

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

UNIVERSITÉ 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

Caractérisation et modélisation des propriétés physiques du gazole

Présenté par :

BARA Kaouthar

Devant le jury :

Nom

Mr. CHANANE

Mr. YKRELEF

Mr. BENHASSINE Amine

Encadré par :

Pr. EL-HADI Djamel

Qualité

Président

Examineur

CO-encadreur

Année universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu le Tout-Puissant de m'avoir donné courage, santé, souffle et patience pour accomplir ce travail.

Je tiens à présenter ma gratitude à mon promoteur **Pr. EL-HADI DJAMEL** d'avoir accepté l'encadrement de mon travail, mais aussi pour sa disponibilité, sa confiance et ses conseils tout au long de ce projet. Son accompagnement rigoureux et humain a grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Mes plus vifs remerciements s'adressent aux membres du jury **Mr. CHANANE** et **Mr. YKRELEF** d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Mes sincères reconnaissances s'adressent à **Mr. BENHASSINE Amine** responsable de laboratoire d'avoir accepté d'être mon co-promoteur dans ce travail. Je vous remercie, monsieur, surtout pour votre patience, votre aide ainsi que pour vos judicieux conseils.

Hommages respectueux au groupe de laboratoire NAFTAL Mrs, Djamel, Kamel et Mme Zineb pour leurs accueils chaleureux.

Je souhaite également remercier nos professeurs de la spécialité pour la qualité d'enseignement qu'ils nous ont prodigué au cours de ses dernières années. Une mention spéciale leurs revient pour cette expérience de vie enrichie qu'ils nous ont apporté.

Je tiens à me remercier moi-même. Pour ne pas avoir abandonné. Pour avoir continué à croire, même quand c'était difficile. Pour chaque pas accompli avec détermination, chaque page écrite avec passion. Ce mémoire est l'aboutissement d'un engagement personnel et d'une volonté sereine de réussir.

Enfin, nous exprimons nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A Dieu le tout puissant, l'unique, l'éternel, le miséricordieux.

A mon père

Homme de principe, admiré de tous ces semblables pour ses œuvres et son sens humaniste. Durant tout ce temps, tu t'es battu à ce que je ne manque de rien pour mener à bien mes études.

A ma mère

Je suis arrivé à ce stade grâce à ta bénédiction et, tes doux et précieux conseils qui m'ont toujours aidé dans la vie. Il n'y a pas assez de mots pour t'exprimer mes sentiments les plus profonds envers toi.

A ma sœur

La fraternité est une chose très précieuse qu'il nous convient de consolider et de garder jalousement.

Que le Tout Puissant ALLAH consolide davantage notre grande fraternité et solidarité.

A ma chère tante et toutes mes cousines.

Enfin à tous mes amis (es).

Kaouthar.

ملخص

يركز عملنا على التوصيف الفيزيائي والكيميائي لوقود الديزل ونمذجة تقطير ASTM لعينات الديزل، وهو وقود يستخدم على نطاق واسع في قطاعات النقل والصناعة وإنتاج الطاقة. ولضمان جودته من الضروري معرفة خصائصه الفيزيائية. غالبًا ما تكون الطرق التقليدية مستهلكة للوقت ومكلفة، لذلك تم اقتراح طريقة توصيف تعتمد على تحليل تقطير ASTM ونمذجة النتائج التي تم الحصول عليها. تم إجراء دراسة تجريبية على 20 عينة ديزل مع الاختبارات الفيزيائية. وقد أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها إمكانية نمذجة منحنيات التقطير باستخدام متعدد الحدود من الدرجة الثالثة، الذي يعبر عن درجة الحرارة كدالة للحجم المقطر. يتم التحقق من جودة التعديل عن طريق حساب الأخطاء ($ER_{moy} = 0.2903\%$ و $EAmoy = 0.7842$) ومعامل التحديد ($R^2 = 0.9997$)، مع وجود اتفاق جيد بين النتائج التجريبية والقيم المتوقعة. ويعتبر النموذج المقترح طريقة فعالة لتقييم نوعية الديزل في المركبات الخفيفة والثقيلة. يعتبر إدخال مشتق درجة الحرارة بدلالة الحجم المقطر طريقة جديدة لتوصيف وقود الديزل، التي تهدف إلى تحسين تقنيات مراقبة الجودة وتركيب المنتجات البترولية.

