

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie chimique

Intitulé du mémoire :

**Amélioration du point d'écoulement du gasoil par
l'ajout d'additifs**

Présenté par :

Kherabet Rania

Zoubiri Wissal

Encadré par :

Mme. Brahim Meriem

Mr. Guendouz Rachid

Année universitaire 2023/2024

Résumé

L'objectif de ce travail est de résoudre le problème de gélification du gasoil produit par la raffinerie d'Alger, qui survient après la cristallisation des paraffines à basses températures. Ceci est réalisé en ajoutant deux additifs testés et comparés au kérosène, pour améliorer le point d'écoulement sans altérer significativement les autres caractéristiques physico-chimiques du diesel.

Les résultats ont montré l'efficacité des additifs dans l'amélioration du point d'écoulement sans affecter considérablement les autres propriétés. L'additif EC5905A s'est avéré plus économique en raison de la petite quantité requise pour le processus.

Mots clés : gasoil, point d'écoulement, densité, viscosité, distillation, point d'éclair.

Abstract

The objective of this work is to solve the problem of gelling of the gas oil produced by the Algiers refinery, which occurs after the crystallization of paraffins at low temperatures. This was achieved by adding two additives which were tested and compared with kerosene, to improve the pour point without significantly altering the other physic-chemical characteristics of diesel.

The results showed the effectiveness of the additives in improving the pour point without significantly affecting the other properties. The additive EC5905A was found to be more economical due to the small amount required for the process.

Key words: diesel, pour point, density, viscosity, distillation, flash point.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو حل مشكلة تبلور الديزل التي تنتجها مصفاة الجزائر العاصمة، والتي تحدث بعد تبلور البارافينات في درجات حرارة منخفضة. وقد تحقق ذلك عن طريق إضافة اثنين من الإضافات تم اختبارها ومقارنتها مع الكيروسين، لتحسين نقطة التدفق دون تغيير كبير في الخصائص الفيزيائية والكيميائية الأخرى من الديزل.

أظهرت النتائج فعالية المواد المضافة في تحسين نقطة التدفق دون التأثير بشكل كبير على الخصائص الأخرى. أثبتت المادة

المضافة EC5905A أنها أكثر اقتصادا بسبب الكمية الصغيرة المطلوبة للعملية

الكلمات المفتاحية: الديزل، نقطة التدفق، الكثافة، اللزوجة، التقطير، نقطة الوميض.

Remerciements

Nous commençons notre journée exceptionnelle, en exprimant notre gratitude envers Dieu pour nous avoir donné la force et la détermination nécessaires pour concrétiser notre projet.

Mes plus sincères félicitations et remerciements à nos familles, qui ont joué un rôle crucial dans notre parcours éducatif et dans la réalisation de cette grande réussite.

Un grand merci à Mme Brahim Meriem pour son soutien continu, son encouragement constant. Nous vous en sommes très reconnaissants.

Nous tenons également à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous aimerions également exprimer notre gratitude à la société Sonatrach pour nous avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet et pour leur soutien tout au long de ce parcours.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude et notre appréciation à tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ma remise de diplôme et ma joie

À mes chers parents

*Mon paradis, **ma mère Fatma**, et **mon père Bouzid**, qui ont fait de moi une femme. Merci pour votre amour, votre patience et vos encouragements, qui m'ont permis de surmonter les défis et de persévérer dans mes études. C'est en grande partie grâce à vous que ce mémoire a pu voir le jour.*

À mes petits frères

Omar et Mohamed pour l'amour qu'ils me réservent

À mes chères sœurs

Douaa, ta joie de vivre et ton enthousiasme m'ont donné la force nécessaire pour avancer.

Aya, qui n'a cessé de m'encourager et d'accepter mon amour et mon amitié sans rien en retour.

À mes chères copines

Ikram, Hind, Imane, pour leur tous les moments incroyables que nous avons partagés ensemble.

Vous êtes des amis merveilleux et je suis reconnaissant pour votre amitié.

À mon ami

Merci pour votre présence, votre soutien indéfectible et votre compréhension. Vous avez rendu ce parcours académique plus agréable et enrichissant.

À ma binôme Rania

Pour les efforts déployés afin de contribuer au succès de ce mémoire.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Zoubiri Wissal

Dédicaces

À mon cher père

Votre présence chaleureuse est une source d'inspiration et de luminosité dans ma vie. j'apprécie tout ce que tu as fait pour moi ,merci d'être dans ma vie et je suis fière d'être votre fille.

À ma chère mère

La lumière de mes yeux et source de tendresse, de sacrifice et de confiance. Grâce à ta présence pour moi et à ton soutien inébranlable, j'ai grandi et je suis devenue la fille que je suis aujourd'hui. Merci d'être dans ma vie.

À ma chère sœur Ikram

Mon âme sœur, ma meilleur amie merci pour votre soutien et le partage de joie dans toutes les situations. et de rendre ma vie plus belle.

À mon cher frère Abd el Raouf

À mon fidèle ami et soutien constant en toutes circonstances, merci pour toute l'inspiration, les encouragements et l'amour sincère.

À mes copines

*La deuxième famille pour moi, que ce soit **Nessrine, Soumia, Ferial , Maria, Hassina**, je vous remercie pour votre présence dans ma vie, et votre soutien continu.*

Ma binôme zoubiri wissal

Merci de votre soutien continu et vos efforts déployés pour contribuer au succès de ce travail.

Kherabet Rania

Sommaire

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Page

Introduction générale01

Chapitre 1 : Généralités sur le pétrole brut et le raffinage

1.1. Généralités sur pétrole brut03

1.1.2. Origine de pétrole brut03

1.1.3. Composition chimique des produits pétroliers03

1.1.3.1. Les hydrocarbures04

1.1.3.2. Composés sulfurés05

1.1.3.3. Composés azotés06

1.1.3.4. Composés oxygénés06

1.1.3.5. Composées métalliques06

1.1.4. Classification des pétroles bruts06

1.1.4.1. Classification Industrielle07

1.1.4.2. Classification Chimique07

1.1.4.3. Classification Technologique07

1.1.5. Processus de formation du pétrole brut08

1.1.6. Classement du pétrole brut algérien et demande09

1.2. Généralités sur le raffinage10

1.2.1. Le raffinage dans le monde10

1.2.2. Le raffinage en Algérie11

1.2.3. Historique et Situation Géographique12

1.2.4. Capacités de traitement13

Chapitre 2 : Généralité sur le gasoil

2.1. Introduction15

2.2. Description des étapes de production du gasoil15

| | |
|---|----|
| 2.2.1. Distillation atmosphérique | 15 |
| 2.2.2. Distillation sous vide | 17 |
| 2.2.3. Circuit du gasoil | 18 |
| 2.2.4. Stockage du gasoil | 19 |
| 2.2.5. Echantillonnage..... | 20 |
| 2.3. Composition de gasoil | 20 |
| 2.4. Les familles de gasoil..... | 21 |
| 2.5. Propriétés physico-chimiques du gasoil | 22 |
| 2.5.1. Indice de cétane | 22 |
| 2.5.2. Teneur en soufre | 23 |
| 2.5.3. Densité | 24 |
| 2.5.4. Distillation..... | 24 |
| 2.5.5. Viscosité | 24 |
| 2.5.6. Le point d'éclair (Pensky, Flash Point) | 25 |
| 2.6. Propriétés à froid du gasoil | 25 |
| 2.6.1. Point d'écoulement | 25 |
| 2.6.2. Point de trouble | 26 |
| 2.6.3. Température limite de filtrabilité | 26 |
| 2.7. Utilisation de gasoil | 26 |
| 2.8. Amélioration des propriétés à froid du gasoil..... | 26 |
| 2.8.1. Sélection et constitution de la coupe gasoil..... | 27 |
| 2.8.2. Utilisation d'un catalyseur à base d'un mélange de zéolithes | 27 |
| 2.8.3. Incorporation d'additifs | 28 |
| 2.9. Additifs de carburants NALCO® | 30 |
| 2.10. Travaux antérieurs | 31 |

Chapitre 3 : Matériels et méthodes

| | |
|--|----|
| 3.1. Produits utilisés..... | 33 |
| 3.1.1. Gasoil utilisé | 33 |
| 3.1.2. Kérosène | 33 |
| 3.1.3. Additifs utilisés et leurs propriétés physico-chimiques | 34 |
| 3.2. Méthodes expérimentales..... | 36 |
| 3.2.1. Détermination du point d'écoulement | 36 |
| 3.2.1.1. Principe | 36 |
| 3.2.1.2. Matériels utilisés | 36 |
| 3.2.1.3. Mode opératoire | 37 |
| 3.2.2. Détermination de la densité | 39 |
| 3.2.2.1. Principe | 39 |
| 3.2.2.2. Matériels utilisés | 39 |
| 3.2.2.3. Mode opératoire | 39 |
| 3.2.3. Distillation ASTM | 40 |
| 3.2.3.1. Principe | 40 |
| 3.2.3.2. Matériels utilisés | 40 |
| 3.2.3.3. Mode opératoire | 41 |
| 3.2.4. Détermination de la température limite de filtrabilité..... | 42 |
| 3.2.4.1. Principe | 42 |
| 3.2.4.2. Matériels utilisés | 42 |
| 3.2.4.3. Mode opératoire | 43 |
| 3.2.5. Détermination du point d'éclair | 43 |
| 3.2.5.1. Principe | 43 |
| 3.2.5.2. Matériels utilisés | 44 |
| 3.2.5.3. Mode opératoire | 44 |
| 3.2.6. Détermination de la viscosité..... | 45 |

| | |
|---|----|
| 3.2.6.1. Principe | 45 |
| 3.2.6.2. Matériels utilisés | 45 |
| 3.2.6.3. Mode opératoire | 46 |
| 3.2.7. Détermination de la teneur en soufre | 46 |
| 3.2.7.1. Principe | 46 |
| 3.2.7.2. Matériels utilisés | 47 |
| 3.2.7.3. Mode opératoire | 47 |
| 3.2.8. Détermination du l'indice de cétane..... | 47 |
| 3.2.8.1. Principe..... | 47 |

Chapitre 4 : Résultats et discussions

| | |
|---|----|
| 4.1. Propriétés du gasoil produit par la raffinerie d'Alger | 49 |
| 4.2. Effet de l'ajout de kérosène sur les propriétés du gasoil | 50 |
| 4.2.1. Résultats des propriétés à froid du gasoil | 50 |
| 4.2.1.1. Point d'écoulement | 50 |
| 4.2.1.2. Température limite de filtrabilité | 52 |
| 4.2.2. Effet du kérosène sur les propriétés physico-chimiques du gasoil | 53 |
| 4.2.2.1. Densité | 53 |
| 4.2.2.2. Distillation ASTM | 54 |
| 4.2.2.3. Point d'éclair (Pensky)..... | 55 |
| 4.2.2.4. Viscosité..... | 57 |
| 4.2.2.5. Teneur en soufre | 58 |
| 4.2.2.6. Indice de cétane..... | 59 |
| 4.2.3. Interprétation globale sur l'effet du kérosène sur le gasoil..... | 60 |
| 4.3. Effet de l'ajout d'additifs NALCO sur les propriétés du gasoil..... | 61 |
| 4.3.1. Effet des additifs sur les propriétés à froid du gasoil..... | 61 |
| 4.3.1.1. Point d'écoulement | 61 |

| | |
|--|----|
| 4.3.1.2. Température limite de filtrabilité | 63 |
| 4.3.2. Effet des additifs sur les propriétés physico-chimiques du gasoil | 66 |
| 4.3.2.1. Densité | 66 |
| 4.3.2.2. Distillation..... | 66 |
| 4.3.2.3. Point d'éclair (Pensky)..... | 68 |
| 4.3.2.4. Viscosité..... | 69 |
| 4.3.2.5. Teneur en soufre | 69 |
| 4.3.2.6. Indice de cétane..... | 70 |
| 4.4. Etude économique..... | 72 |
| Conclusion générale..... | 73 |
| Référence bibliographie | |
| Annexe | |

Liste des figures

| | Page |
|---|-------------|
| Figure 1.1 : Exemples d'hydrocarbures cycliques. | 04 |
| Figure 1.2 : exemple structure de thiophène (1) et thiophane (2). | 05 |
| Figure 1.3 : Vue aérienne de la raffinerie d'Alger RA1G. | 13 |
| Figure 2.1 : Schéma du procédé de distillation atmosphérique. | 16 |
| Figure 2.2 : schéma du procédé de distillation sous vide. | 17 |
| Figure 2.3 : Schéma simplifié du circuit gasoil. | 19 |
| Figure 2.4 : Chromatogramme en phase gazeux du gasoil. | 20 |
| Figure 2.5 : Schéma simplifié de l'action des additifs sur le gasoil. | 29 |
| Figure 3.1 : Produit utilisé EC5372A. | 34 |
| Figure 3.2 : Produit utilisé EC5905A. | 34 |
| Figure 3.3 : Appareil de mesure du point d'écoulement. | 37 |
| Figure 3.4 : Densimètre automatique ISL VIDA. | 39 |
| Figure 3.5 : Schéma descriptive du montage de la distillation ASTM. | 41 |
| Figure 3.6 : Appareil de la distillation ASTM. | 41 |
| Figure 3.7 : Appareil de la température limite de filtrabilité. | 43 |
| Figure 3.8 : Appareil Pensky -Martens ASTM D93. | 44 |
| Figure 3.9 : Schéma des différents viscosimètres utilisés. | 45 |
| Figure 3.10 : photo de capillaire utilisé. | 46 |
| Figure 3.11 : Spectromètre rayon X PANalytical ZETIUM. | 47 |
| Figure 4.1 : Influence de l'ajout de kérosène sur le point d'écoulement du gasoil. | 51 |
| Figure 4.2 : Influence de l'ajout de kérosène sur la température limite de filtrabilité du gasoil. | 52 |
| Figure 4.3 : Évolution de la densité du gasoil avec l'ajout de kérosène. | 54 |
| Figure 4.4 : Résultats de la distillation selon la norme ASTM. | 55 |

| | |
|--|----|
| Figure 4.5 : Influence de l'ajout de kérosène sur le point d'éclair du gasoil. | 56 |
| Figure 4.6 : Influence de l'ajout de kérosène sur la viscosité du gasoil. | 57 |
| Figure 4.7: Influence de l'ajout de kérosène sur la teneur en soufre du gasoil. | 58 |
| Figure 4.8 : Influence de l'additif EC5372A sur le point d'écoulement. | 62 |
| Figure 4.9 : Effet de l'additif EC5905A sur le point d'écoulement. | 63 |
| Figure 4.10 : Influence de l'additif EC5372A sur la température limite de filtrabilité. | 64 |
| Figure 4.11 : Influence de l'additif EC5905A sur la température limite de filtrabilité. | 65 |
| Figure 4.12 : Résultats de la distillation pour le gasoil de référence et les mélanges gasoil/additifs. | 67 |
| Figure 4.13 : influence des additifs sur le point d'éclair du gasoil sans et avec additifs. | 68 |

Liste des tableaux

| | Page |
|---|-------------|
| Tableau 1.1 : Capacité de production annuelle de la raffinerie d'Alger. | 14 |
| Tableau 2.1 : Propriétés des réservoirs de stockage du gasoil. | 19 |
| Tableau 2.2 : composition par familles chimiques d'un gasoil. | 21 |
| Tableau 2.3 : Propriétés de différents types de gasoil. | 22 |
| Tableau 3.1 : Propriétés physico-chimiques de kérosène. | 33 |
| Tableau 3.2 : Propriétés physico-chimiques du produit EC5905A et EC5372A. | 35 |
| Tableau 3.3 : Gammes de température du bain et de l'échantillon. | 38 |
| Tableau 4.1 : Propriétés du gasoil utilisé et spécifications. | 49 |
| Tableau 4.2 : Effet de l'ajout de kérosène sur le point d'écoulement du gasoil. | 50 |
| Tableau 4.3 : Effet de l'ajout de kérosène sur la température limite de filtrabilité du gasoil. | 52 |
| Tableau 4.4 : Effet de l'ajout de kérosène sur la densité du gasoil. | 53 |
| Tableau 4.5 : Résultats de la distillation ASTM. | 55 |
| Tableau 4.6 : Effet de l'ajout de kérosène sur le point d'éclair du gasoil. | 56 |
| Tableau 4.7 : Effet de l'ajout de kérosène sur la viscosité du gasoil. | 57 |
| Tableau 4.8 : Effet de l'ajout de kérosène sur la teneur en soufre du gasoil. | 58 |
| Tableau 4.9 : Effet de l'ajout de kérosène sur l'indice de cétane du gasoil. | 59 |
| Tableau 4.10 : Effets des additifs sur le point d'écoulement du gasoil. | 61 |
| Tableau 4.11 : Effets des additifs sur la température limite de filtrabilité. | 64 |
| Tableau 4.12 : Effet des additifs sur la densité du gasoil. | 66 |
| Tableau 4.13 : Résultats de la distillation ASTM du gasoil de référence et des mélanges gasoil/additifs. | 67 |
| Tableau 4.14 : Effets des additifs sur le point d'éclair du gasoil sans et avec additifs. | 68 |
| Tableau 4.15 : Effets des additifs sur la viscosité cinématique à 40°C du gasoil. | 69 |

| | |
|---|----|
| Tableau 4.16 : Effets des additifs sur la teneur en soufre du gasoil. | 70 |
| Tableau 4.17 : Effets des additifs sur l'indice de cétane du gasoil. | 70 |
| Tableau 4.18 : Récapitulatif des résultats des propriétés du gasoil - effet des additifs. | 71 |
| Tableau 4.19 : Résultats comparatifs des coûts de production pour le traitement du gasoil avec le kérosène et EC5905A. | 72 |

Liste des abréviations

ASTM: American Society for Testing and Materials.

A.P.I: American Petroleum Institute.

Fuel BTS : fioul à très basse teneur en soufre.

TCAC : taux de croissance annuel composé.

HDS : unité d'hydrodésulfuration.

BP : Basse Pression.

Jet A1 : Kérosène.

IC : l'indice de cétane.

PE : point d'écoulement.

PT : point de trouble.

TLF : La température limite de filtrabilité.

PÉ : Point d'éclair

C : concentration.

PI: Point Initial.

PF: point Final.

NA : Norme Algérienne.

R1AG : Raffinerie d'Alger.

ppm : partie par million.

v: viscosité cinématique.

k : constante du viscosimètre.

t: temps d'écoulement en secondes.

TND : teneur non déterminé.

max : maximum.

min : minimum.

Introduction générale

En tant que principale source d'énergie mondiale, le pétrole fournit près de la moitié des besoins en énergie primaire, ce qui rend notre civilisation industrielle moderne dépendante de son approvisionnement à grande échelle.

L'industrie de raffinage est une industrie lourde qui transforme le pétrole brut en produits énergiques tels que les matières premières pétrochimiques, les lubrifiants, les essences, les paraffines, et les bitumes. Cette industrie est dynamique, donc moderne, sa structure évolue constamment pour satisfaire la demande quantitative et qualitative d'un marché qui ne cesse de demander de l'énergie moins coûteuse mais plus satisfaisante chaque jour qui né. Dans ces conditions, les temps d'amortissement du matériel doivent être très courts, la recherche de nouveaux procédés et l'amélioration des rendements demeurent un objectif permanent [1].

Les carburants diesel sont l'un des sous-produits issus du brut et qui sont des mélanges de couleur pâle constitués de paraffines, de naphènes et d'hydrocarbures aromatiques. Ils peuvent aussi contenir des quantités modérées d'oléfines. Ces produits sont utilisés comme carburant pour les moteurs à combustion interne à auto-allumage et comme combustible par les secteurs domestique, industriel et artisanal, et ont un point d'éclair supérieur à 60 °C et un point d'ébullition compris entre 163 °C et 371 °C environ. Ils sont souvent soumis à un traitement d'hydrodésulfuration destiné à améliorer leur stabilité. La qualité de ces fuels légers exige un indice de cétane assurant un bon démarrage et une bonne combustion, un point d'éclair et un point d'écoulement bien précis et l'absence de dépôts dans les réservoirs [2].

D'une manière générale, l'évaluation de la résistance au froid des carburants est prioritaire, avec des valeurs maximales de point d'écoulement, de point de trouble et de températures limites de filtrabilité adoptées dans chaque pays pour éviter d'éventuels problèmes de cristallisation du diesel pendant les saisons froides.

L'augmentation de la viscosité associée à la cristallisation des paraffines à basse température entrave le transport du gasoil dans les pipelines et durant les opérations de production et de stockage. Lorsque sa température descend en-dessous d'un certain, cela est appelé le point d'écoulement, le gasoil est sujet à la gélification et ne coule plus dans les canalisations. D'où les spécifications commerciales du gasoil sur le marché incluent son point d'écoulement. L'une des

solutions au problème de gélification consiste à essayer d'améliorer les paramètres de point d'écoulement du carburant diesel, et certaines entreprises industrielles recommandent d'ajouter divers additifs.

A cet égard, la raffinerie d'Alger traite 8000 tonnes de pétrole brut et extrait 2000 tonnes de gasoil par jour. Afin d'améliorer le point d'écoulement du diesel, 200 tonnes/jour de kérosène sont mélangés avec le gasoil avant d'être commercialisé.

Dans ce contexte et afin de réduire la consommation excessive du kérosène, ce combustible est coûteux et très demandé ailleurs. Nous nous sommes intéressées à tester au niveau de la raffinerie d'Alger, l'efficacité de deux composés proposés par la société NALCO[®], à savoir : EC5905A et EC5372A. La société propose ces abaisseurs de point d'écoulement comme solutions hautes performances qui maintiennent le flux des hydrocarbures même sous des profils thermiques défavorables pendant les opérations de production, de transport et de stockage.

Ce travail comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre donne des généralités sur le pétrole brut, ainsi les compositions chimiques et la classification et nous exposons aussi, d'une manière succincte, quelques généralités sur le raffinage et la raffinerie d'Algérie.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les étapes de production du gasoil ainsi que ses caractéristiques physico-chimiques, sa composition chimique et les différentes techniques d'améliorations du point d'écoulement. L'une des meilleures opérations est l'adjonction d'un additif qui lui aussi décrit dans ce chapitre.

