Shah, M. H.; Qyum, M. A.; Salman, C. A.; Lee, M. Refining and Reuse of Waste Lube Oil in SI Engines: A Novel Approach for a Sustainable Environment. *Energies* **2021**, *14* (10), 2937. <https://doi.org/10.3390/en14102937>.
- (7) Usman, M.; Saqib, S.; Zubair, S. W. H.; Irshad, M.; Kazmi, A. H.; Noor, A.; Zaman, H. U.; Nasir, Z.; Ijaz Malik, M. A. Experimental Assessment of Regenerated Lube Oil in Spark-Ignition Engine for Sustainable Environment. *Advances in Mechanical Engineering* **2020**, *12* (7), 1687814020940451. <https://doi.org/10.1177/1687814020940451>.
- (8) Yang, X.; Chen, L.; Xiang, S.; Li, L.; Xia, D. Regeneration of Waste Lubricant Oil by Extraction–Flocculation Composite Refining. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2013**, *52* (36), 12763–12770. <https://doi.org/10.1021/ie4015099>.
- (9) Scapin, M. A.; Duarte, C.; Sampa, M. H. O.; Sato, I. M. Recycling of the Used Automotive Lubricating Oil by Ionizing Radiation Process. *Radiation Physics and Chemistry* **2007**, *76* (11), 1899–1902. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.03.017>.
- (10) Brostow, W.; Lobland, H. E. H.; Pal, S.; Singh, R. P. POLYMERIC FLOCCULANTS FOR WASTEWATER AND INDUSTRIAL EFFLUENT TREATMENT. *31*.
- (11) Rincón, J.; Cañizares, P.; García, M. T. Waste Oil Recycling Using Mixtures of Polar Solvents. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2005**, *44* (20), 7854–7859. <https://doi.org/10.1021/ie0580452>.
- (12) Rincón, J.; Cañizares, P.; García, M. T.; Gracia, I. Regeneration of Used Lubricant Oil by Propane Extraction. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2003**, *42* (20), 4867–4873. <https://doi.org/10.1021/ie030013w>.
- (13) *Waste lubricating oil rerefining by extraction-flocculation. I. A scientific basis to design efficient solvents | Industrial & Engineering Chemistry Research*. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie00079a023> (accessed 2025-05-21).
- (14) Manfredi, L.; Hill, R. J.; van de Ven, T. G. M. Bridging Flocculation of PEI-Functionalized Latex Particles Using Nanocrystalline Cellulose. *Journal of Colloid and Interface Science* **2011**, *360* (1), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.04.081>.
- (15) Yasarla, L. R.; Ramarao, B. V. Dynamics of Flocculation of Lignocellulosic Hydrolyzates by Polymers. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2012**, *51* (19), 6847–6861. <https://doi.org/10.1021/ie202567c>.

BIBLIOGRAPHIE

- (16) *Exhaust Hydrocarbon Emissions from Gasoline Engines - Surface Phenomena*. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/720255/> (accessed 2025-05-21).
- (17) Lubricating oil influence on exhaust hydrocarbon emissions from a gasoline fueled engine. *Tribology International* **2011**, *44* (12), 1796–1799. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.07.003>.
- (18) *Alternative Diesel Fuels Effects on Combustion and Emissions of an Euro5 Automotive Diesel Engine on JSTOR*. <https://www.jstor.org/stable/26272646> (accessed 2025-05-21).
- (19) Usman, M.; and Hayat, N. Lubrication, Emissions, and Performance Analyses of LPG and Petrol in a Motorbike Engine: A Comparative Study. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* **2020**, *43* (1), 47–57. <https://doi.org/10.1080/02533839.2019.1676656>.
- (20) Usman, M.; Hayat, N.; Bhutta, M. M. A. SI Engine Fueled with Gasoline, CNG and CNG-HHO Blend: Comparative Evaluation of Performance, Emission and Lubrication Oil Deterioration. *J. Therm. Sci.* **2021**, *30* (4), 1199–1211. <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1268-4>.
- (21) Yontar, A. A.; Doğu, Y. Investigation of the Effects of Gasoline and CNG Fuels on a Dual Sequential Ignition Engine at Low and High Load Conditions. *Fuel* **2018**, *232*, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.156>.
- (22) Ma, F.; Wang, M.; Jiang, L.; Deng, J.; Chen, R.; Naeve, N.; Zhao, S. Performance and Emission Characteristics of a Turbocharged Spark-Ignition Hydrogen-Enriched Compressed Natural Gas Engine under Wide Open Throttle Operating Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy* **2010**, *35* (22), 12502–12509. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.053>.