كلمات مفتاحية: النمذجة، التوصيف، الديزل، التقطير ASTM.

Abstract

Our work focuses on the physic-chemical characterization of diesel fuel and modeling ASTM distillation of diesel samples, which is a widely used fuel in the transportation, industrial and energy production sectors. To guarantee its quality, it is essential to know its physical properties. Conventional methods are often time-consuming and expensive, so a characterization method based on ASTM distillation analysis and modeling of the results obtained was proposed. An experimental study was carried out on 20 diesel samples with physical tests. The results obtained made it possible to model the distillation curves using a degree 3 polynomial expressing temperature as a function of the distilled volume. The quality of the adjustment is verified by calculating the errors ($ER_{moy} = 0.2903\%$ and $EAmoy = 0.7842$) and the coefficient of determination ($R^2 = 0.9997$), with a good agreement between the experimental data and the predicted values. The resulting model is an effective method for estimating the composition of diesel in light and heavy compounds. The introduction of derivatives to find a new method for characterizing diesel fuel. This method aims to improve quality control techniques and formulation of petroleum products.

Key words: Modeling, characterization, diesel, ASTM distillation.

Résumé

Notre travail porte sur la caractérisation physico-chimique du carburant gazole et la modélisation de la distillation ASTM des échantillons de gazole, qui est un carburant largement utilisé dans les secteurs du transport, de l'industrie et de la production énergétique. Pour garantir sa qualité, il est essentiel de connaître ses propriétés physiques. Les méthodes classiques sont souvent longues et coûteuses, c'est pourquoi on a proposé une méthode de caractérisation basée sur l'analyse de la distillation ASTM et la modélisation des résultats obtenus. Une étude expérimentale a été réalisée sur 20 échantillons de gazole avec des tests physiques. Les résultats obtenus ont permis de modéliser les courbes de distillation à l'aide d'un polynôme de troisième degré exprimant la température en fonction du volume distillé. La qualité de l'ajustement a été vérifiée par le calcul des erreurs ($ER_{moy} = 0,2903\%$ et $EAmoy = 0,7842$) et du coefficient de détermination ($R^2 = 0,9997$), avec une bonne concordance entre les données expérimentales et les valeurs prédites. Le modèle obtenu constitue une méthode efficace pour estimer la composition de gazole en composés légers et lourds. L'introduction de calcul des dérivées pour trouver une nouvelle méthode de caractérisation du carburant gazole. Cette méthode vise à améliorer les techniques de contrôle qualité et la formulation des produits pétroliers.

Mots clés : Modélisation, caractérisation, gazole, distillation ASTM.

Abréviations

ASTM: American Society for Testing and Materials.

EN : Norme européenne.

FOD: Fuel oil domestic.

GPL : Gaz pétrolière liquéfié.

ISO: International organization for standardization.

Jet A1 : Carburant aviation de type kérosène pour les moteurs a turbin.

NA : Norme algérienne.

NF : Norme française.

PDR: Pièces de rechange.

ppm : parts per million.

SR: Straight Run.

TP4: Turboprop carburant 4.

ULSD: Ultra-low-sulfur-diesel.