Les méthodes et techniques expérimentales utilisées au laboratoire de la raffinerie d'Alger seront le sujet du troisième chapitre.

Le dernier chapitre décrit l'ensemble des résultats obtenus et leurs discussions.

Enfin, nous terminons ce travail par l'évaluation économique et la conclusion générale.

1.1. Généralités sur pétrole brut

Le pétrole, également connu sous le nom d'or noir, est l'une des matières premières les plus recherchées dans le monde en raison de son importance cruciale dans le développement économique, énergétique et technologique. Dans ce chapitre, nous aborderons les généralités sur le pétrole, son processus de formation, sa composition chimique et sa classification.

Le pétrole brut, dérivé des mots latins "Petra" et "oléum" signifiant "huile de pierre", est un liquide brun plus ou moins visqueux d'origine naturelle, constitué d'un mélange complexe d'hydrocarbures. Son exploitation est un pilier de l'économie industrielle contemporaine. Son surnom d'« or noir » fait référence à sa couleur et à son coût élevé [3].

1.1.2. Origine de pétrole brut [4]

Depuis sa découverte, ainsi que son importance, plusieurs savants se sont penchés sur le problème de l'origine de cette source d'énergie. Pour cela de nombreuses théories étaient émises, mais seules deux d'entre elles étaient prises en considération.

La première, celle de l'origine minérale défendue autrefois par de notables savants tels que MOISSAN et SABATIER.

Quant à la deuxième, la vraisemblable aujourd'hui, défendue autrefois par ENGLER et HOFER. En effet, ces deux savants ont réussi à obtenir au laboratoire des hydrocarbures à partir des végétaux et des poissons, ce qui a permis d'expliquer l'élaboration des immenses nappes de pétrole.

1.1.3 Composition chimique des produits pétroliers [5]

Le pétrole brut appelé aussi hydrocarbure, selon cette nomenclature, on distingue les deux mots hydrogène et carbone, qui sont les composants essentiels de tous les pétroles bruts ; leurs teneurs sont (83%-87%) pour le carbone et (11%-14%) pour l'hydrogène. Ces deux éléments forment les trois grandes familles des hydrocarbures qui sont :

- Les hydrocarbures aliphatiques.
- Les hydrocarbures cycliques.
- Les hydrocarbures mixtes.

Chapitre 1 : Généralités sur le pétrole brut et le raffinage

Mais on trouve aussi d'autres éléments qui le compose, qui sont plus au moins nocifs dans le traitement de brut ou lors de l'utilisation des fractions pétrolières finies, ces éléments sont: l'oxygène, le soufre, et l'azote (au total jusqu'au 6% à 7%) sous forme de composés.

D'autres composés sont détectés après analyse des cendres du pétrole tels que : As, Si, Na, Fe...

1.1.3.1. Les hydrocarbures [6]

Les hydrocarbures constituant le pétrole peuvent être classés en trois familles distinctes :

a. Hydrocarbures aliphatiques

Ce sont les hydrocarbures paraffiniques, oléfiniques et acétyléniques à chaîne ouverte :

- **Saturés** : Ce sont les alcanes C_nH_{2n+2} qui sont soit à structure normale, soit ramifiée (Isomérisé). Les pétroles paraffiniques contiennent environ 50% de paraffine (alcanes).
- **Non saturés** : Ils n'existent pas dans le brut, ils sont formés pendant le traitement du pétrole par les procédés de craquage thermique ou thermocatalytique. Ces coupes non saturées sont appelées les oléfines dont la formule générale est C_nH_{2n} pour les alcènes et C_nH_{2n-2} pour les alcynes (les acétyléniques).

b. Hydrocarbures cycliques

Généralement, le cycle comprend cinq ou six atomes de carbone. On distingue :

- **Cycles saturés** : Ce sont les hydrocarbures naphténiques ayant la formule C_nH_{2n} . Ils sont divisés en naphténiques monocycliques, bicycliques et polycycliques. Comme exemple, on cite le cyclopentane et le cyclohexane (figure 1.1).

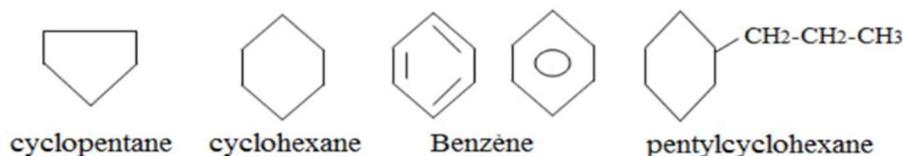


Figure 1.1 : Exemples d'hydrocarbures cycliques.

- **Cycles non saturés** : Ce sont les aromatiques de formule chimique C_nH_{2n-6} et dont la formule de base est celle du benzène C_6H_6 (figure 1.1). Parmi les composés aromatiques présents dans le brut, on cite les BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylène), le naphthalène, l'anthracène, le pyrène... etc.

c. Hydrocarbures mixtes

L'union des hydrocarbures cycliques et aliphatiques donne des molécules mixtes (cycle + chaîne). Les propriétés de ces molécules mixtes sont en fonction de l'importance du cycle ou des chaînes dans la structure.

1.1.3.2. Composés sulfurés

Pratiquement tous les pétroles contiennent du soufre et la teneur de ce dernier augmente avec l'augmentation de la température d'ébullition de la fraction pétrolière.

Ces composés sulfurés sont divisés en trois groupes :

- **Premier groupe** : comprend H_2S et $R-SH$ (mercaptans) qui ont des propriétés acides, corrosive et odeur désagréable.
- **Deuxième groupe** : renferme les sulfures $R-S-R'$ et disulfures $R-S-S-R'$ qui sont neutres à froid et instables à une température élevée entre 130 à 160°C pour donner les mercaptans et H_2S .
- **Troisième groupe** : renferme les composés hétérocycliques, à savoir thiophène (1) et thiophane (2). Ils sont instables à température élevée de l'ordre de 500 à 600°C pour donner les mercaptans et H_2S .



Figure 1.2 : exemple structure de thiophène (1) et thiophane (2).

Chapitre 1 : Généralités sur le pétrole brut et le raffinage

Les composés sulfurés sont indésirables parce qu'ils diminuent le nombre d'octane de l'essence, en agissant sur l'efficacité de l'action des additifs antidétonants tels que le P.T.E, (Plomb-tétraéthyle). Ces composés empoisonnent aussi les catalyseurs des procédés catalytiques.

1.1.3.3. Composés azotés [7]

La teneur en azote dans le pétrole brut varie de 0,02 à 2,5 % et augmente avec la température d'ébullition des fractions. L'azote est principalement présent sous forme de quinoléine, mais la plupart des composés azotés sont des poisons pour les catalyseurs. Tout comme les composés sulfurés, les composés azotés sont indésirables et sont éliminés lors de l'épuration par solvant sélectif, H₂SO₄ ou éther. Le pétrole algérien contient environ 1,4% d'azote. Les composés sulfurés, azotés et oxygénés se concentrent principalement dans les asphaltènes, qui sont utilisés pour fabriquer des bitumes.

1.1.3.4. Composés oxygénés [7]

Pratiquement, tous les pétroles renferment des composés oxygénés, ce sont des acides naphthéniques R-COOH ou les homologues du phénol, ils se concentrent principalement dans les fractions de gasoil et les acides naphthéniques à deux noyaux se retrouvent généralement dans les huiles. Les composés oxygénés sont aussi très corrosifs.

1.1.3.5. Composées métalliques

Ils existent sous forme de sels dissous dans l'eau mélangée avec le pétrole brut. Les métaux sont des poisons permanents pour les catalyseurs industriels. Parmi ces composés on trouve le Pb, As, P, V, Hg, ...

1.1.4. Classification des pétroles bruts [8]

A la découverte d'un gisement de pétrole, celui-ci est soumis à une série d'analyses permettant sa classification. Cette classification revêt une importance extrême car elle nous renseigne sur les méthodes de traitement du pétrole, l'assortiment et les qualités des produits à obtenir. On distingue trois types de classification :

1.1.4.1. Classification Industrielle

Selon la densité du brut mesurée à 15 °C (d_{15}), on a :

- Un pétrole est léger si $d_{15} < 0,828$.
- Un pétrole est moyen si $0,828 < d_{15} < 0,884$.
- Un pétrole est lourd si $d_{15} > 0,884$.

D'une manière générale, le pétrole brut léger contient des distillats légers (essence, kérosène, diesel léger) et des paraffines relativement de bonne qualité. Mais il y a très peu de soufre et peu de gomme. Cependant, le pétrole lourd est généralement une huile aromatique avec une faible teneur en essence, mais un indice d'octane élevé et une teneur élevée en gomme. Cette classification ne considère que la densité d_{15} et est encore incomplète.

1.1.4.2. Classification Chimique

En fonction de la prédominance d'une ou plusieurs familles des hydrocarbures, on peut distinguer les pétroles suivants :

- Un pétrole paraffiniques (Etats Unis).
- Un pétrole naphténiq (Rép d'Azerbaïdjan).
- Un pétrole paraffino-naphténiq (Algérie).
- Un pétrole aromatique (Indonésie).
- Un pétrole naphténo-aromatique (Californie).
- Un pétrole paraffino-naphtino-aromatique (mixte).

La classification chimique ne reflète pas la véritable nature du pétrole, puisque les fractions lourdes contiennent des hydrocarbures mélangés, cette classification ne nous renseigne donc pas pleinement sur la quantité et la qualité du produit à obtenir. Actuellement, l'approche la plus complète, et donc la plus couramment utilisée, reste la classification technique.

1.1.4.3. Classification Technologique

Elle est basée sur la :

a. Teneur en soufre dans le pétrole et dans les fractions pétrolières

- **Classe 1** : Pétrole peu sulfureux : $S \leq 0,5\%$.
- **Classe 2** : Pétrole sulfureux : $0,5 < S \leq 2\%$.

- **Classe 3** : Pétrole très sulfureux : $S > 2\%$.

b. Teneur potentielle en produits blancs ($PF \leq 350^\circ\text{C}$) [8]

On distingue trois types de pétrole :

- **Type 1** : teneur $\geq 45\%$.
- **Type 2** : teneur 30 à 45%.
- **Type 3** : teneur $\leq 30\%$.

c. Teneur en huiles de base et leurs qualités

En fonction de la teneur en huiles de base et d'huile résiduelle, on distingue les groupes et en fonction de leurs qualités (indice de viscosité), on distingue les sous-groupes.

d. Teneur en paraffines dans le pétrole

En fonction de la teneur en paraffines et de la possibilité de la fabrication des carburateurs et des carburants diesel et des huiles de distillat de base à partir du pétrole brut, avec ou sans déparaffinage, on distingue trois espèces de pétrole :

- Pétrole peu paraffiniques $\leq 15\%$.
- Pétrole paraffiniques 15 à 60%.
- Pétrole très paraffiniques $> 60\%$.

Le pétrole brut est donc un mélange de milliers d'hydrocarbures, de résidus solides et d'eau, et doit donc être traité à travers une série d'opérations et de procédés pour éliminer ses impuretés et extraire la quantité maximale de produit.

1.1.5. Processus de formation du pétrole brut [9]

La formation du pétrole brut découle de la géologie sédimentaire d'un lieu, et plus précisément de la succession de ces trois étapes :

Le pétrole est issu de composés organiques provenant d'organismes vivants tels que des animaux ou des végétaux qui vivent à la surface de la terre, notamment dans les océans et les milieux aquatiques. Ces matières organiques se déposent alors au fond des mers et des lacs où elles se mélangent aux sédiments qui vont par la suite former la roche-mère. C'est ce qu'on appelle le processus de sédimentation et de décomposition.

Chapitre 1 : Généralités sur le pétrole brut et le raffinage

Ensuite, au fond de ces bassins sédimentaires, cette matière organique se transforme progressivement en hydrocarbures sous forme de fluides ou sous forme "mobiles" sous l'action de l'enfouissement et de la température. Ces hydrocarbures s'accumulent dans des roches poreuses et donc perméables qui sont appelées "roches réservoirs". C'est à ce stade que surviennent les processus de maturation et de migration.

Enfin, le pétrole pour former des gisements, va être emprisonné sous des couches imperméables, appelées "roches-couvertures" et vont former ce que l'on appelle des pièges.

1.1.6. Classement du pétrole brut algérien et demande [10]

La demande de produits pétroliers a radicalement changé depuis le milieu du XXe siècle. Dans les pays industrialisés, le développement des transports routiers et aériens s'est accéléré, entraînant une demande accrue de produits légers comme le carburant. Dans le même temps, la consommation de pétrole lourd a diminué à mesure que d'autres sources d'énergie, comme le gaz naturel et l'énergie nucléaire, sont utilisées pour le chauffage et la production d'électricité.

Aujourd'hui, la demande mondiale de produits pétroliers se répartit approximativement comme suit :

- 40 % pour les distillats légers (carburant).
- 40 % pour les distillats moyens (fioul, gazole).
- 20 % pour les distillats lourds (cire, asphalte).

Le seul pétrole brut qui respecte plus ou moins ces pourcentages avant raffinage est le mélange saharien léger d'Algérie.

Le pétrole algérien est appelé Sahara Blend est classé en fonction de la classification chimique. Pétrole paraffino-naphténique, c'est un fioul à très faible teneur en soufre (Fuel BTS), un fioul aliphatique dont la teneur en soufre est inférieure ou égale à $\leq 0,5\%$.

1.2. Généralités sur le raffinage [11]

Le raffinage commence par la distillation ou le fractionnement du pétrole brut, en le séparant en ses différents hydrocarbures. Le produit obtenu dépend directement des propriétés du pétrole brut traité. La plupart de ces produits de distillation sont ensuite transformés en produits plus facilement utilisables par le craquage, le reformage et d'autres procédés de transformation qui modifient leurs structures physiques et moléculaires. Les produits résultants sont ensuite soumis à divers traitements et procédés de transformation, tels que l'extraction, l'hydrocraquage et désulfuration. Attendre la séparation. Produire des produits finis. Dans les raffineries les plus simples, la distillation atmosphérique et sous vide est généralement utilisée, tandis que les raffineries intégrées impliquent le fractionnement, la conversion, le traitement et le mélange, ainsi que la production de lubrifiants, de fiouls lourds et de bitume ; ces raffineries peuvent également inclure des installations de traitement pétrochimique.

1.2.1. Le raffinage dans le monde

Au cours de l'année 2000, la capacité mondiale de raffinage est restée pratiquement stable avec un total de 4064 Mt/an. Cette stabilité résulte d'un équilibre entre une diminution de capacité de 65 Mt/an dans les pays de l'ancien bloc soviétique, et une augmentation de 55 Mt/an en Asie (26,1 Mt/an), Amérique du sud (11,4 Mt/an) et Afrique 11,0 Mt/an. L'année 2000 a vu plus précisément la mise en service de quatre nouvelles raffineries, correspondant à une augmentation de la capacité de traitement de 19,5 Mt/an : deux pour la zone Asie Pacifique, une en Afrique et la quatrième en Russie. Les fermetures les plus notables sont celles des trois raffineries de Groznyï en Russie à la suite de leur destruction partielle pendant la guerre en Tchétchène. La seule autre fermeture importante est celle de la raffinerie SHELL de Zola en Norvège (2,7 Mt/an) à la fin du premier trimestre 2002. Les dépenses mondiales de l'industrie du raffinage sont restées à un niveau stable ; les dépenses de maintenance et d'investissement sont au même niveau. Les capacités de conversion augmentent un peu par rapport à l'année 1999, avec une hausse notable de la capacité d'hydrocraquage de 32 à 42 Mt/an dans l'Union européenne et une augmentation de 5% (5 Mt/an) en craquage catalytique en Asie. Sur une plus longue période, on observe une remontée de la production d'essences à fort indice d'octane aux Etats-Unis depuis 1998, une tendance à l'augmentation des capacités d'hydrocraquage dans toutes les zones et des capacités de craquage catalytique aux Etats-Unis et dans la zone Asie-Pacifique. Les 20 premières sociétés ont totalisé,

Chapitre 1 : Généralités sur le pétrole brut et le raffinage

en 2000, 49% des capacités mondiales de raffinage, soit 4% de plus qu'en 1999, avec 2000 Mt/an. Comme en 1999, plusieurs changements sont intervenus dans leur classement du fait de la poursuite des mouvements de concentration dans le secteur pétrolier. Le groupe Exxon-Mobil (272 Mt/an de capacités de raffinage) a ravi-la première place mondiale au groupe Royal Dutch. Shell 200 Mt/an. Le groupe TotalFinaElf (125 Mt/an) passe de la 11ème à la 6ème place. Enfin, le nouvel ensemble Chevron-Texaco est désormais le quatrième raffineur mondial, avec 136 Mt/an [12].

Le marché actuel du raffinage du pétrole est estimé à 1300 milliards de dollars actuellement et devrait atteindre 1386,72 milliards de dollars au cours des cinq prochaines années, avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) de plus de 1,3% pendant la période de prévision.

Ce marché est influencé par divers facteurs tels que la demande mondiale croissante de produits pétroliers raffinés, la croissance économique et l'industrialisation comme moteurs, tandis que les préoccupations environnementales et les réglementations agissent comme des freins.

D'autre part, la demande mondiale croissante de produits pétroliers raffinés est un moteur majeur du marché. La croissance démographique, l'urbanisation, l'industrialisation et le développement économique contribuent à cette demande accrue. Par exemple, la production mondiale de véhicules a augmenté de plus de 6% entre 2021 et 2022, ce qui devrait stimuler la demande de carburant.

Les principaux acteurs du marché du raffinage du pétrole comprennent Exxon Mobil Corporation, Shell PLC, Sinopec Corp., BP PLC et Saudi Arabian Oil Co. Parmi les développements récents figurent la collaboration de Rosneft avec des raffineurs indiens pour une nouvelle raffinerie et les discussions de financement d' Afrimbank avec la SAR du Sénégal pour la rénovation de la raffinerie. Le marché est stimulé par la demande mondiale croissante de produits pétroliers raffinés en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation et de l'industrialisation. L'Asie-Pacifique domine le marché, en particulier avec de grands projets en Chine et en Inde [13].

1.2.2. Le raffinage en Algérie [12]

En Algérie, l'industrie du raffinage est née avec la découverte et la production du pétrole de Hassi Messaoud. La première unité fut construite sur les lieux même de la découverte qui a été orientée vers la satisfaction des besoins excessifs des sociétés opérant dans le cadre de la recherche

Chapitre 1 : Généralités sur le pétrole brut et le raffinage

et l'exploitation de brut. Aussitôt l'indépendance acquise, l'Algérie s'est attachée à l'idée d'accéder au développement économique en avantageant la mise en place d'une industrie pétrolière par la transformation systématique de ses hydrocarbures. C'est ainsi que vont être réalisées diverses unités industrielles et des expansions de celle déjà en place en vue d'accroître les capacités de première transformation.

Dans le domaine du raffinage, l'Algérie possède cinq raffineries d'une capacité totale de production de 22,3 millions de tonnes par an, soit 45% environ de sa production de pétrole brut. A l'origine, ces raffineries étaient une partie intégrante de SONATRACH. En 1988, le raffinage a été séparé de l'activité distribution et érigé en entreprise nationale de raffinage de pétrole NAFTEC. En avril 1998, l'entreprise devient une filiale dont les actions détenues à 100 % par le holding raffinage et chimie SONATRACH avec un capital social de 12 milliards de dinars.

La société nationale de raffinage dénommé NAFTEC Spa a, pour principaux objectifs :

- Améliorer la valeur de la société sur le marché national.
- Continuer à assurer la couverture des besoins en produits raffinés sur le plan quantitatif et qualitatif dont un programme de suppression des essences avec plomb avec une réduction de 0,40 g/l depuis le 1^{er} janvier 1999 et de 0,15 g/l à partir du 1^{er} janvier 2002 et la suppression totale en 2005. À partir de juillet 2021, l'essence sans plomb a été généralisée, ce qui a entraîné des avantages significatifs pour le pays en termes de qualité des carburants. Cette décision a été prise lors de réunions officielles et a été mise en œuvre pour répondre aux normes environnementales et de santé publique. La transition vers l'essence sans plomb a été un pas important pour l'Algérie, démontrant son engagement envers des carburants plus propres et respectueux de l'environnement [14].
- Intégration d'une unité d'isomérisation pour la production de l'Eurosuper 95. Quant au gasoil, une unité d'hydrodésulfuration (HDS) est envisagée.

1.2.3. Historique et Situation Géographique [15,16]

La raffinerie d'Alger fut créée en décembre 1959 suite à la découverte du pétrole au sud algérien, le chantier fut ouvert en janvier 1960, le démarrage de la raffinerie n'a eu lieu que le 19 janvier par un groupe de compagnies étrangères participantes en projet qui sont :

Chapitre 1 : Généralités sur le pétrole brut et le raffinage

- Société Shell Algérie 24%.
- Compagnie française de pétrole 20%.
- ESSO méditerranéen Inc 17,6%.
- Total S.a.h.m 12%.
- Société française de pétrole BP 10,4%.
- SN Repal 10%.

La raffinerie d'Alger s'étend sur une superficie de 182 hectares (bâti et clôturé 96 Hectares). Elle est située à 5 km au sud d'EL-Harrach et à 20 km à l'est d'Alger ; cet emplacement a été choisi après étude du sol et la découverte d'une nappe d'eau qui est nécessaire pour l'alimentation des systèmes de refroidissement. En ce qui concerne le choix de la région algéroise, elle se présente comme un pôle futur de développement industriel. En plus, elle a l'avantage d'être le plus grand centre de consommation avec une part de 40% à 50% de la demande intérieure. Il apparaît clairement que la production à partir de la raffinerie d'Alger sera moins coûteuse que celle venant des autres raffineries.



Figure 1.3 : Vue aérienne de la raffinerie d'Alger RA1G.

1.2.4. Capacités de traitement [17]

La capacité de traitement de la raffinerie d'Alger a augmenté après réhabilitation de 2.7 à 3.5 millions tonnes par an de pétrole brut de Hassi-Messaoud. Les capacités annuelles de production des différentes unités sont représentées dans le tableau 1.1.

Chapitre 1 : Généralités sur le pétrole brut et le raffinage

Tableau 1.1 : Capacité de production annuelle de la raffinerie d'Alger.

| Produit | Production annuelle (tonnes) |
|----------------------|-------------------------------------|
| Reformat | 603333 |
| Isomérat | 364333 |
| Naphta (exportation) | 76000 |
| Fuel oil | 60000 |
| Propane | 69333 |
| Butane | 209667 |
| Essence | 740000 |
| Kérosène | 620666 |
| Gasoil | 1261667 |

2.1. Introduction

Le gasoil, également connu sous le nom de diesel, est un carburant dérivé du pétrole. Il est composé d'un mélange d'hydrocarbures s'évaporant entre 180 et 360°C. Ce carburant est largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels et de transport à travers le monde. Il est caractérisé par sa combustion efficace, sa haute densité énergétique et sa relative facilité de stockage et de transport. Ce carburant est essentiel dans les industries de l'automobile, du transport routier et maritime, ainsi que dans la production d'électricité.

Les qualités essentielles dans ces domaines incluent :

- Propreté (carbone Conradson, sédiments, eau, soufre).
- Combustion (indice de cétane).
- Fluidité et écoulement (viscosité et point d'écoulement).
- Volatilité (points de distillation et point éclair) [18].

2.2. Description des étapes de production du gasoil [19]

Le gasoil ou gazole préparé à base de pétrole brute est l'un des produits de la distillation atmosphérique (figure 2.1) qui se base sur le principe de l'évaporation partielle d'un liquide qui permet de fractionner un mélange d'hydrocarbure en des coupes pétrolières selon leurs températures d'ébullition en opérant dans un système où la vapeur est en équilibre avec un liquide résiduel.

2.2.1. Distillation atmosphérique [19,20]

La distillation du brut à lieu sous une pression atmosphérique ou sous vide (figure 2.1 et figure 2.2), et donne généralement les coupes pétrolières suivantes :

- les légers (composés gazeux et essences dont la température d'ébullition se situe entre 40 et 210°C),
- les moyens (kérosène, diesel et fuel domestique, dont la température d'ébullition se situe entre 170 et 360°C).
- les lourds (fuel lourd ou résidus).

L'alimentation liquide passe à travers un échangeur où elle est partiellement évaporée, et entre dans une colonne sous forme d'un mélange diphasique. Cette colonne assure une séparation

du liquide et de la vapeur ; la vapeur est condensée dans un condenseur et constitue le distillat. Le liquide recueilli au fond de la colonne constitue le résidu.

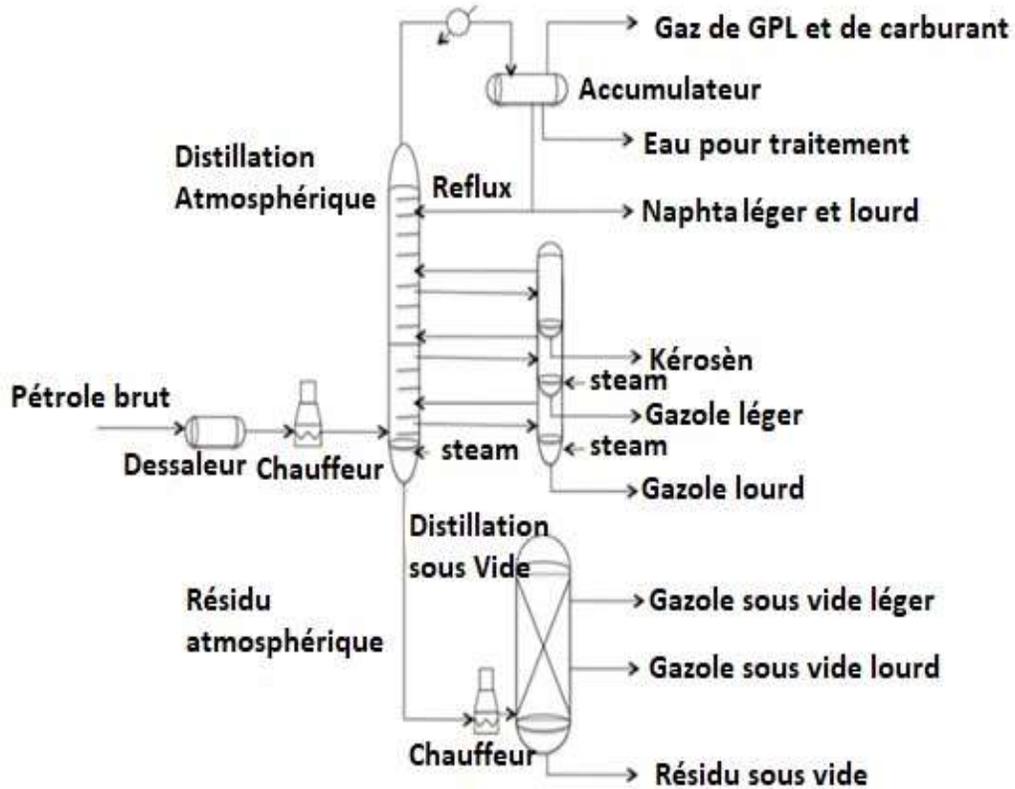


Figure 2.1 : Schéma du procédé de distillation atmosphérique [21].

Les fractions ayant un intervalle d'ébullition intermédiaire, dont le gazole, le naphta lourd et les distillats, sont soutirées latéralement dans la section médiane de la tour. Elles sont soumises à des opérations de finition en vue d'être utilisées comme kérosène, carburant diesel, gasoil combustible (mazout), carburacteurs, matières premières des unités de craquage catalytique et essences de base.

Les fractions plus lourdes à point d'ébullition plus élevé (appelées résidus ou queues de distillation) qui se condensent ou qui restent dans la partie inférieure de la tour, sont utilisées comme fiouls ou matières premières pour les unités de production de bitume ou de craquage, ou

sont acheminées vers un réchauffeur et une tour de distillation sous vide pour subir un fractionnement plus poussé.

2.2.2. Distillation sous vide [22]

Le résidu de la distillation atmosphérique est envoyé dans une colonne de distillation sous vide afin de poursuivre son fractionnement (figure 2.2). Cette colonne fonctionne à pression inférieure à la pression atmosphérique, et permet d'obtenir des distillats sous vide (fraction C20-C50) et un résidu sous vide (fraction C>50) appelé aussi « fond du baril ».

L'aspect opérationnel le plus important d'une unité sous vide est la qualité du gasoil lourd sous vide, en particulier lorsqu'il alimente une unité d'hydrocraquage. Le niveau de carbone Conradson et/ou la teneur en métaux est très critique pour une unité d'hydrocraquage et dépend surtout du fonctionnement et de la performance de la section de l'huile de lavage dans l'unité de distillation sous vide ainsi que du dessaleur dans l'unité de distillation de brut.

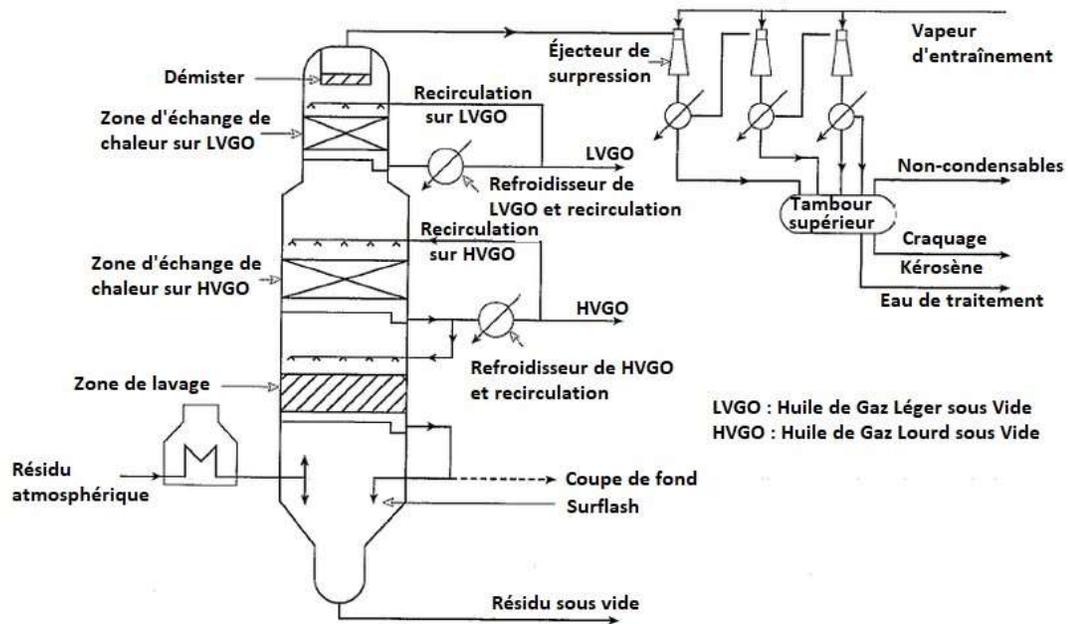


Figure 2.2 : schéma du procédé de distillation sous vide [23].

2.2.3. Circuit du gasoil [20]

Le gasoil est soutiré de la tour du plateau 18 au 21 et s'écoule par gravité, vers le stripeur C102C par l'intermédiaire du régulateur LIC104 maintenant un niveau constant dans ce dernier, qui est analogue au C103.

Le stripage est réalisé par injection de vapeur BP (Basse Pression ≈ 4 Bar) surchauffée pour éliminer la partie légère de gasoil ; celle-ci revient à la colonne de distillation. Le fond du stripeur est refroidi dans les échangeurs E105 et E502 de 305 à 195°C par échange de calories avec le brut flashé.

Après le chauffage du pétrole brut, il revient le gasoil au sécheur (C-102-B).

L'installation dispose d'un éjecteur de vide pour créer du vide dans le sécheur (C-102-B) à travers un ballon (D-105). Ce procédé a pour objectif, l'élimination de l'eau. La partie gasoil trouble est réinjectée dans le circuit de brut (D-102).

Le soutirage du gasoil se fait par une vanne automatique (FV0031) à l'aide de la pompe (P157); le gasoil sera ensuite refroidi et cette énergie thermique est récupérée pour chauffer le naphta instable (léger) dans l'échangeur (E-120).

La température du gasoil est abaissée de 140°C à 70°C par des aéro-réfrigérants (EA-105), puis de 70°C à 44°C dans un condenseur (E-158). A cette température, le produit est fini et transféré vers le stockage.

NB : une partie du gasoil léger, à la sortie de E114_{AR}, peut être utilisée comme huile de rinçages et envoyée dans différents appareils comme :

- Fond C101, C103B, C103C.
- Entrée E110, E117 et E107.
- Entrée E115_{AR} et E116_{AR}.

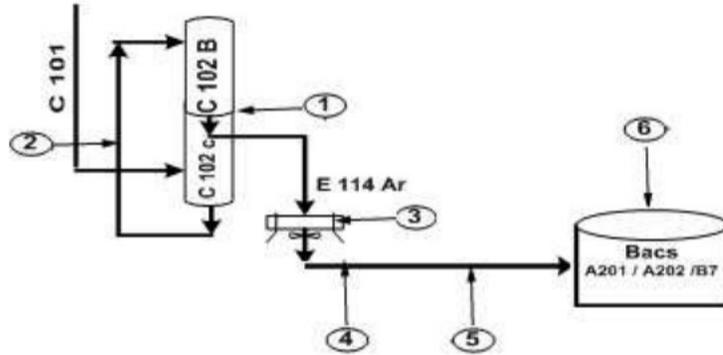


Figure 2.3 : Schéma simplifié du circuit gasoil [24].

2.2.4. Stockage du gasoil [24,25]

La raffinerie est équipée pour produire, stocker et expédier deux qualités d'essences finies (normal et super), jet A1, gasoil moteur, fuel BTS et naphta. Le gasoil moteur est obtenu par mélange en ligne des deux produits (kérosène, gasoil léger), avec des proportions bien définie pour respecter les spécifications requises.

Le nombre et la capacité des réservoirs ont été déterminés en fonction de la production et des enlèvements. Le gasoil est stocké dans des réservoirs définis par le tableau ci-dessous, qui sont des réservoirs pour produits légers (sauf les bacs de solvants) et qui ont un toit flottant. Les bacs à toit fixe disposent de soupape de respiration ou évents.

Tableau 2.1: Propriétés des réservoirs de stockage du gasoil [25].

| Items | Repères | Services | Volume m ³ | Nature de toit |
|-------|---------|--------------------|-----------------------|----------------|
| 01 | B7 | | 5000 | |
| 02 | A201 | Stockage de Gasoil | 20000 | Toit flottant |
| 03 | A202 | | 20000 | |

Tous les réservoirs, bien entendu, sont équipés d'une mise à la terre, de trous d'homme, de purge d'eau, (de purge de toit pour réservoirs à toits flottants), d'indicateurs et de transmetteurs de niveau et de températures.

2.2.5. Echantillonnage

Avant de prendre l'échantillon de l'unité au laboratoire pour les analyses, nous avons respecté les conditions suivantes :

- Rincer la bouteille d'échantillonnage avec l'échantillon pour faciliter le calcul.
- Refroidir ou chauffer l'échantillon s'il est nécessaire.

2.3. Composition de gasoil

Dans la gamme des molécules du gasoil provenant de la distillation du pétrole brut se trouvent les paraffines, les cyclo-paraffines et les molécules aromatiques, d'une ou deux substitutions de méthyle sur une longue chaîne carbonée (C8-C24). Les cyclo-paraffines ou naphthènes sont composés principalement d'un anneau de cyclohexane (ou deux anneaux dans une proportion mineure) avec plusieurs chaînes aliphatiques latérales [26].

Une chromatographie en phase gazeuse du diesel analysé révèle une composition chimique contenant plus de 1000 espèces. Les pics intenses du signal visibles sur cette chromatographie sont principalement des alcanes et des naphthalènes dont on distingue : (a) le nonane, (b) le décane, (c) l'undécane, (d) le dodécane, (e) le 2-methylnaphthalene, (f) le 1-methylnaphthalene, (g) le tridécane, (h) le tétradécane, (i) le pentadécane, (j) l'hexadécane, (k) l'heptadécane, (l) l'octadécane, (m) le nonadécane, (n) l'eicosane, (o) l'heneicosane, (p) le docosane, (q) le tricosane, et (r) la tétracosane [27].

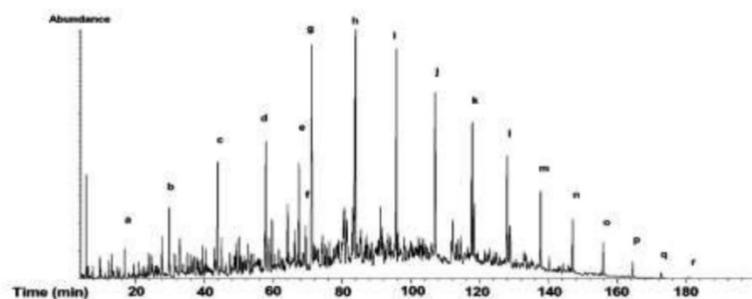


Figure 2.4 : Chromatogramme en phase gazeux du gasoil [27].

Le gasoil se compose par famille chimique. Le tableau suivant représente un exemple de composition chimique d'un gasoil analysé par spectrométrie de masse.

Tableau 2.2 : composition par familles chimiques d'un gasoil.

| Les familles chimiques | Les naphènes | Les paraffines | Naphtènes bicyclique | Alkyl benzène | Indène et tétralines | Naphtalène |
|------------------------|--------------|----------------|----------------------|---------------|----------------------|------------|
| Composition %poids | 23.7 | 30.9 | 15.1 | 9.2 | 6.4 | 5.5 |

2.4. Familles de gasoil

Les proportions entre les différentes familles chimiques peuvent sensiblement varier en fonction de la provenance du pétrole brut de départ. Ainsi, on distingue trois familles principales de gazole [28] (Tableau 2.3).

- **SRGO (Straight-RunGasOil)** : est obtenu par la distillation atmosphérique du brut pétrolier, avec une teneur moyenne en soufre comprise entre 0,5 et 2,0 % (m/m) et une teneur moyenne en azote de 50 à 500 ppm ;
- **LCO (Light Cycle Oil)** : provenant du craquage catalytique en lit fluidisé (Fluid Catalytic Cracking ou FCC) à une concentration moyenne en soufre comprise entre 0,3 et 2,0 % (m/m) et a une teneur moyenne en azote de 300 à 1000 ppm ;
- **CGO (Cocker GasOil)** : issu du procédé de cokéfaction, dont les caractéristiques sont voisines de celles du SRGO, en quantité de soufre et d'aromatiques mais qui contient beaucoup plus de composés azotés (à des teneurs supérieures à 1000 ppm).

Tableau 2.3 : Propriétés de différents types de gasoil [29].

| | SRGO | LCO | CGO |
|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Origine | La distillation atmosphérique | Fraction distillée du FCC | Procédé de cokéfaction |
| Distillation ASTM °C | 180-360 | 180-360 | 180-360 |
| Composition | 10-40% (m/m) alcanes | 60-90% (m/m) aromatiques | 10-30% (m/m) alcanes |
| | 30-70% (m/m) naphtènes | | 30-60% (m/m) naphtènes |
| | 20-30% (m/m) aromatiques | | 30-40% (m/m) aromatiques |
| Indice de cétane | 40-45 | 18-25 | 28-40 |
| Teneur en soufre (% (m/m)) | 0,5-2,0 | 0,3-2,0 | 1,5-3,0 |
| Teneur en azote (%pds) | 0,005-0,05 | 0,03-0,1 | 0,08-0,2 |

2.5. Propriétés physico-chimiques du gasoil

Toutes les propriétés requises pour le choix et l'utilisation du diesel sont justifiées par les propriétés du cycle diesel, notamment :

- Méthode d'introduction du carburant par injection à haute pression ;
- Combustion due à une inflammation spontanée dans l'environnement hétérogène ;
- La puissance est ajustée en modifiant le débit de diesel en introduisant la même quantité d'air.

2.5.1. Indice de cétane [30,31]

Dans le moteur diesel, il est nécessaire que le gazole présente une structure chimique favorable à l'auto-inflammation. Cette qualité s'exprime par l'indice de cétane (IC). Les spécifications européennes imposent, pour les zones à climat tempéré, un indice de cétane supérieur à 50. Pour les moteurs de faible cylindrée. Les valeurs observées en station-service se situent le plus souvent entre 49 et 55. L'indice de cétane ne joue pas le même rôle essentiel que l'indice d'octane dans l'optimisation moteur-carburant ; en particulier, il n'exerce pas d'incidence

directe sur le rendement du moteur. Cependant, un indice de cétane élevé contribue à améliorer de nombreuses qualités d'utilisation : démarrage aisé, bruit moins intense, notamment au ralenti à froid, émissions moins élevées de fumées noires. Par ailleurs, l'accroissement d'indice de cétane permet de réduire les rejets de polluants à l'échappement.

Il est parfois difficile d'obtenir l'indice de cétane minimal requis par simple mélange des produits disponibles en raffinerie. D'où, on utilise fréquemment, des additifs appelés procétane. Par ailleurs, la relation entre l'indice de cétane et la nature chimique du gasoil, peut être exprimée par l'indice Diesel dont la valeur est fréquemment confondue avec celle de l'indice de cétane. L'indice Diesel est fonction de deux propriétés facilement mesurables : la densité exprimée en degré A.P.I (American Petroleum Institute) et le point d'aniline (température de dissolution d'un mélange équimoléculaire de gasoil et d'aniline pure). On définit ainsi, l'indice Diesel par la relation suivante :

$$\text{Indice Diesel} = \frac{\text{point aniline } (^{\circ}\text{F}) \times \text{densité } (^{\circ}\text{A.P.I})}{100} \quad (2.1)$$

Notons que contrairement à l'indice cétane, l'indice Diesel ne fait pas partie des spécifications ASTM du gasoil.

On calcule l'indice de cétane du gasoil selon la méthode ASTM D976 à partir de l'équation suivant :

$$\text{Indice de cétane} = 454.74 - 1641.416d + 774.74d^2 - 0.554B + 97.803 (\log B)^2 \quad (2.2)$$

Avec :

d = densité à 15°C (-)

B= point 50 % de la distillation ASTM (°C)

2.5.2. Teneur en soufre [31]

Elle doit être comprise entre 0,45 et 0,55 % en poids. Tous les composés sulfurés provoquent une corrosion à froid, par l'acide sulfurique dilué qui se dépose, et agissent sur la formation et la dureté des dépôts, formant de véritable vernis qui gomment les segments. Des contrôles systématiques effectués depuis plusieurs années montrent une corrélation étroite entre la

teneur en soufre et l'usure des chemises des moteurs diesel. On a cherché à remédier à cette corrosion par l'incorporation de dopes d'onctuosité avec les huiles afin d'obtenir un film continu protecteur sur les chemises.

Par ailleurs, les techniques de désulfuration catalytique mises à disposition des raffineurs, ont permis de réduire considérablement la teneur en soufre, moyennant un supplément de coût acceptable jusqu'à 0,2 %. En Algérie, la teneur en soufre dans le produit gasoil issu de la distillation atmosphérique est environ de 0,06 %.

2.5.3. Densité [30,32]

La densité du gasoil mesurée à 15°C doit être comprise entre 0,810 et 0,890 dans les pays tempérés. La fixation d'une valeur minimale de la densité se justifie par le souci d'obtenir une puissance maximale suffisante pour le moteur, au moyen d'une pompe d'injection dont le réglage de débit s'effectue en volume ; plus la densité du gasoil est élevée, plus la quantité d'énergie délivrée à pleine charge est importante. Par ailleurs, on impose une limite maximale à la densité, afin de réduire les émissions de certains polluants et d'éviter la formation de fumées noires.