Table des matières

REMERCIEMENTS

DEDICACES

Résumé

Abréviations

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale

Chapitre 1 Synthèse bibliographique

Introduction	5
1.1 Généralité sur le pétrole	5
1.1.1. Historique du pétrole	5
1.1.2. Définition du pétrole brut	5
1.1.3. Les origines du pétrole	6
1.1.4. Composition du pétrole et des fractions pétrolières	6
1.1.5. Raffinage de pétrole brut	6
1.1.6. Le raffinage en Algérie	7
1.1.7. Distillation du pétrole	8
1.2 Les produits pétroliers	9
1.2.1. Gaz de pétrole liquéfié	9
1.2.2. Le propane	9
1.2.3. Le butane	10
1.2.4. Le kérosène	10
1.2.5. Le fioul domestique	10
1.2.6. Le fioul lourd	10
1.2.7. Lubrifiants	10
1.2.8. Bitumes	11
1.2.9. Essence	11
1.3 Concepts sur le gasoil	12
1.3.1. Définition de gasoil	12
1.3.2. Origine et composition du gasoil	12
1.3.3. Types de gasoil et son utilisation	12

1.3.4. Importance de caractérisation pour gasoil.....	13
1.4 Les caractéristiques physiques des carburants (gasoil et essence).....	14
1.4.1. Aspect visuel	14
1.4.2. Densité.....	15
1.4.3. La distillation ASTM	15
1.4.4. La viscosité cinématique	17
1.4.5. Point d'éclair (flash point).....	17
1.4.6. Point écoulement (pour point).....	17
1.4.7. Point de trouble (Cloud point).....	17
1.4.8. Point de congélation (freezing point)	18
1.4.9. Indice de cétane (Cetane index)	18
1.4.10. La tension de vapeur Reid	18
1.4.11. La teneur en gomme.....	18
1.4.12. Indice d'octane méthode recherche.....	19
1.4.13. La corrosion à la lame de cuivre	19
1.5 La modélisation.....	19
1.5.1. Définition	19
1.5.2. Objectif de la modélisation	20
1.6 Les corrélations	20
1.6.1. Définition	20
1.6.2. L'importance de la corrélation	20
1.6.3. Coefficient de détermination.....	21
1.6.4. L'erreur absolue et erreur relative.....	21

Chapitre 2 Matériel et méthodes

Introduction.....	24
2.1 Généralités sur le centre des carburants du CHIFFA (NAFTAL)	24
2.1.1. Historique du NAFTAL	24
2.1.2. Unité district carburant CHIFFA.....	24
2.1.3. Composants de l'unité.....	24
2.1.4. Laboratoire	25
2.1.5. Transport et Stockage des Hydrocarbures.....	25
2.2 Méthodes de mesure des propriétés physiques du gasoil.....	26
2.2.1. Condition de réception d'un échantillon	26
2.2.2. Aspect visuel	27
2.2.3. Densité à 15°C	27
2.2.4. Point éclair (vase fermé)	30

2.2.5. Distillation ASTM.....	31
2.2.6. Viscosité cinématique	33
2.2.7. Le point d'écoulement.....	35
2.2.8. Indice de cétane	36
2.3 Les paramètres ambiants de laboratoire	37
2.3.1. Définition	37
2.3.2. Mesure des paramètres ambiants de laboratoire	37
2.3.3. Effets des paramètres ambiants sur les résultats des tests de carburant	38
2.4. Étalonnage des équipements	38
2.5. La modélisation par logiciel STATISTICA	39

Chapitre 3 Résultats et discussion

Introduction	41
3.1 Résultats des analyses physiques de gazole.....	41
3.1.1. L'aspect visuel	41
3.1.2. La densité (ASTM D1298).....	41
3.1.3. Le point éclair (ASTM D93A)	43
3.1.4. La distillation ASTM (ASTMD86).....	44
La viscosité cinématique (ASTM D445)	47
3.1.5. Les points écoulement et congélation (ASTM D97 et ASTM D2386).....	48
3.1.6. L'indice de cétane (ASTM D976).....	49
3.1.7. Les mesures des paramètres ambiants de laboratoire.....	50
3.2 Modélisation de la distillation ASTM	51
3.2.1. Le modèle mathématique proposé.....	51
3.2.2. Les paramètres statistiques.....	53
3.2.3. Les courbes de distillation ASTM.....	55
3.2.4. Comparaison des températures expérimentales et calculées	56
3.2.5. La caractérisation de la distillation ASTM par les dérivées $\frac{dT}{dV}$ et $\frac{d^2T}{dV^2}$	61
3.3. Modélisation de point éclair et la densité	63
3.3.1. Modèle mathématique proposé	63
3.3.2. Les paramètres statistiques.....	64
Conclusion	66
ANNEXES	68
Références.....	77