2.5.4. Distillation [30,32]

Le gasoil a un point initial de distillation qui se situe aux environs de 190°C et ainsi, contient donc, approximativement, une gamme d'hydrocarbures compris entre C14 et C20. Le point 50 % de la courbe de distillation ASTM est représentatif des propriétés moyennes : volatilité, viscosité, point de congélation, le point 85 % inférieur à 350 °C limite la teneur en produits lourds et d'obtient aisément à l'unité de distillation. Le dépassement de ces limites correspond à une mauvaise séparation dans la colonne de distillation et, en général, la couleur des produits dans ce cas, est mauvaise. Le point d'éclair du gasoil doit être compris entre 55°C et 120°C.

2.5.5. Viscosité [30, 31,33]

La viscosité doit être, elle aussi, comprise entre des limites précises. En effet, un carburant trop visqueux s'écoule faiblement en augmentant les pertes de charge dans la pompe et les injecteurs, ce qui tendrait à réduire la pression d'injection, à détériorer la finesse de pulvérisation et finalement, à affecter le processus de combustion. À l'inverse, une viscosité très basse et insuffisante, pourrait provoquer le grippage de la pompe d'injection. Dans les pays d'Europe à

climat tempéré, la viscosité cinématique maximale du gasoil doit être de 9 cSt à 20 °C, cela veut dire que ce gazole est 9,5 fois plus visqueux que l'eau.

2.5.6. Point d'éclair (Pensky, Flash Point) [34]

Le point d'éclair est la température à laquelle il faut porter un produit pétrolier liquide pour qu'il émette dans des conditions normalisées, des vapeurs en quantité suffisante pour que celle-ci puisse s'enflammer en présence d'une flamme. A une température supérieure à celle de son point d'éclair, les vapeurs émises par un produit pétrolier, forment avec l'air, un mélange inflammable. Cette température ne doit toutefois pas être confondue avec la température d'auto-inflammabilité du produit qui est la température à laquelle le produit s'enflamme spontanément dans l'air.

2.6. Propriétés à froid du gasoil [32]

Les caractéristiques du gasoil à basse température, conditionnent d'avantage sa mise en œuvre que son comportement en matière de combustion. Cependant, nous les examinerons ici en raison de leur très forte implication dans l'utilisation satisfaisante du carburant. Les paraffines à l'état pure se cristallisent selon la longueur de leur chaîne carbonée en une des structures suivantes : monoclinique (> 26 Carbones), triclinique (< 26 Carbones) et orthorhombique pour les alcanes primaires. Cependant, dans un mélange comme le gasoil, les paraffines se cristallisent dans une structure orthorhombique ou hexagonale.

2.6.1. Point d'écoulement [33]

Le point d'écoulement (Pour Point) noté (PE), est la température minimale à partir de laquelle le fluide s'écoule toujours.

Lorsque le gasoil circule dans le circuit d'alimentation du moteur il doit traverser un filtre à mailles très fines (quelques micromètres) avant de pénétrer dans la pompe d'injection, car celle-ci constitue un organe d'une très grande précision mécanique dont le bon fonctionnement risquerait d'être perturbé par des impuretés et des particules en suspension dans le liquide. Or, contrairement aux autres carburants pétroliers comme les essences et le kérosène, le gasoil peut perdre sa limpidité et sa fluidité à basse température (dès 0°C). Ce phénomène rhéologique est dû à l'apparition de cristaux dans le carburant, dont la présence peut provoquer divers incidents tels que le colmatage du filtre, le désamorçage de la pompe d'injection. Ces considérations justifient la

nécessité d'adopter des spécifications très strictes en matière de comportement à froid du gasoil même si certains dispositifs technologiques (réchauffage des filtres sur les véhicules récents) contribuent à atténuer les risques d'incidents en service. Le point d'écoulement du gas-oil est fixé à -12°C en hiver et -7°C en été.

2.6.2. Point de trouble [35]

Le point de trouble (PT), est exprimé par la température d'apparition des premiers cristaux lorsque le carburant est refroidi sous une vitesse bien définie. Aux basses températures, le gasoil peut perdre sa limpidité après formation de cristaux de paraffines.

2.6.3. Température limite de filtrabilité [34]

La température limite de filtrabilité (TLF), représente la température seuil de colmatage des filtres à carburant par des cristaux formés lors du refroidissement du carburant. Elle est étroitement liée aux températures de point d'écoulement et de point de trouble.

2.7. Utilisation de gasoil [36]

Le gazole est très largement utilisé comme carburant automobile, dans les moteurs diesel. Initialement largement utilisé pour les transports de marchandises et les transports en commun, il s'est depuis largement répandu dans le secteur de l'automobile individuelle. En France, la fiscalité allégée du gazole par rapport à l'essence à accélérer le développement de ce marché. Les moteurs diesel sont généralement plus économes, et cet aspect est encore renforcé par le prix inférieur du gazole. Ce n'est pas forcément le cas à l'étranger, où le gazole est au moins au prix de l'essence, voire plus cher.

2.8. Amélioration des propriétés à froid du gasoil

En fait, dans la plupart des raffineries, du kérosène produit en série est ajoutée à la fraction diesel pour augmenter sa résistance au froid. C'est un gaspillage d'énergie et d'argent. En effet, la raffinerie d'Alger traite 8000 tonnes de pétrole brut par jour, extrait 2000 tonnes de diesel et, afin d'optimiser et d'augmenter le point d'écoulement du diesel, 200 tonnes de kérosène sont mélangées chaque jour au diesel. Ainsi, comme pour toutes les opérations de raffinage, les

raffineries obtiennent du diesel ayant de bonnes propriétés à froid grâce à des compromis technico-économiques. Il existe essentiellement deux types de moyens d'action.

2.8.1. Sélection et constitution de la coupe gasoil [33]

La valeur du point final de distillation doit être la plus faible possible, afin de minimiser le taux de fractions lourdes dans le carburant. En effet, celles-ci contiennent fréquemment des n-paraffines responsables de la formation de cristaux à basse température.

Un point initial bas favorise le maintien en solution des paraffines lourdes par les fractions légères ce qui améliore les caractéristiques à froid. Dans les pays où les hivers sont très rigoureux. L'abaissement du point initial impose parfois un recouvrement prononcé des coupes gazole et kérosène. Ce gasoil de type « grand froid » doit d'ailleurs recevoir des additifs qui accroissent sa viscosité et évitent ainsi les usures de systèmes d'injection, engendrés par la présence de coupes légères.

La structure chimique du pétrole brut traité a aussi une influence sur les propriétés à froid des gazoles, le pétrole brut aromatique ou naphténiq ue présente une bonne tenue à froid, ce qui n'est pas le cas du brut paraffiné. De même, les produits de craquage, riches en aromatiques, comme la coupe Light Cycle Oil (LCO), peuvent améliorer les caractéristiques à froid du gazole mais leur indice de cétane faible conduit à les utiliser de façon très modérée.

2.8.2. Utilisation d'un catalyseur à base d'un mélange de zéolithes [37]

Le procédé d'améliorer du point d'écoulement de charges hydrocarbures issues du procédé de distillation atmosphérique, en particulier pour convertir, avec un bon rendement, les charges possédant des points d'écoulement élevés en une coupe présentant un point d'écoulement bas et un haut indice de viscosité.

Pour les gasoils, un passage dans un catalyseur d'hydro-déparaffinage catalytique est nécessaire ; ce catalyseur doit comporter, au moins :

- Une zéolithe (tamis moléculaire) choisie dans le groupe formé par les zéolithes de type structural TON (Theta-1, ZSM-22, ISI-1, NU-10 et KZ-2) ;

- Une zéolithe ZBM-30 synthétisée de préférence en présence d'un structurant particulier tel que le triéthylènetétramine ;
- Une matrice minérale poreuse ;
- Un élément hydro-déshydrogénant, de préférence choisi parmi les éléments du groupe VIB et du groupe VIII de la classification périodique.

2.8.3. Incorporation d'additifs

De manière générale, les additifs utilisés pour augmenter le rendement énergétique des moteurs diesel agissent sur différentes propriétés et fonctions (indice de cétane, point d'écoulement, antioxydant et anticorrosion, lubrification, anti-mousse).

La classification de ces additifs est basée sur des facteurs tels que : les performances du moteur, la manipulation du carburant, le stockage et la stabilité, ainsi que l'impact environnemental.

Les additifs permettant d'abaisser le point d'écoulement, agissent sur le processus de cristallisation des paraffines en modifiant leur structure cristalline selon plusieurs mécanismes ; les plus connus sont :

- Nucléation des cristaux.
- Inhibition de la formation des cristaux.(figure 2.5)

Ils sont conçus de telle façon qu'une partie de leur molécule est similaire aux cristaux paraffiniques et crée des sites de nucléation, multipliant les cristaux plus petits en co-cristallisant avec les paraffines. L'autre partie de la molécule, différente des cristaux de paraffines, empêche le développement de gros cristaux et la formation d'un réseau tridimensionnel responsable de la gélification du gasoil. Ceci permet de diminuer la viscosité et le point d'écoulement. Pour évaluer les caractéristiques rhéologiques des gasoils [38].

Les additifs utilisés pour améliorer les propriétés aux basses températures des carburants et huiles sont, généralement, des polymères (homopolymères, copolymères, ...). Les plus utilisés sont formés à base des copolymères α -oléfines et acétate de vinyle, copolymères d'alkyl acrylates, et les copolymères d'anhydrides maléïques et ce, à cause de leur composition semi cristalline. En effet, la partie cristalline interagit avec la fraction cristallisable dans le carburant et la partie

amorphe tend à modifier et retarder la formation de nouveaux cristaux. Par exemple, dans l'additif contenant le copolymère éthylène d'acétate de vinyle, la partie éthylène co-cristallise avec les chaînes de paraffines tandis que les groupes d'acétate de vinyle agissent sur la structure cristalline en formant de petits cristaux [39].

En pratique, l'efficacité de ces additifs dépend beaucoup de l'origine du brut et de la composition des gasoils. Ainsi, les pétroles bruts de la mer du nord sont moins enclins que d'autres à une amélioration de leurs caractéristiques à froid par des additifs.

Le coût de traitement du gasoil par ces additifs est relativement faible, de l'ordre de quelques centimes par litre de carburant. Soulignons qu'en pratique, un gasoil renfermant un additif fluidifiant se reconnaît par l'écart important (plus de 10°C) existant entre le point de trouble et la TLF. Les réductions de la TLF et de la température de point d'écoulement peuvent atteindre aisément 6 à 12 degrés pour des doses comprises entre 200 et 600 ppm massique [34]. En effet, cette technique est peu coûteuse en énergie, particulièrement intéressante et efficace, et peut facilement être complémentaire des opérations de raffinage.

Dans ce qui suit, nous allons présenter un type particulier d'additif qui va être testé sur le gasoil moteur de la raffinerie d'Alger.

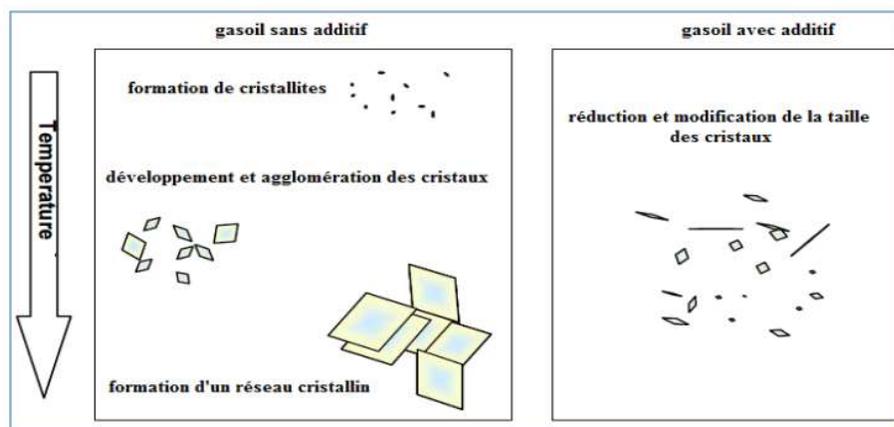


Figure 2.5: Schéma simplifié de l'action des additifs sur le gasoil [38].

2.9. Additifs de carburants NALCO® [40,41]

NALCO® est une société internationale dont les produits et additifs sont utilisés par les raffineurs dans le monde entier pour produire continuellement, des carburants répondant aux spécifications. Selon cette société, ses additifs sont conçus pour réduire les frais de retraitement au minimum. La gamme complète des additifs NALCO® pour carburants est la suivante :

- Abaisseurs de point d'écoulement pour pétrole brut, gasoil, mazout domestique et le mazout lourd,
- Des inhibiteurs de corrosion.
- Auxiliaires d'onctuosité.
- Additifs basses températures pour diesel.
- Auxiliaires d'onctuosité pour le diesel à très faible teneur en soufre.
- Inhibiteurs de corrosion de carburant et de corrosion sur cuivre pour diesel.
- Biocides pour diesel
- Agent d'adhésivité pour l'asphalte.

Dans cette étude, nous avons utilisé deux additifs NALCO, à savoir **EC5372A** et **EC5905A**, pour tester leurs effets sur la rhéologie à froid et les propriétés physico-chimiques des moteurs diesel produits en Algérie. La composition des deux additifs est inconnue.

Les deux composés utilisés sont classés comme produits dangereux, nocifs pour la santé, irritants et dangereux pour l'environnement.

Ces produits NALCO sont stockés dans des contenants hermétiques à l'abri de la chaleur et des oxydants chimiques. Les réservoirs de stockage doivent être en acier au carbone ou en acier inoxydable. Les matériaux tels que le caoutchouc naturel et le polypropylène sont incompatibles avec ces additifs. Par conséquent, la compatibilité avec les pots en plastique peut varier et la compatibilité doit être testée avant d'utiliser des récipients ou des bouteilles pour stocker les deux produits.

2.10. Travaux antérieurs

Dans une recherche récente basée sur la synthèse de terpolymères de méthacrylate avec des comonomères à chaîne courte comme les dépresseurs de point d'écoulement (PPD) pour le carburant diesel et les mélanges avec le biodiesel. Les PPD sont conçus pour améliorer les propriétés à basse température du diesel et du biodiesel. Les résultats montrent que les additifs affectent significativement la température de cristallisation ainsi que la taille et le nombre de cristaux de cire à basses températures. Les essais normalisés ASTM D5950 pour le point d'écoulement (PE) démontrent une grande amélioration des formulations avec additifs, améliorant le PP du diesel de -18°C à -45°C et dans les mélanges B10 diesel/biodiesel de -18°C à -54°C [42].

D'autre recherche explore l'effet de l'ajout de kérosène et de Keroflux[®]6103 sur le point d'écoulement du diesel dans la raffinerie Skikda RA1K en Algérie. L'étude révèle que l'ajout de kérosène et de Keroflux[®]6103 au diesel peut améliorer son point d'écoulement, ce qui le rend plus adapté à une utilisation par temps froid [38].

Selon les recherches menées par Titaeva et al [43], ont évalué l'effet des N-paraffines sur le point de trouble, le point d'écoulement et le point d'obturation des filtres froids des carburants diesel. Les résultats suggèrent que les N-paraffines peuvent améliorer l'efficacité des additifs dépresseurs, conduisant à de meilleures propriétés à basse température des carburants diesel. Cette recherche pourrait avoir d'importantes répercussions sur la production de carburants diesel de haute qualité ayant des propriétés d'écoulement à froid améliorées.

Une étude expérimentale a été réalisée pour évaluer l'impact de quatre additifs différents sur les caractéristiques de l'écoulement à froid du carburant diesel. Il a été constaté que l'éthanol était le plus efficace pour réduire le point d'écoulement du carburant, tandis que ces additifs n'ont pas eu un impact significatif sur le point de trouble. Cette recherche suggère que l'éthanol pourrait être l'additif le plus efficace pour améliorer les caractéristiques de l'écoulement à froid du carburant diesel, ce qui pourrait avoir une importance significative dans le développement et l'amélioration des carburants destinés à être utilisés à des températures basses [44].

Par ailleurs, il a été étudié l'effet des additifs polymères industriels et des agents de surface sur la réduction du point d'écoulement, en utilisant des échantillons de trois produits pétroliers : le diesel léger, le diesel lourd et le fioul. Le type et la concentration optimisés des additifs ont été

étudiés. Les résultats ont révélé que le copolymère éthylène-acétate de vinyle à 28 %, à une concentration de 500 ppm, a réduit la température du point d'écoulement de 12°C pour le diesel, tandis que le copolymère éthylène-acétate de vinyle à 19 %, à une concentration de 300 ppm, a réduit la température du point d'écoulement de 9°C pour le fioul [45].

Kirgina et al, (2021) [46], ont mis en évidence l'importance de l'utilisation des additifs pour améliorer les propriétés à basse température du carburant diesel a été examinée. Malgré la variété des types d'additifs et de leurs effets, le choix de l'additif approprié reste un défi en raison de la composition spécifique du diesel et des conditions de fonctionnement. De plus, les lois d'interaction entre les groupes fonctionnels des additifs et les hydrocarbures présents dans le diesel n'ont pas encore été étudiées. Cette recherche se concentre sur l'impact de la composition fractionnelle, des groupes fonctionnels et de la structure chimique du diesel brut sur l'efficacité des additifs améliorant le fluage à froid, tout en examinant l'effet de la concentration des additifs sur leur efficacité. Les résultats soulignent la nécessité de prendre en compte la composition spécifique du diesel lors du choix et de la détermination de la concentration optimale d'un additif pour améliorer le fluage à froid, afin d'assurer une efficacité maximale.

Les expériences et analyses présentées dans cette partie, ont toutes été effectuées au niveau du laboratoire d'analyse de la raffinerie d'Alger.

Avant chaque test ou analyse, on doit procéder à un échantillonnage en respectant certaines conditions. Ces dernières se résument aux opérations suivantes :

- Rincer le flacon d'échantillonnage avec l'échantillon.
- Adapter la température de l'échantillon en le refroidissant ou le chauffant si nécessaire.

3.1. Produits utilisés

3.1.1. Gasoil utilisé

Dans ce travail nous avons utilisé des échantillons de gasoil qui a été produit et fourni par la raffinerie d'Alger ; il est issu de la distillation atmosphérique de l'unité RA1G de cette raffinerie.

3.1.2. Kérosène

Le tableau 3.1 représente les caractéristiques physico-chimiques de Kérosène :

Tableau 3.1 : Propriétés physico-chimiques de kérosène.

| Propriétés physico-chimiques | Kérosène |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Etat physique | Liquide |
| Apparence | Jaune clair au jaune pâle |
| Odeur | Proche de l'acétone |
| Densité relative | 0.799 g/cm ³ |
| Point de congélation. | -38.5 |
| Point éclair | 58.6°C |
| Viscosité cinématique | 6.46032 m ² /s (-20°C) |
| Distillation ASTM | 229 °C |

3.1.3. Additifs utilisés et leurs propriétés physico-chimiques [40,41]

Les deux additifs NALCO® utilisés, à savoir respectivement EC5372A et EC5905A sont sur figure (3.1) et figure (3.2) :



Figure 3.1 : Produit utilisé EC5372A.



Figure 3.2 : Produit utilisé EC5905A.

Le tableau (3.2) répertorie les propriétés des deux additifs NALCO® :

Tableau 3.2 : Propriétés physico-chimiques des produits : EC5905A et EC5372A.

| Propriétés physico-chimiques | EC5905A | EC5372A |
|--|------------------------------|---------------------------------|
| Etat physique | Liquide | Liquide visqueux |
| Apparence | Blanc | Jaune laiteux |
| Odeur | Solvant | Aromatique |
| Densité relative | 0.91 g/cm ³ | 0.89 g /cm ³ (50 °C) |
| Pression de vapeur | 0.045 kPa (20°C) | - |
| Point d'ébullition initiale | 185 °C | 150 °C |
| Point éclair | 62 °C | 62 °C |
| Solubilité dans l'eau | Négligeable | Insoluble |
| Température d'auto-inflammation | >200 °C | >250 °C |
| Viscosité cinématique | 78 m ² /s (40 °C) | 118 m ² /s (40 °C) |

Les deux produits NALCO® sont chimiquement stables dans des conditions normales de température et de pression. Cependant, ils doivent être stockés loin de la chaleur et des sources d'inflammation, y compris les décharges statiques.

Ils présentent aussi une incompatibilité avec les oxydant chimiques comme le chlore, les chromates, les peroxydes, l'acide nitrique, le perchlorate et le permanganate d'oxygène, qui peuvent générer de la chaleur, un feu, des explosions et des vapeurs toxiques.

3.2. Méthodes expérimentales

Le traitement du gasoil avec des additifs a pour but d'obtenir un produit présentant des propriétés d'écoulement suffisantes tout en respectant les spécifications (normes) nationales ou internationales recommandées par l'utilisateur. Cela ne serait pas possible sans une coordination de travail entre l'unité Topping et le service laboratoire, puisque le rôle de l'unité est de surveiller le procédé, tandis que le laboratoire joue le rôle de contrôleur en fonction des analyses effectuées à son niveau.

Par conséquent, pour répondre aux questions liées au comportement du carburant diesel à basse température, le point d'écoulement, la densité, les points initial et final de distillation ASTM, le point d'éclair, la viscosité, la teneur en soufre et l'indice de cétane ont été mesurés.

3.2.1. Détermination du point d'écoulement

3.2.1.1. Principe

Cette méthode détermine le point d'écoulement noté PE d'un produit pétrolier, qui correspond à la température la plus basse à laquelle le produit s'écoulera encore une fois refroidi. Il s'agit de l'une des nombreuses méthodes de test ASTM (D97). Elle peut être réalisée par un appareil automatique ou manuel. Son principe est de refroidir progressivement l'échantillon de gasoil et de réaliser un test d'écoulement à une température définie [47].

3.2.1.2. Matériels utilisés

On a besoin de ces divers éléments ici :

- Un tube à essai cylindrique normalisé en verre clair avec des dimensions bien déterminés et un trait de jauge pour nous indiquer la quantité de l'échantillon à verser.
- Un thermomètre normalisé ASTM5C.
- Un joint d'étanchéité pour fixer confortablement le tube à essai à l'intérieur de la jaquette. Le joint peut être fait de caoutchouc, de cuir ou d'un autre matériau suffisamment élastique pour s'accrocher au récipient d'essai et assez dur pour tenir sa forme et d'empêcher le tube de test de toucher la gaine.
- Un disque en liège ou en feutre de 6 mm d'épaisseur pour s'adapter au fond de la jaquette.

- Un bain maintenu à des températures prescrites avec un support ferme pour maintenir la jaquette en verticale. Les températures du bain requises peuvent être obtenues par réfrigération.

Les différents instruments utilisés dans cette analyse sont représentés par la figure suivante :

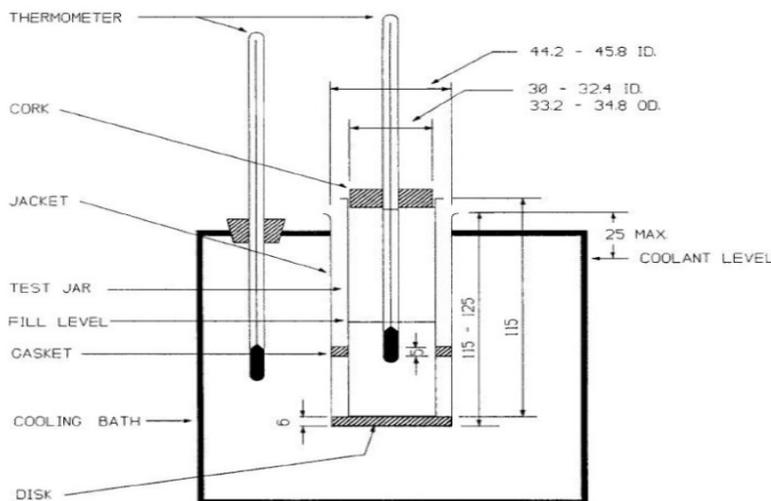


Figure 3.3 : Appareil de mesure du point d'écoulement [47].

3.2.1.3. Mode opératoire

Le mode opératoire suivi consiste à :

- Verser l'échantillon dans le tube de test jusqu'au repère de niveau. Si nécessaire, chauffer l'échantillon dans un bain jusqu'à ce qu'il soit suffisamment liquide pour le verser dans le tube d'essai.
- Placer le bouchon de liège portant le thermomètre au tube à essai tout en s'assurant de son étanchéité, que le thermomètre et le tube soient coaxiaux et que l'ampoule du thermomètre soit immergée de sorte que le début du capillaire soit 3 mm sous la surface de l'échantillon.
- Vérifier que le disque, le joint d'étanchéité et l'intérieur de la jaquette sont propres et secs. Placer le disque dans le bas de la jaquette et le joint d'étanchéité autour du pot d'essai, à 25 mm du bas. Insérer le bocal de test dans la jaquette.
- Lorsque l'échantillon est refroidi, des cristaux de paraffine se forment et il faut faire très attention à ne pas perturber la masse de l'échantillon, ni à déplacer le thermomètre autour

de l'échantillon ; toute perturbation du réseau spongieux de cristaux de cire conduirait à des résultats peu fiables et erronés.

- Les points d'écoulements sont exprimés en nombres entiers positifs ou négatifs de 3°C. Lorsque la température de l'échantillon est de 9°C au-dessus du point d'écoulement attendu, on retire le flacon de test de la chemise après chaque lecture du thermomètre de test qui est un multiple de 3°C en dessous de la température de départ. Pour éliminer l'humidité condensée qui limite la visibilité, il faut essuyer la surface avec un chiffon propre imbibé d'alcool (éthanol ou méthanol).
- On incline légèrement le pot juste assez pour vérifier le mouvement de l'échantillon dans le pot de test. Si le mouvement de l'éprouvette dans le récipient est noté, remplacer le bocal d'essai immédiatement dans la veste et répéter le test pour le prochain flux de température (3°C de moins). D'une manière générale, l'ensemble de l'opération de retrait, d'essuyage et de remplacement ne devrait pas prendre plus de 30 secondes.
- On continue l'analyse en prenant soin de respecter les paliers de refroidissement indiqué dans le tableau ci-dessous, jusqu'à ce que l'échantillon ne présente aucun mouvement lorsque le pot d'essai est maintenu en position horizontale pendant 3s. On note la température observée dans le thermomètre et on ajoute 3 °C.

Tableau 3.3 : Gammes de température du bain et de l'échantillon.

| Température de l'échantillon (°C) | Température du bain (°C) |
|-----------------------------------|--------------------------|
| ≥ 27 °C | 24 ± 1.5 °C |
| De 27 à 9 °C | 0 ± 1.5 °C |
| De 9 à -6 °C | -18 ± 1.5 °C |
| De -6 à -24 °C | -33 ± 1.5 °C |
| De -24 à -42 °C | -51 ± 1.5 °C |

3.2.1. Détermination de la densité

3.2.1.1. Principe [48]

La technique de mesure varie suivant la précision du résultat recherché. Les mesures de routine s'effectuent le plus souvent avec un densimètre standard en verre lesté au plomb. Le densimètre est plongé dans le liquide préalablement placé dans une éprouvette. L'enfoncement dans le fluide varie en fonction de sa densité dont la valeur est lue directement grâce à une échelle graduée.

3.2.1.2. Matériels utilisés

On a utilisé ces différents éléments :

- Densimètre ou aéromètre
- Eprouvette graduée
- Thermomètre.



Figure 3.4 : Densimètre automatique ISL VIDA.

3.2.1.3. Mode opératoire

On a procédé par les étapes suivantes :

- Remplir l'éprouvette jusqu'à ce que l'aéromètre flotte librement.
- Placer l'appareil verticalement dans l'échantillon, avec le thermomètre à côté de l'aéromètre dans l'échantillon jusqu'à ce que la température se stabilise.

- Après avoir vérifié que l'aéromètre n'est pas en contact avec la paroi de l'éprouvette, relever la densité de fonctionnement à la température d'essai, pour qu'à 15°C elle soit corrigée à l'aide de la formule suivante :

$$D^T = D_{15} + a(T-15) \quad (3.1)$$

Avec :

- D^T : la densité opératoire.
- a : facteur de correction en (0.00066).
- T : température de l'essai.

3.2.2. Distillation ASTM

3.2.2.1. Principe

Cette méthode est applicable à tous les produits pétroliers à l'exception du pétrole liquéfiés et du bitume dilué. Elle consiste à distiller 100 ml de produit dans certaines conditions standardisées et enregistrer la température correspondant au volume de distillat évaporé ou collecté [49].

On s'intéresse généralement à la détermination des cinq températures suivantes :

- Température du point initial, notée **PI**, correspond à l'apparition de la première goutte de distillat.
- Température du point 50 %
- Température du point 65 %
- Température du point 90 %
- Température du point final, notée **PF**, est la température la plus élevée enregistrée lors de l'essai.

3.2.2.2. Matériels utilisés

L'appareillage correspondant à l'essai manuel de la distillation ASTM et conforme à la norme est représenté par les figures (3.5) et (3.6) :

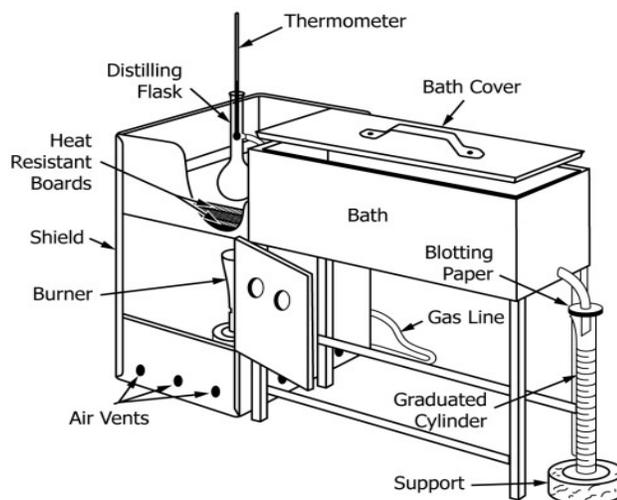


Figure 3.5 : Schéma descriptive du montage de la distillation ASTM [49].



Figure 3.6 : Appareil de la distillation ASTM.

3.2.2.3. Mode opératoire [48,49]

L'opération implique à :

- Placer 100 ml de la prise d'essai dans le ballon de distillation.
- Placer le ballon muni de son thermomètre traversant le bouchon, sur la plaque en verre.
- Placer l'éprouvette graduée à la sortie du tube du condenseur sans la sécher.

- Prendre toutes les précautions pour maintenir la température du bain autour de l'éprouvette graduée dans les limites indiquées dans le tableau standard.
- Ajuster le chauffage pour que le temps entre le début du chauffage et l'obtention du point initial ne dépasse pas les limites spécifiées dans la norme.
- Après avoir observé le point initial, régler immédiatement le chauffage afin que le volume de condensât recueilli dans l'éprouvette augmente uniformément et se situe dans les limites spécifiées par la norme.

3.2.3. Détermination de la température limite de filtrabilité

3.2.3.1. Principe [50]

Un volume déterminé d'échantillon est aspiré à travers un filtre métallique normalisé à des températures successivement décroissantes jusqu'à ce que la quantité de paraffine soit suffisante pour ralentir l'écoulement au point que le temps de passage du liquide devient supérieur à 60 secondes.

La température de la prise d'essai est notée à chaque abaissement de 1°C immédiatement avant de commencer la filtration.

3.2.3.2. Matériels utilisés

Appareil automatique, il comprend :

- Un bain réfrigérant.
- Une pompe à vide.
- Un compartiment de commande électronique.
- Une pompe munie d'une crépine.

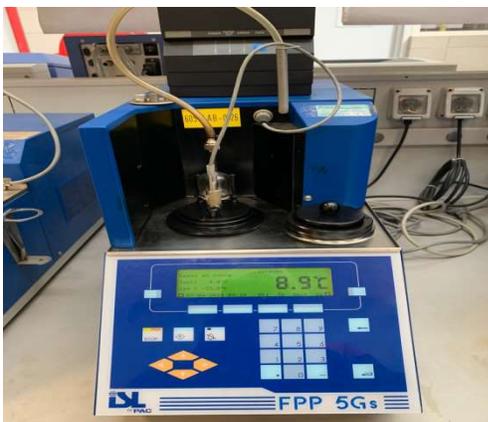


Figure 3.7 : Appareil de la température limite de filtrabilité.

3.2.3.3. Mode opératoire [48]

Représenté par les points ci-dessous :

- Allumer le bain réfrigérant, fixer la température du bain à -34°C .
- Mettre le produit dans le tube jusqu'au trait de jauge.
- Placer le tube à l'intérieur du compartiment de commande.
- Faire descendre le dispositif de façon que la crépine repose sur le fond du tube.
- Mettre en marche la pompe à vide à une pression de l'ordre 200 mbar.
- Donner une température de consigne à laquelle l'essai du CFPP commence.
- Appuyer sur START.

3.2.4. Détermination du point d'éclair

3.2.4.1. Principe [51]

Dans une fraction pétrolière donnée, ce sont les composants les plus volatils ou les plus légers qui s'évaporent le plus facilement et constituent l'atmosphère riche en vapeurs d'hydrocarbures au-dessus de la phase liquide. Par conséquent, l'enrichissement en substances légères a pour effet d'abaisser la température du point d'éclair. Les résultats obtenus par les méthodes d'essais standardisées de mesure du point d'éclair sont également très sensibles à la présence d'impuretés volatiles traces ou de produits trop légers.

Le point d'éclair est une caractéristique très importante car elle concerne la sécurité des opérations de transport, de transfert et de stockage.

Plusieurs appareils tous normalisés sont utilisés pour mesurer un point d'éclair. Il est à noter que pour un même produit ils donnent des résultats différents et il faut accompagner la mesure de vapeur du point éclair des propriétés standards correspondantes.

3.2.4.2. Matériels utilisés

L'appareil correspondant à cette analyse selon la norme ASTM D93, est celui de Pensky-Martens représenté dans la figure (3.8) :

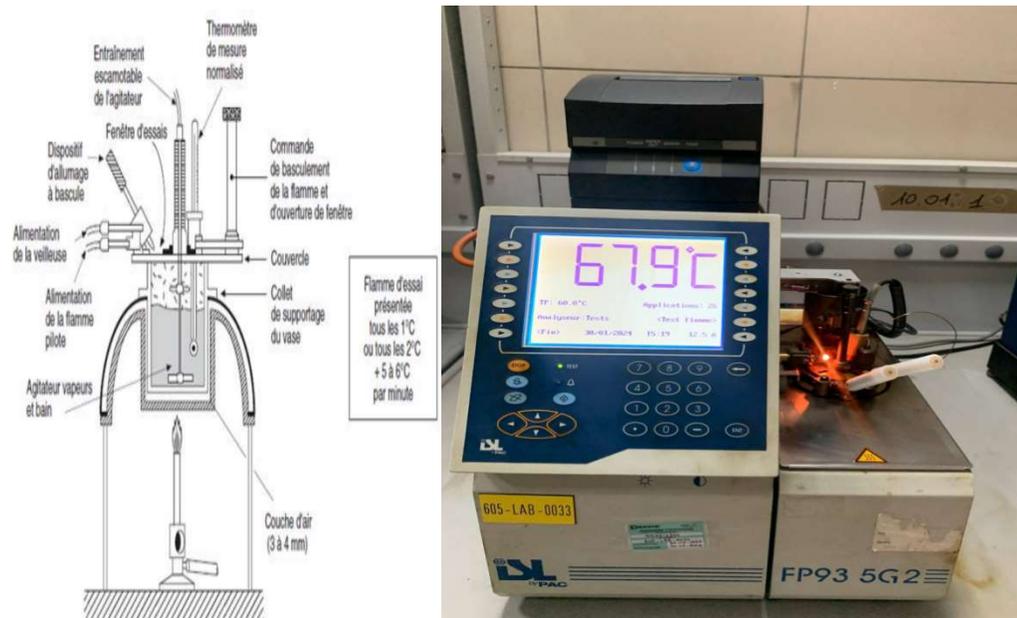


Figure 3.8 : Appareil Pensky -Martens ASTM D93. [48]

3.2.4.3. Mode opératoire [48]

Comprend les différentes étapes suivantes :

- Remplir la coupe avec la prise d'essai jusqu'au niveau indiqué par la marque de remplissage.
- Placer la coupe dans l'enceinte du bloc chauffant.
- Placer le couvercle sur la coupe et le tourner dans le sens horaire.
- Choisir une température présumée du point d'éclair.
- Appuyer sur START pour démarrer l'analyse.

3.2.5. Détermination de la viscosité

3.2.5.1. Principe [52]

La norme ASTM D445 décrit une méthode de mesure de la viscosité cinématique des produits pétroliers liquides. Elle consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un liquide dans un capillaire calibré à température fixée. La viscosité cinématique est calculée à partir du temps d'écoulement en utilisant la formule suivante :

$$v = k \cdot t \quad (3.2)$$

Avec :

v : viscosité cinématiques s'exprime en (m^2/s) ou (cSt)

k : constante du viscosimètre qui dépend de la taille du capillaire utilisé (0.007466)

t : temps d'écoulement en secondes.

3.2.5.2. Matériels utilisés

On utilise le viscosimètre Ubbelohde à niveau suspendu pour les liquides transparents et le viscosimètre Cannon Fenske à écoulement inversé pour les liquides opaques (figure 3.9). En plus du viscosimètre de type capillaire, le matériel utilisé est : un bain thermostatique et un chronomètre.

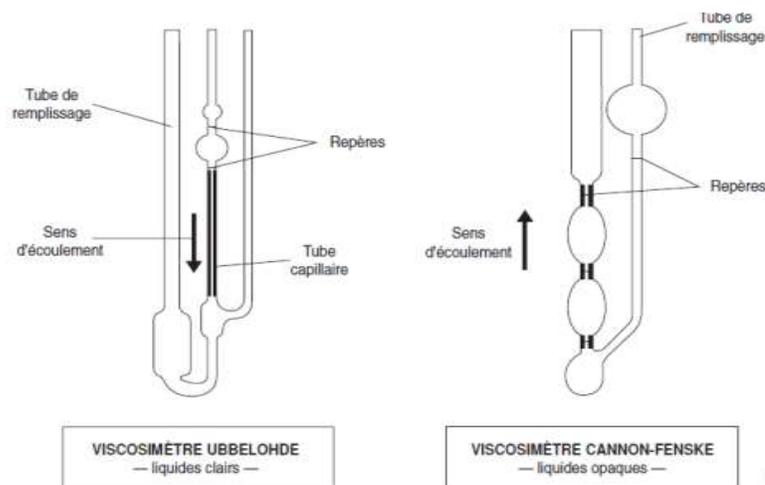


Figure 3.9: Schéma des différents viscosimètres utilisés [51].



Figure 3.10 : photo de capillaire utilisé.

3.2.5.3. Mode opératoire [48,53]

Le protocole expérimental utilisé pour déterminer la viscosité est :

- Remplir le viscosimètre avec le produit à analyser d'une manière appropriée à sa conception.
- Immerger le viscosimètre dans le bain préalablement chauffé à 40 °C et s'assurer qu'il est bien vertical.
- Mesurer en secondes, le temps que met le ménisque pour passer de la première marque à la seconde et de la seconde à la troisième.

3.2.6. Détermination de la teneur en soufre

3.2.6.1. Principe [54]

La méthode de fluorescence X permet la détermination du soufre total dans les produits pétroliers liquides. Elle est basée sur le fait qu'un échantillon soumis à une radiation réémet un rayonnement X en relation avec sa teneur en soufre.

Lorsque les rayons X sont envoyés sur un échantillon quelconque contenant des atomes dont la masse atomique est supérieur à 20, ils sont absorbés par les 2 électrons de la couche K proche du rayon. Les électrons quittent leur orbite et sont éjectés. Des électrons des couches supérieures L ou M viennent les remplacer et à ce moment émettent une radiation X dite de fluorescence. La longueur d'onde de la radiation est une caractéristique de l'atome qui l'a émis.

3.2.6.2. Matériels utilisés

On a utilisé le spectromètre rayon X de marque PANalytical ZETIUM pour mesurer la teneur en soufre de notre gasoil, présenté dans la figure (3.11) :



Figure 3.11 : Spectromètre rayon X PANalytical ZETIUM.

3.2.6.3. Mode opératoire [54]

L'approche consiste en les étapes suivantes :

- Verser l'échantillon dans un coup samplecups XFR dont le fond est un film polymère.
- Mettre l'échantillon au port d'analyse sur le spectromètre RX, l'opère sur logiciel et lancer l'analyse.
- La valeur de teneur en pourcentage en soufre s'affiche en ppm.

3.2.7. Détermination du l'indice de cétane

3.2.7.1. Principe

L'indice de cétane d'un carburant pour moteur diesel est déterminé en comparant son inflammabilité à l'inflammabilité d'un mélange carburé d'indice connu. Cette inflammabilité est obtenue en faisant varier le taux de compression volumétrique de l'échantillon et de chaque mélange de référence afin d'obtenir un délai défini entre la cible d'injection et la cible d'allumage.

L'indice de cétane calculé constitue un moyen pratique d'estimer l'indice de cétane lorsqu'un moteur d'essai ne peut pas déterminer cette propriété. Il est donné par l'équation suivante [55] :

$$\text{Indice de cétane} = 454.74 - 1641.416d + 774.74 d^2 - 0.554 B + 97.803 (\log B)^2 \quad (3.3)$$

Avec :

d : densité à 15°C.

B : point 50 % de la distillation ASTM (°C).

4.1. Propriétés du gasoil produit par la raffinerie d'Alger

Avant de présenter les résultats de cette étude, nous notons dans le tableau ci-dessous (4.1) les limites supérieures et inférieures ainsi que les méthodes d'analyses réalisées (méthodes ASTM) et les valeurs des normes algériennes (notées NA) requises pour le gasoil. Dans la dernière colonne, les résultats analytiques concernant le gasoil non traité sont représentés.

Tableau 4.1 : Propriétés du gasoil utilisé et spécifications.

| Caractéristiques | | Limites | Méthodes d'essai | Norme Algérienne | Résultats |
|-------------------------------------|----------------------|-------------|------------------|------------------|-----------|
| Densité à 15°C (g/cm ³) | | 0.810-0.860 | ASTM D1298 | NA 417 | 0.840 |
| Point d'écoulement (°C) | 1/11 au31/03 | -12 max | ASTM D97 | NA 2660 | -3 |
| | 1/04 au31/10 | -7 max | | | |
| Température filtrabilité(°C) | 1/11 au31/03 | -5 max | ASTM D6371 | - | +4 |
| | 1/04 au31/10 | + 5max | | | |
| Viscosité à 40°C (cSt) | | 2-9 | ASTM D445 | - | 4.404 |
| Point d'éclair (°C) | | 55 min | ASTM D93 | NA 2658 | 90.2 |
| Teneur en cendres (% masse) | | TND | ASTM D482 | NA 1660 | TND |
| Teneur en eau (%vol) | | TND | ASTM D95 | NA 421 | TND |
| Teneur en soufre (% en poids) | | 0,25 max | ASTM D2622 | NA 2890 | 475.1 |
| Indice de cétane | | 48 min | ASTM D976 | NA 8117 | 56.001 |
| Distillation (°C) | PI | | ASTM D86 | NA 1445 | 217.1 |
| | 10% | | | | 256.9 |
| | 50% | | | | 297.1 |
| | 65% | 250 °C min | | | 315.0 |
| | 90% | 360 °C max | | | 359.3 |
| | PF | 390 °C max | | | 381.5 |
| | Distillation (% vol) | | | | 98.8 |
| | Résidu (%) | | | | 1.2 |
| | Pertes (%) | | | | 0 |

Nous avons constaté que le point d'écoulement et le point de filtrabilité plus élevés en période hivernale que les spécifications, ce qui signifiait que notre diesel n'était pas conforme.

4.2. Effet de l'ajout du kérosène sur les propriétés du gasoil

Afin d'améliorer le point d'écoulement du gasoil qu'est l'objet de notre étude, nous ajoutons une quantité définie de kérosène pour déterminer le pourcentage volumique optimal qui nous donnera une valeur de point d'écoulement égal au maximum à -12°C , valeur maximale exigée pour le gasoil en hiver (tableau 4.1).