Liste des figures

Figure 1.1: Procédé de distillation de pétrole brut [11].....	9
Figure 1.2 : Courbe de distillation ASTM [24].....	16
Figure 2.1 : Échantillons gasoil et essence sans plomb.....	26
Figure 2.2 : Étiquette d'échantillon.....	27
Figure 2.3: Aréomètre.	28
Figure 2.4: Mesure de la densité.	29
Figure 2.5: Appareil de mesure de point éclair (vase fermé).	30
Figure 2.6: Appareil de distillation ASTM.	32
Figure 2.7: Viscosimètre à capillaire.....	33
Figure 2.8: Bain thermostaté de viscosité à 40°C.....	34
Figure 2.9: Bain de refroidissement.	35
Figure 2.10: L'échantillon à la température de congélation.....	36
Figure 2.11: Thermo-hygromètre.....	38
Figure 3.1: Courbe de distillation ASTM pour échantillon 19.	55
Figure 3.2: Courbe de distillation ASTM pour échantillon 20.	56
Figure 3.3: Courbe de T_{exp} en fonction de T_{cal} pour l'échantillon 19.....	60
Figure 3.4: Courbe de T_{exp} en fonction de T_{cal} pour l'échantillon 20.....	61
Figure 3.5: Courbe de FP en fonction de d_s pour 20 échantillons.	64

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristique physicochimique de gasoil [22].	14
Tableau 2.1: Capacités des bacs [22].	26
Tableau 3.1: Densités des échantillons de gazole.	42
Tableau 3.2: Point éclair des 20 échantillons.	43
Tableau 3.3.1 : Températures (°C) de la distillation ASTM (échantillon 1 à 10).	44
Tableau 3.4: Valeurs de distillat (Vd), résidu (Vr) et de la perte (Vp).	46
Tableau 3.5: Viscosité cinématique de 20 échantillons.	47
Tableau 3.6: Point d'écoulement et de congélation de 20 échantillons.	48
Tableau 3.7: Indice de cétane par deux méthodes.	49
Tableau 3.8: Paramètres ambiants de laboratoire.	50
Tableau 3.9: Coefficients de modèle mathématique pour 20 échantillons.	52
Tableau 3.10: Paramètres statistiques de modèle.	54
Tableau 3.11: Température expérimentale et calculée au point V=10%.	57
Tableau 3.12: Température expérimentale et calculée au point V=65%.	58
Tableau 3.13: Température expérimentale et calculée au point V=90%.	59
Tableau 3.14: Caractérisation des échantillons gazole par le calcul des dérivées.	62

Introduction Générale

Le pétrole est une ressource naturelle essentielle qui constitue l'une des principales sources d'énergie au monde. Il est composé d'un mélange complexe d'hydrocarbures et d'autres composés organiques qui, après raffinage, sont transformés en divers produits utiles, tels que l'essence, le gazole, le kérosène et le mazout. Le pétrole brut est constitué de différentes fractions qui varient en fonction de la température à laquelle elles se vaporisent. Ces fractions sont séparées par un processus de distillation, permettant d'obtenir des produits plus spécifiques adaptés à différents usages. Parmi ces produits, le gazole (ou diesel) est une fraction particulièrement importante en raison de son utilisation extensive dans le secteur des transports, de l'industrie et de la production d'énergie [1].

Le gazole est un carburant liquide principalement constitué de molécules d'hydrocarbures aliphatiques (paraffines), qui est obtenu lors de la distillation du pétrole brut. Il est largement utilisé dans les moteurs diesel des véhicules lourds, des machines industrielles, ainsi que dans les générateurs de secours. Le gazole est prisé pour sa densité spécifique plus élevée par rapport à l'essence, ainsi que pour sa consommation réduite en comparaison avec d'autres carburants [1]. Sa qualité, sa performance énergétique et son impact environnemental dépendent fortement de ses propriétés physico-chimiques, telles que la densité, la viscosité, l'indice de cétane. La connaissance et la maîtrise de ces propriétés sont donc essentielles pour répondre aux exigences normatives et pour garantir le bon fonctionnement des moteurs diesel.

Pour évaluer la qualité du gazole et sa performance dans différents moteurs, plusieurs tests en laboratoire sont réalisés. Ces tests comprennent principalement la distillation, qui permet de déterminer les températures caractéristiques du carburant, telles que le point de départ, la température à mi-distillation et la température de fin de distillation. Ces tests sont cruciaux pour déterminer la volatilité du gazole, son comportement de combustion, ainsi que sa capacité à fonctionner dans des conditions climatiques variées. La qualité du gazole joue un rôle essentiel dans la performance des moteurs et dans la conformité aux normes environnementales. Or, la caractérisation complète de ses propriétés physiques nécessite souvent des analyses expérimentales longues, coûteuses et dépendantes de la disponibilité d'équipements spécialisés.

Parmi les méthodes utilisées, la distillation ASTM qui est une procédure courante pour déterminer les températures caractéristiques du gazole. Cependant, ces données sont souvent limitées à une lecture brute, sans exploitation avancée pour en déduire d'autres propriétés. Dans ce contexte, il devient pertinent de chercher à exploiter au maximum les données de distillation, en les intégrant dans un modèle mathématique prédictif. Cela permettrait de caractériser plus

rapidement le gazole et sa composition, d'en évaluer sa qualité sans recourir à des tests complémentaires, et ainsi de faciliter le travail des laboratoires de contrôle qualité.

Vu l'importance de ce sujet intéressant et stratégique, nous avons essayé de réaliser un travail qui s'intitule « Caractérisation et modélisation des propriétés physiques de gazole », qui est structuré en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** : définir le pétrole et ses fractions, plus précisément, le gasoil, les caractéristiques physiques et la modélisation.
- **Le deuxième chapitre** : décrit le centre carburant NAFTAL (Chiffa) dans la wilaya de BLIDA. Et présente les matériels utilisés ainsi que les méthodes de calculs et l'équipement utilisé pour la caractérisation du gazole.
- **Le troisième chapitre** : est consacré aux interprétations des résultats obtenus par les méthodes d'analyses de gazole et la modélisation des propriétés physiques.
- **Enfin**, ce travail est achevé par conclusion.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

Introduction

Ce chapitre présente une initiation aux domaines pétroliers, puis les origines du pétrole brut, sa composition et le processus de raffinage passant par les fractions pétrolières, plus précisément le gazole, jusqu'aux caractéristiques physiques de ces dérivés spécifiquement l'essence sans plomb et le gasoil. Ensuite, une définition pour la modélisation, les corrélations et l'importance de ses utilisations.

1.1 Généralité sur le pétrole

1.1.1. Historique du pétrole

Le pétrole est connu de l'humanité depuis l'Antiquité. Il était utilisé comme matière inflammable en Babylonie et à Byzance, et les Indiens s'en enduisaient avant de partir en campagne [2].

Au XVIIIe siècle, le pétrole lampant devient une source d'éclairage pour les maisons et les rues. Puis, avec l'invention du moteur à explosion au XIXe siècle, le pétrole se transforme en carburant pour divers moyens de transport, marquant un tournant majeur dans son utilisation [2].

À partir de 1950, l'exploitation du pétrole brut se développe. Le premier grand gisement est découvert en Roumanie, suivi par l'exploitation de gisements aux États-Unis, dès le début du XXe siècle, le pétrole devient une ressource stratégique d'enjeu économique et politique à l'échelle mondiale [2].

La période entre 1950 et 1970 est caractérisée par de nombreuses découvertes de gisements, principalement au Moyen-Orient, qui attirent l'intérêt des grandes puissances consommatrices de pétrole [2].