On précise que les mesures sont effectuées avec des échantillons contenant (5, 10, 15, 20, 25, 30) % de kérosène + le reste gasoil.

4.2.1. Résultats des propriétés à froid du gasoil

4.2.1.1. Point d'écoulement

Les résultats concernant le point d'écoulement sont donnés dans le tableau (4.2) et présentés dans la figure (4.1). Nous rappelons que notre diesel de référence a un point d'écoulement égale à -3°C .

Tableau 4.2 : Effet de l'ajout de kérosène sur le point d'écoulement du gasoil.

| Teneur en kérosène (% vol) | Point d'écoulement ($^{\circ}\text{C}$) |
|----------------------------|---|
| 5 % | - 6 |
| 15 % | - 6 |
| 25 % | - 9 |
| 30 % | - 12 |

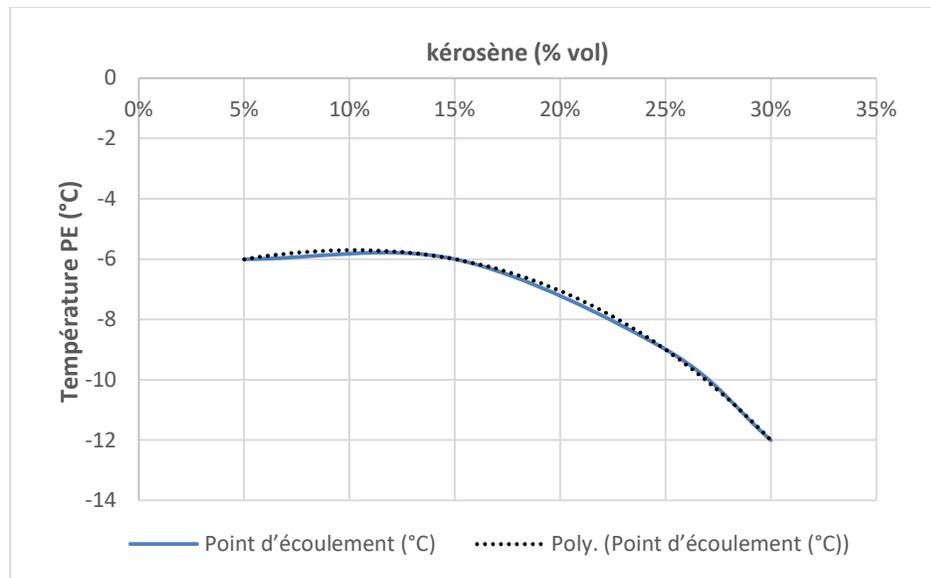


Figure 4.1 : Influence de l'ajout de kérosène sur le point d'écoulement du gasoil.

Nous avons remarqué au départ que le point d'écoulement se stabilise à $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre les pourcentages 5% et 15 %, puis il baissait progressivement jusqu'à atteindre la valeur cherchée qui est de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ à un pourcentage optimale de 30%.

Ces résultats suggèrent que l'ajout de kérosène au diesel peut améliorer les propriétés à froid du gasoil, ce qui peut être particulièrement important pour les moteurs diesel fonctionnant dans des régions à climat froid.

Selon la figure (4.1), qui représente la variation du point d'écoulement avec ajout de kérosène, sur laquelle on note que la température diminue avec l'augmentation de teneur en kérosène par une tendance polynomiale d'ordre 3 avec un coefficient de détermination égale à $R^2 = 1$. Le modèle établi est donné par la relation suivante :

$$y = -200x^3 - 60x^2 + 18.5x - 6.75 \quad (4.1)$$

Avec :

y : La température du point d'écoulement ($^{\circ}\text{C}$).

x : La quantité de kérosène (% vol).

4.2.1.2. Température limite de filtrabilité

La température limite de filtrabilité de notre gasoil de référence est : 4°C. Nous montrons l'évolution du TLF lors de l'ajout de kérosène dans le tableau (4.3) et la figure (4.2).

Tableau 4.3 : Effet de l'ajout de kérosène sur la température limite de filtrabilité du gasoil.

| Teneur en kérosène (% vol) | TLF (°C) |
|----------------------------|----------|
| 5 % | 5 |
| 10 % | 4 |
| 15 % | 3 |
| 20 % | 2 |
| 25 % | 1 |
| 30 % | 0 |

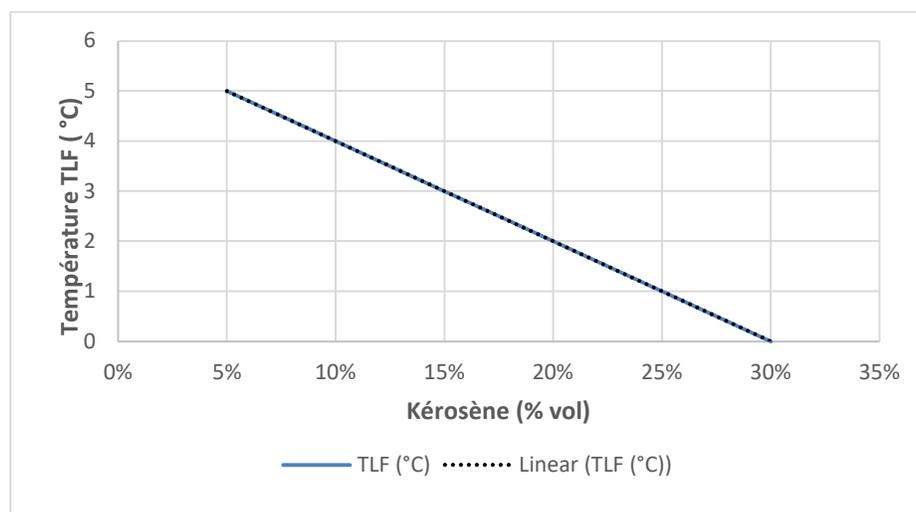


Figure 4.2 : Influence de l'ajout de kérosène sur la température limite de filtrabilité du gasoil.

On observe une diminution progressive de la température limite de filtrabilité du gasoil à mesure que la concentration en kérosène augmente. Cela suggère que l'ajout de kérosène améliore la fluidité du gasoil à des températures plus basses, ce qui peut être bénéfique dans des conditions climatiques froides.

D'après la figure (4.2), le modèle mathématique linéaire est représenté par l'équation :

$$y = -20x + 6 \quad (4.2)$$

Avec :

y = La température limite de filtrabilité (°C).

x = La quantité de kérosène (% vol).

Avec un coefficient de détermination de $R^2 = 1$. Donc à partir de ce modèle mathématique, le pourcentage de kérosène nécessaire pour avoir la valeur de TLF égale à -5 °C est : 55%.

4.2.2. Effet du kérosène sur les propriétés physico-chimiques du gasoil

4.2.2.1. Densité

Le tableau (4.4) donne les résultats de l'effet du kérosène sur la densité du gasoil :

Tableau 4.4 : Effet de l'ajout de kérosène sur la densité du gasoil.

| Teneur en kérosène (% vol) | Densité |
|----------------------------|---------|
| 5 % | 0.835 |
| 10 % | 0.833 |
| 15 % | 0.831 |
| 20 % | 0.830 |
| 25 % | 0.830 |
| 30 % | 0.826 |

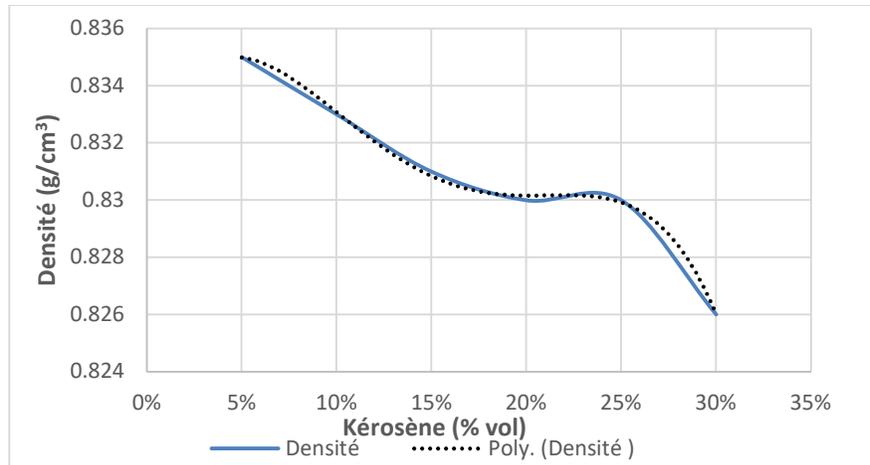


Figure 4.3 : Évolution de la densité du gasoil avec l'ajout de kérosène.

D'après le tableau (4.4), on remarque qu'une augmentation de la concentration en kérosène se traduit par une diminution de la densité. Cela peut joindre que le mélange fournira moins d'énergie que le gasoil pur.

Cette observation est cohérente avec le modèle mathématique polynomial d'ordre 4, représenté par la fonction :

$$y = -20x^4 + 12.519x^3 - 2.5722x^2 + 0.1662x + 0.8317 \quad (4.3)$$

Où le coefficient de détermination $R^2 = 0.9986$.

Avec :

y = La densité (g/cm^3).

x = La quantité de kérosène (% vol).

4.2.2.2. Distillation ASTM

Dans le tableau (4.5) nous présentons les résultats de la distillation ASTM d'un gasoil de référence et d'un mélange gasoil/kérosène à 30% en volume, ce qui correspond au pourcentage optimal pour avoir un point d'écoulement égale à $-12\text{ }^\circ\text{C}$ pour le point d'écoulement. Et pour une meilleure visibilité, nous illustrons les résultats par un graphique représenté dans la figure (4.4).

Tableau 4.5 : Résultats de la distillation ASTM.

| %vol condensé | Gasoil de référence | Gasoil + Kérosène (30%) |
|---------------|---------------------|-------------------------|
| Pi | 217.1 | 167.7 |
| 5 | 246.2 | 217.7 |
| 10 | 256.9 | 226.7 |
| 20 | 268.7 | 237.4 |
| 30 | 277.6 | 247.6 |
| 50 | 297.1 | 270.8 |
| 65 | 315.0 | 295.2 |
| 70 | 322.2 | 304.9 |
| 80 | 338.8 | 326.1 |
| 85 | 348.6 | 338.6 |
| 90 | 359.3 | 353.3 |
| 95 | 372.9 | 371.3 |
| Pf | 381.5 | 376.7 |

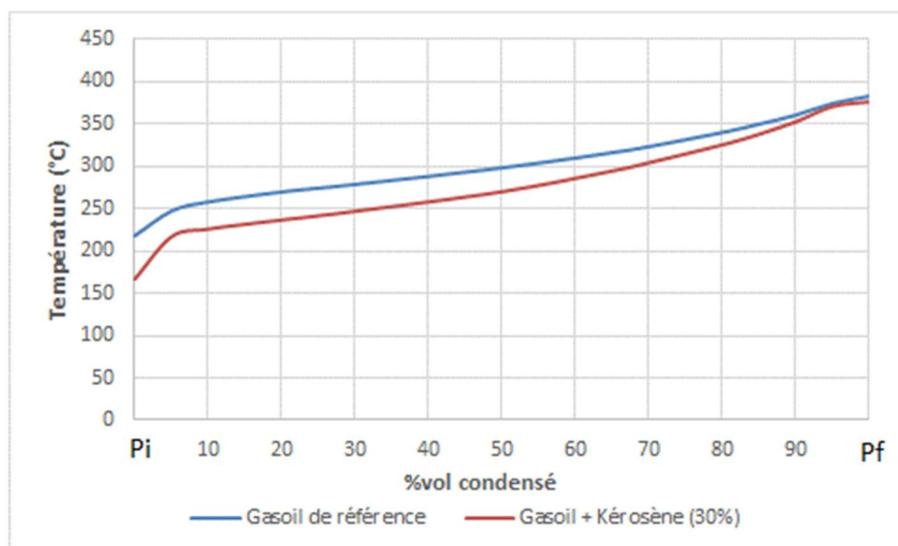


Figure 4.4 : Résultats de la distillation selon la norme ASTM.

Les résultats obtenus avec le mélange gasoil/kérosène demeurent inférieurs à celles du gasoil de référence mais converge au point final vers presque à la même valeur.

4.2.2.3. Point d'éclair (Pensky)

L'effet de l'ajout du kérosène sur le point d'éclair est présenté dans le tableau (4.6) :

Tableau 4.6 : Effet de l'ajout de kérosène sur le point d'éclair du gasoil.

| Teneur en kérosène (% vol) | Point d'éclair (°C) |
|----------------------------|---------------------|
| 5 % | 90.5 |
| 10 % | 86.5 |
| 15 % | 82.5 |
| 20 % | 81.5 |
| 25 % | 80.5 |
| 30 % | 77.1 |

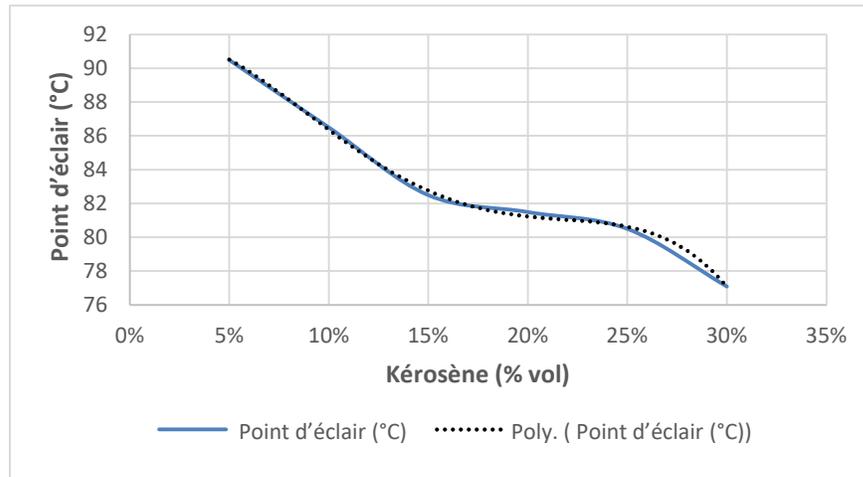


Figure 4.5 : Influence de l'ajout de kérosène sur le point d'éclair du gasoil.

Il est observé que le point d'éclair diminue progressivement et de manière significative avec l'augmentation de la concentration en kérosène. Cela s'explique par le fait que le kérosène est plus volatil que le gasoil, ce qui abaisse le point d'éclair du mélange. Toutefois, il reste dans la conformité. (Tableau 4.1)

Ce modèle polynomial d'ordre 4, caractérisé par un coefficient de détermination R^2 de 0.9985, est défini par l'équation suivante :

$$y = -18000x^4 + 11044x^3 - 2078.3x^2 + 69.079x + 91 \quad (4.4)$$

Avec :

y : La température du point d'éclair (°C).

x : La quantité de Kérosène (% vol).

4.2.2.4. La viscosité

Le tableau (4.7) présente la relation entre la teneur en kérosène et la viscosité du gasoil à 40°C :

Tableau 4.7 : Effet de l'ajout de kérosène sur la viscosité du gasoil.

| Teneur en kérosène (% vol) | Viscosité à 40°C |
|----------------------------|------------------|
| 5 % | 3.915 |
| 10 % | 3.870 |
| 15 % | 3.622 |
| 20 % | 3.408 |
| 25 % | 3.214 |
| 30 % | 3.128 |

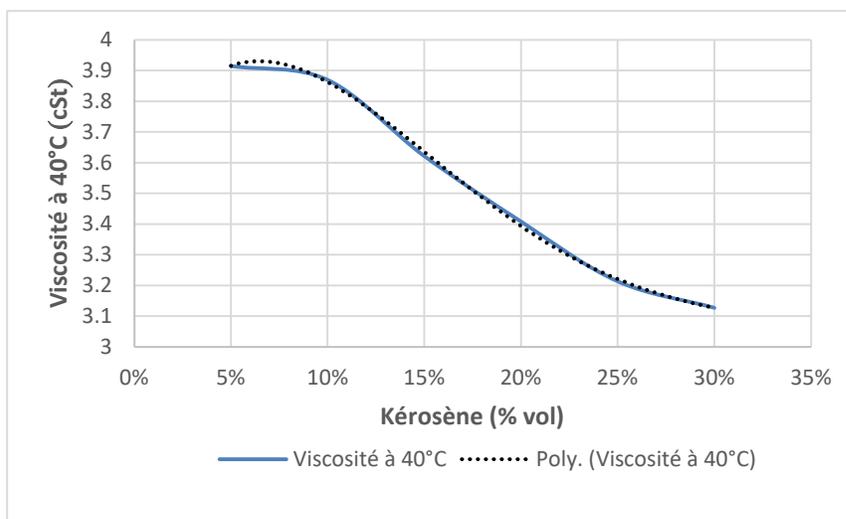


Figure 4.6 : Influence de l'ajout de kérosène sur la viscosité du gasoil.

Il est à noter que la viscosité du mélange gasoil et kérosène diminue avec l'augmentation de la teneur en kérosène, de 3,915 cSt à 5 % de kérosène à 3,128 cSt à 30 % de kérosène. Ceci est cohérent avec le comportement attendu d'un mélange de deux fluides de viscosités différentes.

Ce modèle mathématique polynomial de d'ordre 4 est exprimé par l'équation :

$$y = -496.67x^4 + 459.74x^3 - 141.6x^2 + 13.057x + 3.5632. \quad (4.5)$$

Son coefficient de détermination $R^2 = 0.9991$.

Avec :

y : La viscosité à 40°C (cSt).

x : La quantité de kérosène (% vol).

4.2.2.5. Teneur en soufre

Le tableau (4.8) expose les résultats de l'effet du kérosène sur la teneur en soufre du diesel, indiquant que l'ajout de kérosène réduit la teneur en soufre de ce dernier.

Tableau 4.8 : Effet de l'ajout de kérosène sur la teneur en soufre du gasoil.

| Teneur en kérosène (% vol) | Teneur en soufre (ppm) |
|----------------------------|------------------------|
| 5 % | 304.8 |
| 10 % | 295.0 |
| 15 % | 282.1 |
| 20 % | 265.3 |
| 25 % | 257.6 |
| 30 % | 246.9 |

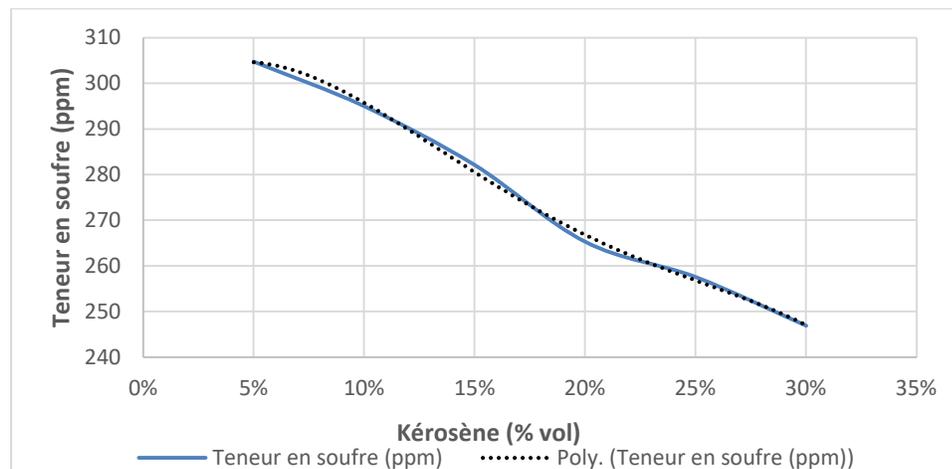


Figure 4.7: Influence de l'ajout de kérosène sur la teneur en soufre du gasoil.

On peut dire que l'ajout de kérosène réduit la teneur en soufre de gasoil. Cette diminution de la teneur en soufre peut être due à la composition chimique du kérosène ajouté, qui peut avoir une teneur en soufre plus faible que celle du gasoil de référence.

Cette formulation décrit un modèle mathématique polynomiale d'ordre 4 et coefficient de détermination $R^2 = 0.9976$, définie par l'équation :

$$y = -37667x^4 + 29293x^3 - 7701.9x^2 + 535.82x + 293.68 \quad (4.6)$$

Avec :

y : La teneur en soufre (ppm).

x = La quantité de Kérosène (% vol).

4.2.2.6. Indice de cétane

Le tableau (4.9) expose les résultats concernant l'influence du kérosène sur l'indice de cétane du diesel. Il est observé que l'ajout de kérosène au gasoil entraîne une légère variation de l'indice de cétane du mélange. En comparaison avec le gasoil de référence ayant un indice de cétane de 56,001 (tableau 4.1), on constate que lorsque le kérosène est ajouté en proportions variant de 5% à 30%, l'indice de cétane reste globalement proche de cette valeur de référence avec des variations minimales.

Cela suggère que l'ajout de kérosène au gasoil n'a pas un impact significatif sur l'indice de cétane du mélange, du moins dans les proportions testées dans le tableau (4.9).

Tableau 4.9 : Effet de l'ajout de kérosène sur l'indice de cétane du gasoil.

| Teneur en kérosène (% vol) | Indice de cétane |
|----------------------------|------------------|
| 5 % | 57.268 |
| 10 % | 57.378 |
| 15 % | 57.244 |
| 20 % | 57.000 |
| 25 % | 56.083 |
| 30 % | 56.154 |

4.2.3. Interprétation globale sur l'effet du kérosène sur le gasoil

Selon les analyses réalisées sur les échantillons de mélange gasoil/kérosène additionnés de quantités variables de kérosène, il a été noté que l'ajout de kérosène abaissait le point d'écoulement du diesel. Une teneur de 30% correspond à la valeur PE qui nous intéresse, qui est de -12°C. Cependant, cette opération a des effets secondaires négatifs sur le carburant :

- Le carburant est consommé plus rapidement au niveau du moteur
- Bien que les propriétés physico-chimiques du gasoil puissent être réduites, elles restent toutefois conformes aux normes établies, telles que le point d'éclair, la viscosité et la teneur en soufre.
- La forte consommation de kérosène revient à une perte de ce produit, plus cher que le diesel, entraînant ainsi une perte de revenus.