1.1.2. Définition du pétrole brut

Le pétrole, que les romains appelaient bitume, doit son nom à deux mots latins «petraoleum » qui signifie «huile de pierre». C'est une huile minérale naturelle combustible, sa couleur varie du vert au brun noir et il dégage une odeur caractéristique [3].

Le pétrole brut est un fluide visqueux, à forte odeur, inflammable, ayant un aspect qui varie du noir au brun foncé selon sa composition. C'est un mélange extrêmement complexe comprenant plusieurs milliers de molécules différentes. Il se compose principalement de trois types d'hydrocarbures : les paraffines ou alcanes, les naphténiques ou cycloalcanes et les aromatiques, à cause de leurs instabilités : les composés aliphatiques insaturés comme les oléfines et les

dioléfines ne sont pas présents dans le pétrole brut mais seront produits dans les procédés de raffinage [4]. Il contient également de nombreuses impuretés, en particulier du soufre, mais aussi des traces de métaux (nickel, vanadium), d'azote et d'oxygène [5].

1.1.3. Les origines du pétrole

Le pétrole se trouve généralement emprisonné sous une couverture de roches imperméables, dans les vides de roches poreuses appelées réservoirs et simplement dans les bassins sédimentaires [5]. Le pétrole se forme à partir de la décomposition de matières organiques, principalement des micro-organismes marins tels que le plancton et le phytoplancton, ainsi que des restes de plantes et d'animaux aquatiques. Ces matières organiques s'accumulent au fond des mers et des lacs, où elles sont recouvertes par des couches de sédiments. Sous l'effet de la pression et de la chaleur croissante, cette matière organique se transforme en kérogène, un précurseur du pétrole. À mesure que la température et la pression augmentent, le kérogène se dégrade thermiquement pour former du pétrole et du gaz naturel. Ce processus, appelé maturation, se produit généralement entre 60°C et 120°C. Une fois formé, le pétrole migre vers des réservoirs géologiques plus perméables, où il peut s'accumuler, piégé par des couches géologiques imperméables. Ces gisements de pétrole sont ensuite exploités pour leur extraction environ 40 % et leur raffinage en divers produits pétroliers [6].

1.1.4. Composition du pétrole et des fractions pétrolières

C'est un mélange complexe majoritairement constitué d'hydrocarbures (93 à 99 %), mais également de composés organiques soufrés (0,01 à 6%), azotés (0,05 à 15 0,5%), oxygénés (0,1 à 0,5%) et de certains métaux chimiquement liés à des molécules organiques (0,005 à 0,15%), tels que le nickel et le vanadium. Il est composé d'un ensemble de molécules hydrocarbonées pouvant comporter de quelques unités à plus d'une centaine d'atomes de carbone [7]. Les molécules pétrolières ont aussi des masses molaires très diverses pouvant varier entre 16 g/mol de la molécule de méthane et plus de 10000 g/mol pour les molécules asphalténiques. La proportion de chaque élément, surtout des hétéroatomes et métaux, dépend fréquemment de l'origine géographique du gisement de pétrole.

1.1.5. Raffinage de pétrole brut

Le pétrole brut est soumis au processus de raffinage, il est séparé en plusieurs sous-mélanges dénommés coupes pétrolières ou fraction pétrolière. Les fractions pétrolières sont traditionnellement caractérisées et classés par un intervalle de distillation, exprimé en température d'ébullition normale ou en nombre d'atomes de carbone équivalent des paraffines

cette répartition varie généralement fonction de la nature du brut traité, les principales coupes sont :