4.3. Effet de l'ajout d'additifs NALCO sur les propriétés du gasoil

L'ajout de kérosène s'est avéré efficace pour abaisser le point d'écoulement, mais il a également des effets négatifs. Pour ce faire, nous essayons de le remplacer par un produit commercial déjà disponible sur le marché. Ensuite, nous étudions l'effet des deux additifs sur différentes propriétés du gasoil, notamment le point d'écoulement, et déterminons le dosage optimal de ces produits. Ces additifs sont : NALCO EC5372A et NALCO EC5905A.

4.3.1. Effet des additifs sur les propriétés à froid du gasoil

4.3.1.1. Point d'écoulement

Le tableau (4.10) montre la variation du point d'écoulement en fonction de la concentration des deux additifs NALCO® utilisés :

Tableau 4.10 : Effets des additifs sur le point d'écoulement du gasoil.

| Concentrations (mg/l) | Point d'écoulement (°C) | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------|
| | Gasoil +EC5372A | Gasoil +EC5905A |
| 0 | -3 | -3 |
| 25 | -6 | -6 |
| 50 | -9 | -9 |
| 75 | -9 | -9 |
| 125 | -9 | -12 |
| 250 | -12 | -15 |
| 500 | -15 | -18 |
| 1000 | -18 | -24 |

D'après le tableau (4.10) ou les figures (4.8) et (4.9), on constate une diminution régulière du point d'écoulement du gasoil avec l'augmentation de la concentration d'additifs.

Puisque la norme exige un point d'écoulement correspondant à la valeur minimale admissible de -12°C, la valeur de concentration de rétention de l'additif EC5372A est de 250 mg/l et la valeur de concentration de rétention de l'additif EC5905A est de 125 mg/l. Par rapport à un

échantillon de gasoil seul avec un point d'écoulement égal à -3°C (tableau 4.1), cette valeur peut être réduite à -18°C avec des concentrations élevées de l'additif EC5372A et à -24°C avec EC5905A. La variation du point d'écoulement (PE) pour le mélange gasoil/additifs est inversement proportionnelle à la concentration de l'additif.

Les évolutions du PE en fonction des quantités d'additifs sont, également, représentées par les figures (4.8) et (4.9) :

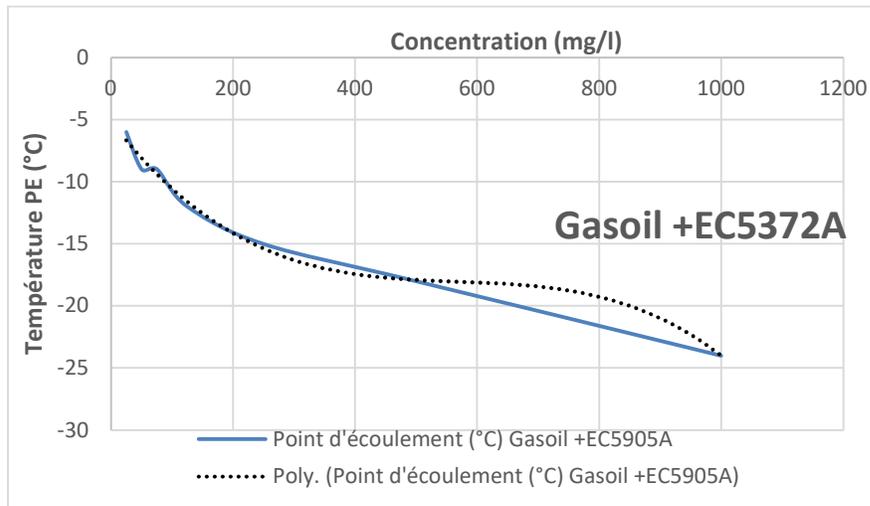


Figure 4.8 : Influence de l'additif EC5372A sur le point d'écoulement.

D'après la figure (4.8) qui représente la variation du point d'écoulement de l'échantillon (Gasoil + NALCO[®] EC5372A) en fonction de sa concentration, d'où on remarque une diminution de la température en fonction de la concentration par une tendance polynomiale d'ordre 3 avec un coefficient de détermination égale à $R^2 = 0.967$. Nous en déduisons la relation suivante :

$$y = -2\text{E-}08x^3 + 3\text{E-}05x^2 - 0.0303x - 6.3616 \quad (4.7)$$

Avec :

y : La température du point d'écoulement ($^{\circ}\text{C}$).

x : La concentration (mg/l).

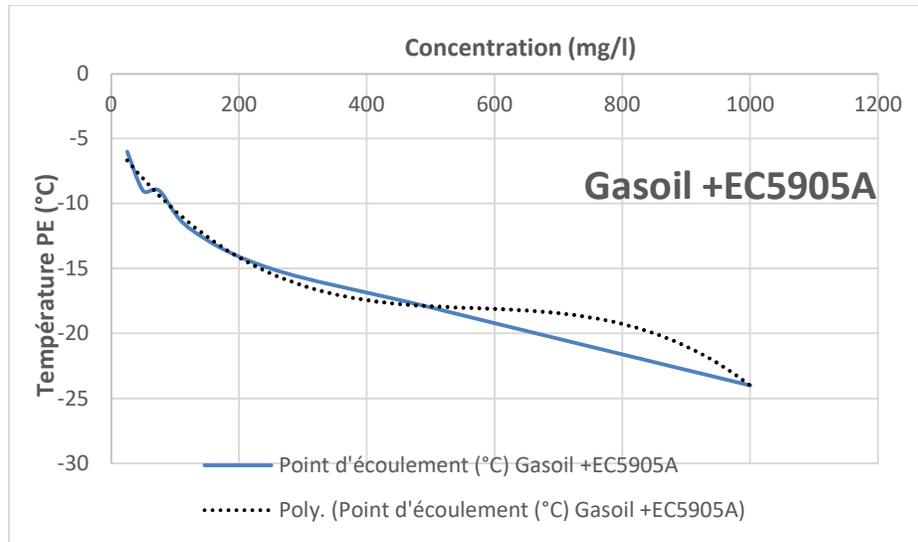


Figure 4.9 Influence de l'additif EC5905A sur le point d'écoulement.

D'après la figure (4.9) qui représente la variation du point d'écoulement de l'échantillon (Gasoil + NALCO® EC5905A) en fonction de sa concentration, d'où on remarque une diminution de la température en fonction de la concentration par une tendance polynomiale d'ordre 3 avec un coefficient de détermination égale à $R^2 = 0.9925$. On conclue avec la relation suivante :

$$y = -6E-08x^3 + 0.0001x^2 - 0.0645x - 5.1227 \quad (4.8)$$

Avec :

y : La température du point d'écoulement (°C).

x : La concentration (mg/l).

4.3.1.2. Température limite de filtrabilité

Les valeurs obtenues pour la température limite de filtrabilité du gasoil seul (sans additifs) et avec additifs sont regroupées dans le tableau suivant (4.11).

Tableau 4.11 : Effets des additifs sur la température limite de filtrabilité.

| Concentrations (mg/l) | Température limite de filtrabilité (°C) | |
|--------------------------|---|------------------|
| | Gasoil + EC5372A | Gasoil + EC5905A |
| 0 | 4 | 4 |
| 25 | 0 | 2 |
| 50 | -3 | 1 |
| 75 | -7 | -1 |
| 125 | -10 | -8 |
| 250 | -13 | -11 |
| 500 | -14 | -12 |
| 1000 | -15 | -15 |

Les données du tableau (4.11) montrent clairement que l'ajout des additifs EC5372A et EC5905A réduit progressivement la température limite de filtrabilité du gasoil, à mesure que les concentrations des additifs augmentent.

Ces résultats montrent que les deux additifs permettent d'abaisser significativement la température limite de filtrabilité du gasoil, améliorant ainsi sa résistance au froid.

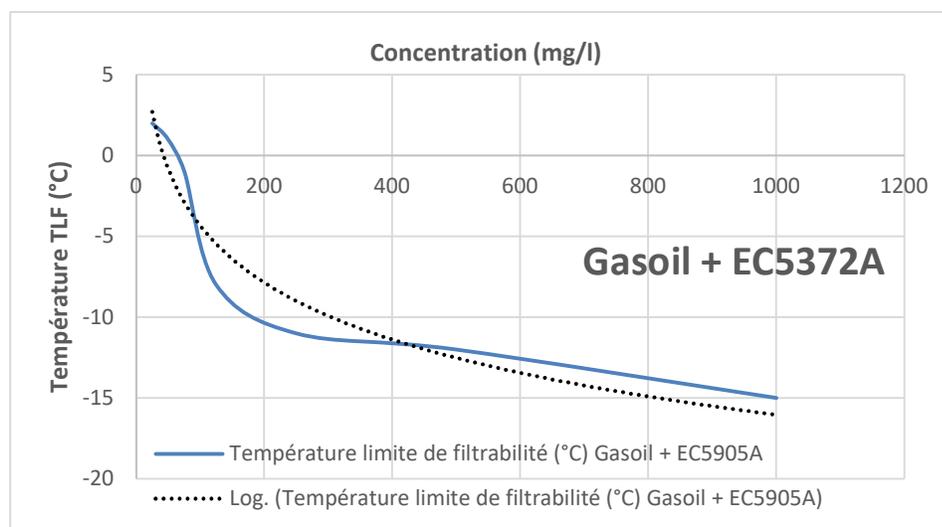


Figure 4.10 : Influence de l'additif EC5372A sur la température limite de filtrabilité.

D'après la figure (4.10), le modèle mathématique logarithmique est représenté par l'équation :

$$y = -4.234\ln(x) + 12.265 \quad (4.9)$$

Avec :

y : La température limite de filtrabilité (°C).

x : La concentration (mg/l).

Avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.9229$. Donc à partir de ce modèle mathématique, la concentration de l'additif EC5372A nécessaire pour avoir la valeur de TLF égale à -5 °C est : 59 mg/l.

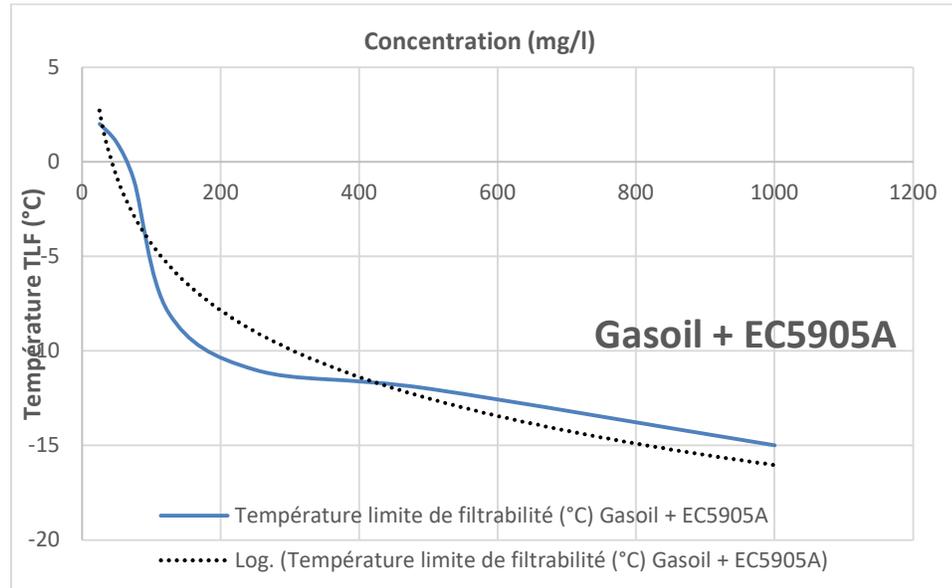


Figure 4.11 : Influence de l'additif EC5905A sur la température limite de filtrabilité.

Selon la figure (4.11), le modèle mathématique logarithmique est décrit par l'équation suivante :

$$y = -5.082\ln(x) + 19.065 \quad (4.10)$$

Avec :

y : La température limite de filtrabilité (°C).

x : La Concentration (mg/l).

Avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.9327$. Donc à partir de ce modèle mathématique, la concentration de l'additif EC5905A nécessaire pour avoir la valeur de TLF égale à -5 °C est : 114 mg/l.

4.3.2. Effet des additifs sur les propriétés physico-chimiques du gasoil

4.3.2.1. Densité

Les valeurs de densité mesurées à 15 °C pour différents échantillons de carburant diesel contenant des additifs sont présentées dans le tableau (4.12). On remarque l'absence de différence significative dans la densité du diesel en fonction des concentrations des additifs, on peut conclure que les additifs n'ont pas eu un impact majeur sur la densité du diesel.

Tableau 4.12 : Effet des additifs sur la densité du gasoil.

| Concentrations (mg/l) | Densité à 15 °C | |
|--------------------------|--------------------------|------------------|
| | Gasoil + EC5372A | Gasoil + EC5905A |
| 0 | 0.840 | 0.840 |
| 25 | 0.841 | 0.841 |
| 50 | 0.841 | 0.840 |
| 75 | 0.840 | 0.841 |
| 125 | 0.841 | 0.841 |
| 250 | 0.840 | 0.841 |
| 500 | 0.841 | 0.840 |
| 1000 | 0.841 | 0.841 |

4.3.2.2. Distillation

Pour la distillation ASTM et pour le reste des analyses, nous avons limité les concentrations des additifs aux valeurs optimales obtenues pour le PE, à savoir (125 mg/l pour l'EC5905A et 250 mg/l pour l'EC5372A).

Les résultats de la distillation ASTM obtenus sont illustrés sur le tableau (4.13) et la figure (4.12) :

Tableau 4.13 : Résultats de la distillation ASTM du gasoil de référence et des mélanges gasoil/additifs.

| %Vol condensé | Gasoil de référence | Gasoil +EC5372A (250 mg/l) | Gasoil +EC5905A (125 mg/l) |
|---------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| Pi | 217.1 | 198.0 | 179.4 |
| 5 | 246.2 | 248.0 | 242.1 |
| 10 | 256.9 | 258.0 | 256.5 |
| 20 | 268.7 | 268.6 | 268.2 |
| 30 | 277.6 | 278.2 | 277.5 |
| 50 | 297.1 | 297.4 | 297.2 |
| 65 | 315.0 | 315.1 | 315.0 |
| 70 | 322.2 | 322.1 | 322.1 |
| 80 | 338.8 | 338.6 | 338.3 |
| 85 | 348.6 | 348.3 | 348.3 |
| 90 | 359.3 | 359.6 | 359.5 |
| 95 | 372.9 | 373.6 | 373.3 |
| Pf | 381.5 | 381.6 | 381.8 |

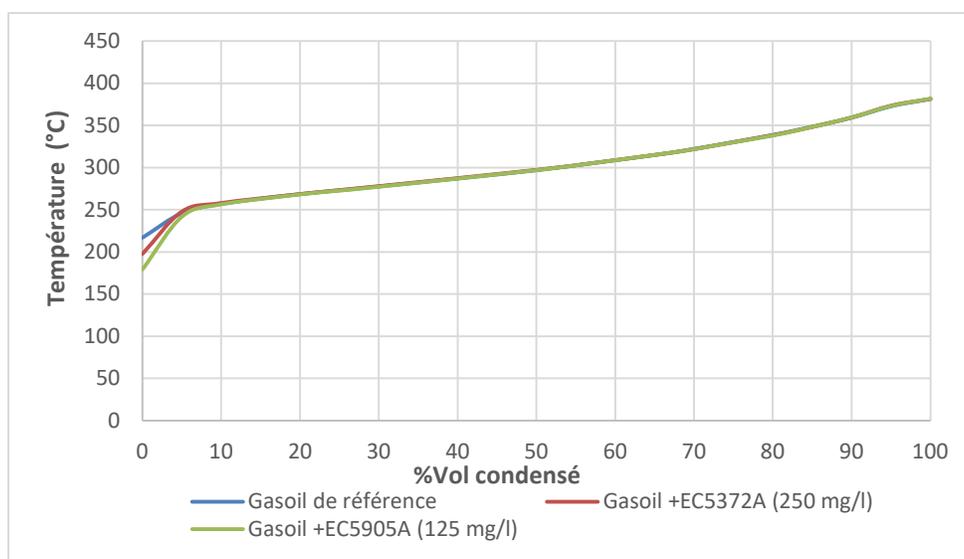


Figure 4.12 : Résultats de la distillation pour le gasoil de référence et les mélanges gasoil/additifs.

D'après le tableau (4.13) et la figure (4.12), nous notons qu'il n'y a pas beaucoup de différence entre les points de distillation ASTM du gasoil sans et avec les deux additifs. Nous avons conclu que les deux additifs NALCO testés n'avaient pas d'impact significatif sur la distillation ASTM et que les échantillons de gasoil contenant des concentrations optimales d'additifs restaient conformes à la conformité du produit.

4.3.2.3. Point d'éclair (Pensky)

Les valeurs du point d'éclair obtenues pour les échantillons du gasoil avec et sans additif sont présentées dans le tableau (4.14) :

Tableau 4.14 : Effets des additifs sur le point d'éclair du gasoil sans et avec additifs.

| Echantillons | Point d'éclair (°C) |
|-----------------------------|---------------------|
| Gasoil de référence | 90.2 |
| Gasoil + EC5372A (250mg/l) | 93.6 |
| Gasoil + EC5905A (125 mg/l) | 95 |

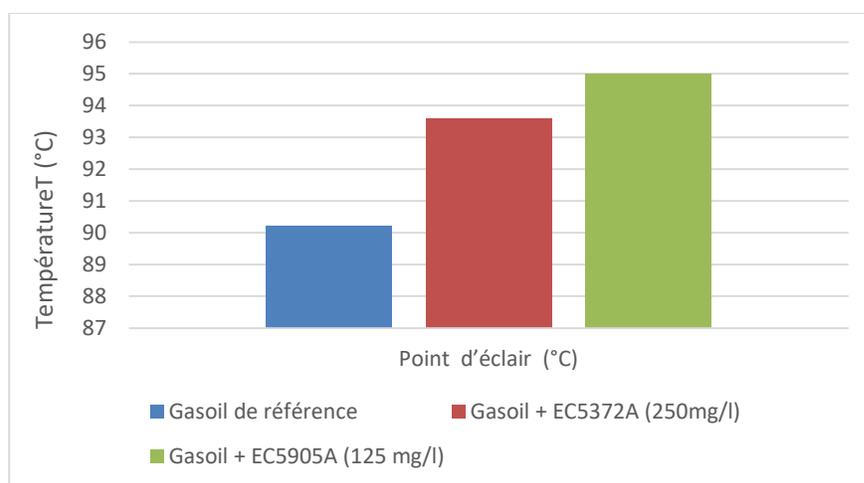


Figure 4.13 : influence des additifs sur le point d'éclair du gasoil sans et avec additifs.

La figure précédente montre de colonnes représentatives des valeurs du point d'éclair Pensky. Il est à noter qu'en présence d'additifs tels que EC5372A et EC5905A, les valeurs du point d'éclair augmentent régulièrement par rapport à la valeur de référence pour l'échantillon de gasoil et restent toujours supérieure à la valeur minimale de 55 requise par les spécifications. Par ailleurs,

il a été observé que la valeur du point d'éclair Pensky du carburant diesel en présence de l'additif EC5905A s'est améliorée par rapport au carburant diesel de référence.

Cela suggère que les additifs ont une influence sur la sécurité en rendant le carburant moins inflammable ou moins sujet à l'ignition.

4.3.2.4. La viscosité

Les valeurs de la viscosité obtenues, à 40°C, pour des échantillons du gasoil sans et avec additifs sont présentées dans le tableau (4.15) :

Tableau 4.15 : Effets des additifs sur la viscosité cinématique à 40°C du gasoil.

| Echantillons | Viscosité cinématique (cSt) |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Gasoil de référence | 4.404 |
| Gasoil + EC5372A (250mg/l) | 4.102 |
| Gasoil + EC5905A (125 mg/l) | 4.718 |

Le tableau (4.15) rassemble les résultats des analyses de la valeur de viscosité effectuées sur des échantillons de gasoil seuls ou en présence d'additifs. Nous remarquons que l'ajout de l'additif EC5905A au gasoil augmente sa viscosité cinématique à 4.718 cSt par rapport à celle du gasoil standard, ce qui indique que cet additif peut augmenter la résistance à l'écoulement du fluide. De même, l'addition de l'additif EC5372A au gasoil diminue sa viscosité cinématique, avec une valeur 4.102 de cSt. Cette différence de valeurs peut être attribuée à la composition chimique et la nature des deux additifs, car l'un des additifs est très visqueux et l'autre très fluide, qui peuvent avoir un impact sur le comportement d'écoulement du carburant dans les systèmes d'injection et de lubrification des moteurs diesel.

Il convient de noter que les valeurs obtenues avec ces additifs sont toujours comprises entre 2 et 9 cSt, conformément aux spécifications du diesel mentionnées dans le tableau (4.1).

4.3.2.5. Teneur en soufre

Les résultats de l'analyse du soufre des échantillons de diesel en présence et en absence d'additifs sont présentés dans le tableau suivant (4.16)

Tableau 4.16 : Effets des additifs sur la teneur en soufre du gasoil

| Echantillons | Teneur en soufre (ppm) |
|-----------------------------|------------------------|
| Gasoil de référence | 475.1 |
| Gasoil + EC5372A (250mg/l) | 459.2 |
| Gasoil + EC5905A (125 mg/l) | 456.0 |

Nous remarquons que l'utilisation d'additifs, tels que l'EC5372A et l'EC5905A, permet de réduire la teneur en soufre du gasoil par rapport au gasoil de référence. Cette diminution contribue à réduire les émissions nocives lors de la combustion du carburant, améliorant ainsi la qualité de l'air et réduisant l'impact sur l'environnement.

4.3.2.6. Indice de cétane

Le tableau (4.17) présente les résultats des analyses de l'indice de cétane effectuées sur des échantillons de diesel seuls ou en présence d'additifs.

Tableau 4.17 : Effets des additifs sur l'indice de cétane du gasoil

| Echantillons | Indice de cétane |
|-----------------------------|------------------|
| Gasoil de référence | 56.001 |
| Gasoil + EC5372A (250mg/l) | 55.813 |
| Gasoil + EC5905A (125 mg/l) | 55.779 |

Le tableau (4.17) présente les résultats des analyses de l'indice de cétane effectuées sur des échantillons de diesel seuls ou en présence d'additifs. On constate que la présence d'additifs réduit légèrement l'indice de cétane, mais l'indice reste supérieur à 48, valeur minimale exigée par les spécifications. Cela signifie que la capacité du carburant à s'auto-enflammer lors de la combustion demeure efficace, même en présence d'additifs

Récapitulatif des résultats de l'étude

Nous présentons ci-dessous un tableau résumé des résultats de cette étude (Tableau 4.18) concernant les différentes propriétés du gasoil seul et en présence d'additifs. Nous précisons que la concentration des additifs pertinents est la concentration optimale par rapport au point d'écoulement, qui est l'objet principal de cette étude.

Tableau 4.18 : Récapitulatif des résultats des propriétés du gasoil - effet des additifs

| Analyses | Gasoil de référence | Gas-oil + EC5372A (250mg/l) | Gas-oil + EC5905A (125mg/l) |
|----------------------------------|--|--|--|
| Point d'écoulement (°C) | -3 | -12 | -12 |
| TLF (°C) | 4 | -11 | -7 |
| Densité (g/cm ³) | 0.840 | 0.840 | 0.841 |
| Point d'éclair (°C) | 90.2 | 93.6 | 95 |
| Viscosité (cSt) | 4.404 | 4.660 | 4.626 |
| Teneur en soufre (% en poids) | 475.1 | 459.2 | 456.0 |
| Indice de cétane | 56.001 | 55.813 | 55.779 |
| Distillation (°C) | PI: 217.1 50% : 297.1 65% : 315.0 90% : 359.3 PF : 381.5 | PI: 198.0 50% : 297.4 65% : 315.1 90% : 359.6 PF : 381.6 | PI: 179.4 50% : 297.2 65% : 315.0 90% : 359.5 PF : 381.8 |

Le tableau (4.18) montre que l'ajout d'une petite quantité d'additifs, permet d'améliorer le point d'écoulement du gasoil pour atteindre la norme requise (-12°C) sans modifier de manière significative les autres caractéristiques, y compris l'indice de cétane, permettant ainsi au gasoil de rester conforme. Pour des raisons économiques, l'additif EC5905A est privilégié, car une concentration de 125 mg/l est suffisante et les deux additifs ont le même prix.

4.4. Etude économique

En Algérie, le point d'écoulement du gasoil est amélioré par l'ajout de kérosène, contrairement à d'autres additifs utilisés dans les pays européens. Pour comparaison, une étude des coûts a été menée concernant l'utilisation du kérosène et de l'additif EC5905A.

Les informations requises pour réaliser cette étude sont les suivantes :

- Masse volumique du gasoil : 0.840 kg/l.
- Masse volumique du kérosène : 0.799 kg /l.
- Capacité de production du gasoil : 60.000 tonnes/mois.
- Quantité d'additif EC5905A utilisée : 125 mg/l.
- Quantité de kérosène utilisée : 30 % (en volume).
- Prix d'additif : 640 DA/kg.
- Prix de kérosène : 50.92 DA/l.
- Capacité de production du gasoil pour la saison d'hiver : 300.000 tonnes/5mois.

Les résultats pour la préparation de 3.10^8 kg de diesel conforme, sont résumés dans le tableau (4.19)

Tableau 4.19 : Résultats comparatifs des coûts de production pour le traitement du gasoil avec le kérosène et EC5905A.

| Produit | Kérosène | EC5905A |
|--------------------------|---------------|----------|
| Quantité nécessaire (kg) | 85380187 | 17990 |
| Prix unitaire (DA/kg) | 40.68 | 640 |
| Prix total (DA) | 3473266007.16 | 11513600 |
| Bénéfice ou perte (DA) | 3461752407.16 | |

Selon les résultats obtenus s'est avéré que l'additif EC5905A ait un prix unitaire plus élevé, tandis que le kérosène nécessite une plus grande quantité, rendant ainsi l'EC5905A plus économique en comparaison. Donc il serait préférable de remplacer le kérosène par l'additif EC5905A, et la quantité économisée de kérosène peut être vendue.

Conclusion générale

Lors de notre stage au laboratoire de la raffinerie d'Alger, nous avons eu l'opportunité d'utiliser les ressources de l'entreprise pour réaliser une tâche clé : l'amélioration du point d'écoulement du gasoil en testant deux types d'additifs fournis par NALCO, afin de remplacer le kérosène habituellement utilisé. Les problèmes de point d'écoulement en hiver nécessitent la consommation de grandes quantités de kérosène, un carburant coûteux et très demandé ailleurs.

Ce processus nous a permis de nous familiariser avec diverses méthodes d'analyse industrielles, qui visent toutes à contrôler étroitement les produits avant leur mise sur le marché.

Notre travail consiste à tester l'effet de divers additifs sur le point d'écoulement, à trouver la concentration optimale et à vérifier s'ils affectent d'autres caractéristiques du gasoil.

Les résultats obtenus ont montré une amélioration du point d'écoulement et les valeurs optimales (objectif initialement fixé) de concentration d'additif pour atteindre un point d'écoulement égal à -12°C étaient de 125 mg/l pour l'additif EC5905A et 250 mg/l pour l'additif EC5372A. Les résultats d'analyses effectuées sur les propriétés à froid et physico-chimiques du gasoil traité ont montré que l'additif EC5905A donnait des résultats très satisfaisants.

D'autre part, l'analyse de différents échantillons de diesel après traitement d'optimisation du point d'écoulement a permis de vérifier qu'en plus de l'amélioration du point d'écoulement (PE) du diesel produit dans la raffinerie, la présence d'additifs n'affectait pas la conformité des autres paramètres qui sont aussi très importants, tels que la densité, viscosité, les points initial et final de distillation, la teneur en soufre, la température limite de filtrabilité, le point d'éclair et l'indice de cétane.

En outre, tous les modèles mathématiques établis dans l'étude simulent de manière précise l'évolution des propriétés physico-chimiques, indiqués par des coefficients de déterminations qui se rapprochent de 1. Ce qui permet d'obtenir de bons résultats.

L'étude de coût, a révélé que l'utilisation de l'additif de NALCO pour abaisser le point d'écoulement du gasoil permet de réduire le coût par rapport à l'utilisation du kérosène, tout en réalisant des économies sur ce dernier.

Références bibliographiques

- [1] Mekkaoui. M., « Etude des émulsions de pétrole à base d'eau de mer ». Thèse doctorat. Université d'Oran. 2018.
- [2] WAUQUIER. J.P., « Le Raffinage du pétrole brut ». Tome 1. Edition technip. Paris. 1994.
- [3] Nouh. L., Bebboukha. M., « Optimisation de la TVR de l'essence par l'étude des paramètres de March du débutaniseur et la vérification du rebouilleur ». Mémoire. Université hamma lakhdhar d'el-oued. 2015.
- [4] Dardar. H., « Suivi de traitement de pétrole Brut par analyses chimiques « Sonatrach-organisation Ourhoud-hassi messaoud ». Mémoire. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. 2014.
- [5] WAUQUIER. J.P., « Le Raffinage du pétrole brut ». Tome 1. Edition technip. Paris, p 3 – 13. 1994
- [6] WUITHIER. J.P., « Le pétrole, Raffinage et Génie chimie ». Tome I. Deuxième édition technip. Paris. 1972. p 41 – 45.
- [7] WUITHIER. J.P., « le raffinage de pétrole brut ». Tome 2. Procédés séparation. Edition technip. Paris. 1998. p 213-228.
- [8] Cours de Raffinage I. Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie (FHC). Université a Bougara. Boumerdes. 2003-2004.
- [9] <http://www.marees-noires.com/fr/petrole/qu-est-ce-que-lepetrole/genese-petrole>. Consulté 26 février 2024.
- [10] « La nécessaire transformation du pétrole brut ». Article publié le 25 août 2014. Consulté 25 mars 2024 depuis : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/necessaire-transformation-petrole-brut>
- [11] Kraus. R.S., « Encyclopédie de sécurité et de santé au travail chapitre 78 : Le raffinage du pétrole ». Consulté 24 février 2024, depuis : [Chapitre 78 - Le raffinage du pétrole \(ilocis.org\)](#)

Références bibliographiques

- [12] Belkhir. N, Torche. M., « Généralité sur le raffinage du pétrole brut ». Mémoire d'ingénieur. Université de Boumerdes. 2007.
- [13] <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/oil-refining-market>. Consulté 27 mars 2024.
- [14] [La généralisation de l'essence sans plomb a permis des "gains considérables" \(aps.dz\)](#). Consulté 27 mars 2024.
- [15] Documentation de la raffinerie d'Alger, « Manuel d'exploitation, gaz plant ». 1964.
- [16] Documentation de la raffinerie d'Alger, « Foster Wheeler ». 1964.
- [17] Document interne de la raffinerie d'Alger. Unité 100.
- [18] Djahra. H. S., Dokkar. S., Kasmiouri. S., « Augmentation de la production de Gasoil-RHM2/HMD ». Mémoire de master. Université Kasdi Merbah Ouargla. 2022.
- [19] Manuel opératoire de la raffinerie d'Alger. Département de production. 1 janvier 2006.
- [20] Manuel opératoire de la raffinerie d'Alger. Unité 100. «Topping». 2006
- [21] Saraswat. R., « Internship Report on Petroleum Refinery Engineering ». Technical report, 2021. Consulté le 5 mai 2024 depuis: [\(PDF\) \(OIP-2021\) Internship Report on Petroleum Refinery Engineering \(researchgate.net\)](#),
- [22] Manuel opératoire de la raffinerie d'Alger. Unité 530. Craquage catalytique RFCC.2018
- [23] Bchitou. R., Elayane. J., Bouhaouss. A., « Study of the thermal cracking during the vacuum distillation of atmospheric residue of crude oil ». Scientific Study & Research. 2017. Vol 18(1), p. 61-71. Consulté le 5 mai 2024 depuis: [\(PDF\) Study of the thermal cracking during the vacuum distillation of atmospheric residue of crude oil \(researchgate.net\)](#).
- [24] Raffinerie d'Alger, « Plan de contrôle qualité des carburant ». SONATRACH. 2006.
- [25] Raffinerie d'Alger, « Manuel opératoire stockage, mélange & expédition ». SONATRACH. 2001.

Références bibliographiques

- [26] Krkošová. Ž., Kubinec. R., Addová. G., et al. « Gas chromatographic-mass spectrometric characterization of monomethylalkanes from fuel diesel ». *Petroleum and Coal*. Vol. 49 (3), p. 51-62. 2007.
- [27] Knothe. G., Sharp. C. A., Ryan. T. W., « Exhaust emissions of biodiesel, petrodiesel, neat methyl esters, and alkanes in a new technology engine». *Energy Fuels*. Vol. 20 (1), p. 403-408. 2006
- [28] Hammadou. S., « Désulfuration oxydative du gasoil catalysée par des complexes à base de vanadium et des liquides ioniques ». Thèse de doctorat. Université de Boumerdes. 2018.
- [29] Lombaert. K., « Composition et évolution des espèces particulières émises à l'échappement d'un moteur diesel en fonction des paramètres moteur et de la nature du carburant ». Thèse de doctorat. Université-Paris V. 2002.
- [30] Ciss. P., « Etude De L'utilisation Du Diesel Oil Dans Les Moteur Diesel Turbocompresseur Aux ICS PLAT-FORME DAROU ». Mémoire d'ingénieur, Université CHEIKH ANTA DIOP. 2002-2003.
- [31] WUITHIER. J. P., « Raffinage et génie chimique ». TOME 1. Publication de l'institut français du pétrole. Edition Technip. 1972.
- [32] Maithufi. M. N., « Synthesis, characterization and application of branched polymers as middle distillate fuels cold flow additives », [Eindhoven University of Technology](#). 2010
- [33] Guibet. J. C., « Carburants et moteur : Technologie, Energie, Environnement ». Tome 1. Edition technip. Paris. 1997.
- [34] Malainine. M., « Désulfuration du Gasoil Algérien selon les nouvelles normes Européennes ». Mémoire de magister. Université de Mostaganem. 2011.
- [35] Kouakou. C., « Etude approfondie de la cristallisation des carburants et des combustibles : impact des nouvelles bases ». Thèse de doctorat. Université de PAU et des PAYS de l'ADOUR. 2014.

Références bibliographiques

[36] Le gazole (gas-oil), carburant issu du pétrole. Consulté le 23 mars 2024 depuis : <http://samuel.benoit.online.fr/fr/gazole-gas-oil-gasoil-combustible-automobile-petrole-derive-moteur-diesel>.

[37] Benazzi. E., Guillon. E., « Procédé d'amélioration du point d'écoulement de charges hydrocarbonées issues du procédé Fischer-Tropsch utilisant un catalyseur à base de zéolithes zbm-30 ». Brevet WO2005012461A1. Institut Français Du Pétrole. 2005.

[38] Khoudir. K., Amazigh. A., « Etude de l'effet de l'ajout du kérosène et du keroflux® 6103 sur le point d'écoulement du gasoil -raffinerie de Skikda RA1K- ». Mémoire. Université a. Mira de Bejaia. 2022.

[39] <http://www.sgs.ca/fr-FR/Trade/Commodity-Trading/Oil-Gas-andChemi-cals/Fuels-Blending-and-Cargo-Treatment/Fuels-Improvement.aspx>. Consulté 23 mars 2024.

[40] NALCO® EUROPE SARL, « EC5372A ». Fiche technique.

[41] NALCO® EUROPE SARL, « EC5905A ». Fiche technique.

[42] Pucko, I., Anelić, R., Faraguna, F., « Methacrylate terpolymers with short-chain comonomers as pour point depressants for diesel fuel and blends with biodiesel ». Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Vol 148(23), p. 13363-13373, 2023. Consulté le 12 avril 2024 depuis : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-023-12633-z>

[43] Titaeva. A., Bogdanov. I., Titaev. K., Morozova. I., kirgina. M., « Study of the N-Paraffins Addition Effect on the Effectiveness of Depressant Additives for the Production of Low-Freezing Diesel Fuels », Applied Sciences. Vol 14(2), p. 518, 2024. Consulté le 12 avril 2024, depuis : <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/2/518>

[44] Dehaghani. A., Rahimi. R., « An experimental study of diesel fuel cloud and pour point reduction using different additives », Petroleum. Vol 5(4), p. 413-416, 2019. Consulté le 20 avril 2024 depuis : [An experimental study of diesel fuel cloud and pour point reduction using different additives - ScienceDirect](#)

[45] Farazmand. S., Ehsani. M. R., Shadman. M. M., Ahmadi. S., Veisi. S., Abdi. E., « The effects of additives on the reduction of the pour point of diesel fuel and fuel oil». Petroleum Science and Technology. Vol 34(17-18), p. 1542-1549, 2016. Consulté le 20 avril 2023 depuis : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10916466.2016.1200082>

[46] Kirgina. M., Bogdanov. I., Altynov. A., Belinskaya. N., Orlova. A., Nikonova. N., « Studying the impact of different additives on the properties of straight-run diesel fuels with various hydrocarbon compositions». Oil & Gas Science and Technology. Vol 76, 40, p 13, 2021. Consulté le 20 avril 2023 depuis :

https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/full_html/2021/01/ogst200359/ogst200359.html

[47] ASTM D97-12, « Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products ». West Conshohocken. 2012.

[48] Raffinerie d'Alger, « Manuel opératoire laboratoire ». SONATRACH. 2016.

[49] ASTM D86-23, «Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure ». West Conshohocken. 2023.

[50] ASTM D6371-17a, « Standard Test Method for Cold Filter Plugging Point of Diesel and Heating Fuels ». West Conshohocken. 2017.

[51] Cedrati. R., Lahiouel. A, « Essais Normalisés des produits pétroliers », Séminaire, Institut Algérienne de Pétrole Skikda. 2006.

[52] ASTM D445-17a, « Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity) ». Standard British Standard. 2017.

[53] ASTM D445, « Caractéristiques standard et Instructions pour capillaire en verre Viscosimètres cinématiques ». ASTM International. 2012.

[54] Dupuy. M.A., « Procèdes en raffinage et pétrochimie hydrocarbure et produit pétrolière ». Opération Manuel. Algérie. 2015.

[55] ASTM D976-21, « Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels ». ASTMInternational.2021.

Annexe

1. Information supplémentaire sur NALCO® EC5372A

1.1. Codes de dangers

La liste des codes qui commence par la lettre H mentionne un danger pertinent.

H226 : Liquide et vapeur inflammables.

H302 : Nocif en cas d'ingestion.

H304 : Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires.

H315 : Provoque une irritation de la peau.

H319 : Provoque une irritation grave aux yeux.

H332 : Nocif par inhalation.

H335 : Provoque des irritations respiratoires.

H336 : Peut provoquer des somnolences ou des vertiges.

H351 : Suspectés de causer le cancer.

H373 : Peut causer des lésions aux organes par une exposition prolongée ou répétée.

H400 : Très toxique pour la vie aquatique.

H410 : Très toxique pour la vie aquatique avec des effets durables.

H411 : Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme.

1.2. Information écologique

Tableau 1 : Toxicité du NALCO EC5372A

| Toxicité | |
|---|--|
| Forme | Concentration et durée d'exposition |
| - Toxicité pour les poissons | 21 mg/l, pendant 96 heures |
| - Toxicité chronique pour les poissons | 0.083 mg/l, pendant 14 jours |
| - Toxicité pour les dauphins et autres invertébrés aquatiques | 68 mg/l, pendant 48 heures |
| - Toxicité chronique pour les daphnies et autres invertébrés aquatiques | 0.2 mg/l, pendant 21 jours |
| - Toxicité pour les algues | 22 mg/l, pendant 72 heures |
| - Toxique pour les bactéries | ≥ 1000 mg/l, pendant 40 heures |

| | |
|-------------------------|--|
| Biodégradabilité | La partie organique de cette préparation devrait être faiblement biodégradable, d'où 60 % de ce mélange est facilement biodégradable, après un temps d'exposition de 28 jours. |
| Bioaccumulation | Les composants sont potentiellement bioaccumulable, d'où la portion dans l'eau devrait flotter à la surface. |

1.3. Contrôle de l'exposition / Protection individuelle

1.3.1. Mesures techniques

Une ventilation générale est obligatoire. L'utilisation d'une ventilation locale est recommandée pour contrôler les émissions près de la source. Les échantillons de laboratoire doivent être manipulés dans une hotte aspirante. Assurer la ventilation mécanique des espaces confinés.

1.3.2. Equipement de protection individuel

L'utilisation et le choix des équipements de protection individuelle sont liés au risque de la production, au lieu de travail et à la manipulation du produit. En général, nous recommandons, à titre de précaution minimale, l'utilisation de lunettes de sécurité munies d'écrans latéraux et de vêtements de travail protégeant les bras, les jambes et le corps. En outre, toute personne visitant une zone où est manipulé ce produit doit au moins porter des lunettes de sécurité munies de protections latérales.

- **Protection des yeux / du visage**

Lors de la manipulation de ce produit, il est recommandé d'utiliser des lunettes anti-éclaboussures. La norme européenne applicable peut être trouvée dans **EN 166**.

- **Protection de la peau**

Lors de la manipulation de ce produit, l'utilisation de gantelets chimiques est recommandée. Le choix du gant de travail dépend des conditions de travail et de ce que les chimistes manipulent, d'après les conditions de manipulation légère en utilisant des gants fabriqués

à partir de Viton, devrait être remplacé immédiatement si des signes de dégradation sont observés. La norme européenne applicable peut être définie dans la norme **EN 374**.

- **Protection respiratoire**

Lorsque les concentrations dans l'air peuvent dépasser les limites, il est recommandé d'utiliser un masque filtrant à demi-face ou un appareil respiratoire à adduction d'air. Un matériau filtrant approprié dépend de la quantité et du type de produits chimiques manipulés. Considérer l'utilisation du type de filtre : A-P la norme européenne applicable peut être trouvée dans **EN 140**, **EN 137**, **EN 143** et **EN 14387**.

2. Information supplémentaire sur NALCO® EC5905A

2.1. Information écologique

Tableau 2 : Toxicité du NALCO EC5905A

| Toxicité | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Population | Composé | Concentration et durée d'exposition |
| Toxique pour les poissons. | Hydrocarbure : C10, aromatique, >1% naphène | 2 mg/l, pendant 96 heures. |
| | 1, 2, 4-triméthylbenzène. | 7.7 mg/l, pendant 96 heures. |
| Toxicité pour les dauphins et autres invertébrés aquatiques. | Hydrocarbure : C10, aromatique, >1% naphène | 3 mg/l, pendant 48 heures. |
| | Kérosène. | 1.4 mg/l, pendant 48 heures. |
| | 1, 2, 4-triméthylbenzène. | 3.6 mg/l, pendant 48 heures. |
| Toxicité pour les algues. | Hydrocarbure : C10, aromatique, >1% naphène | >1 mg/l, pendant 72 heures. |
| | 1, 2, 4-triméthylbenzène. | 2.4 mg/l, pendant 96 heures. |
| Toxique pour les bactéries. | Hydrocarbure : C10, aromatique, >1% naphène | 1.892 mg/l |
| Toxicité chronique pour les poissons. | Hydrocarbure : C10, aromatique, >1% naphène | 0.487 mg/l, pendant 28 jours. |
| Toxicité chronique pour les daphnies et autres invertébrés. | Hydrocarbure : C10, aromatique, >1% naphène | 0.851 mg/l, pendant 21 jours. |
| | 1, 2, 4-triméthylbenzène. | 0.367 mg/l, pendant 16 jours. |

| | |
|-------------------------|---|
| Biodégradabilité | La partie organique de cette préparation devrait être faiblement biodégradable. |
| Bioaccumulation | Les composants sont potentiellement bioaccumulables, d'où la portion dans l'eau devrait flotter à la surface. |