- Le gaz combustible (fuel gaz) est consommé dans les différents fours de la raffinerie. Il est constitué principalement du méthane C1 et l'éthane C2,
- Les coupes propane C3 et butane C4 sont commercialisées soit pour des usages domestiques, soit sous forme de GPL-carburant,
- L'essence légère SR (Straight Run) [C5 – 90 °C], est utilisée comme base carburant et constitue également la matière première de la pétrochimie,
- L'essence lourde (coupe naphta) [90-200°C], représente la charge de reformage catalytique,
- La coupe kérosène [200-250°C], est destinée à la fabrication des carburateurs (Jet A1, TP4,...). Elle rentre également dans la fabrication du gazole moteur et du FOD,
- Les coupes gazole [250-400°C], servent à la constitution des carburants pour moteurs diesel et du fuel domestique,
- Les distillats [400-550°C], peuvent recevoir des utilisations multiples selon le type et la vocation de la raffinerie : charge d'unités de conversion ou de préparation de lubrifiant, diluants des fuels lourds,
- Le résidu sous vide (550°C) dont l'importance relative varie avec la qualité du brut est affecté, après un éventuel désalphaltage, à la fabrication des fuels lourds, des huiles de base et des bitumes [8].

Le raffinage consiste à transformer le pétrole brut en carburant, combustible, matière première pour la pétrochimie, ou encore des produits spécifiques tels que les huiles lubrifiantes et les bitumes. Cette transformation est réalisée dans le strict respect des spécifications propres à chaque produit, qui doivent s'adapter sans cesse à l'évolution des marchés et des normes environnementales [9].

1.1.6. Le raffinage en Algérie

- L'outil de raffinage en Algérie dispose actuellement de six raffineries en cours d'exploitation (Alger, Arzew, Skikda (RA1K et Topping condensat), Hassi-Messaoud et Adrar). La capacité de traitement annuelle s'élève à 27 millions de tonnes, dont 5 millions tonnes/an en condensat à Skikda et 0,6 million tonne/an pour la raffinerie d'Adrar. De par ses caractéristiques, l'industrie du raffinage est assujettie aux évolutions et mutations qui sont en train d'être opérées sur le marché national et international, essentiellement en termes d'offre et de demande de produits pétroliers sur le plan qualitatif et quantitatif.

- Réhabilitation et augmentation de la capacité de traitement de la raffinerie de Skikda pour porter sa capacité à 16,5 millions de tonnes/an de pétrole brut. Soit une augmentation de 10%. Actuellement, la capacité de traitement est de 15 millions de tonnes/an,

- Réhabilitation et augmentation de la capacité de traitement de la raffinerie d'Arzew pour porter sa capacité à 3,75 millions de tonnes/an de pétrole brut. Soit une augmentation de 50%. Actuellement, la capacité de traitement est de 2,5 millions de tonnes/an,

- Réhabilitation et augmentation de la capacité de traitement de la raffinerie d'Alger pour porter sa capacité à 3,645 millions de tonnes/an de pétrole brut. Soit une augmentation de 35%. Actuellement, sa capacité de traitement est de 2,7 millions de tonnes/an.

De plus, un important programme de développement a été lancé pour augmenter les capacités de l'outil de raffinage avec la construction de cinq nouvelles raffineries d'une capacité totale de 30 millions de tonnes par an (quatre raffineries d'une capacité de traitement de 5 millions de tonnes par an chacune et une raffinerie d'une capacité de traitement du brut lourd de 10 millions de tonnes par an) [10].

1.1.7. Distillation du pétrole

Ce processus est affecté après le dégazage et le dessalement du brut. Ces derniers sont réalisés sur qui les sites d'extraction. L'unité de distillation initiale ou le topping a pour but de fractionner le pétrole brut en un certain nombre de coupes ou fractions des températures d'ébullition des hydrocarbures. La distillation du brut est effectuée selon la densité de ce dernier. Généralement, la distillation initiale dite (distillation atmosphérique) est réalisée entre 30°C et 380°C.

Dans un grand nombre de raffineries, le résidu atmosphérique est envoyé dans une colonne fractionnée à pression sous vide afin de poursuivre le fractionnement. Cette colonne fonctionne à pression inférieure à la pression atmosphérique. La distillation sous vide permet d'obtenir des distillats sous vide (C20-C50) et un résidu sous vide (C50+) appelé aussi (fond du baril). Contrairement aux distillats sous vide, le résidu n'est pas valorisable et concentre dans le brut, ce qui rend difficile sa valorisation par d'éventuels catalytiques [11].

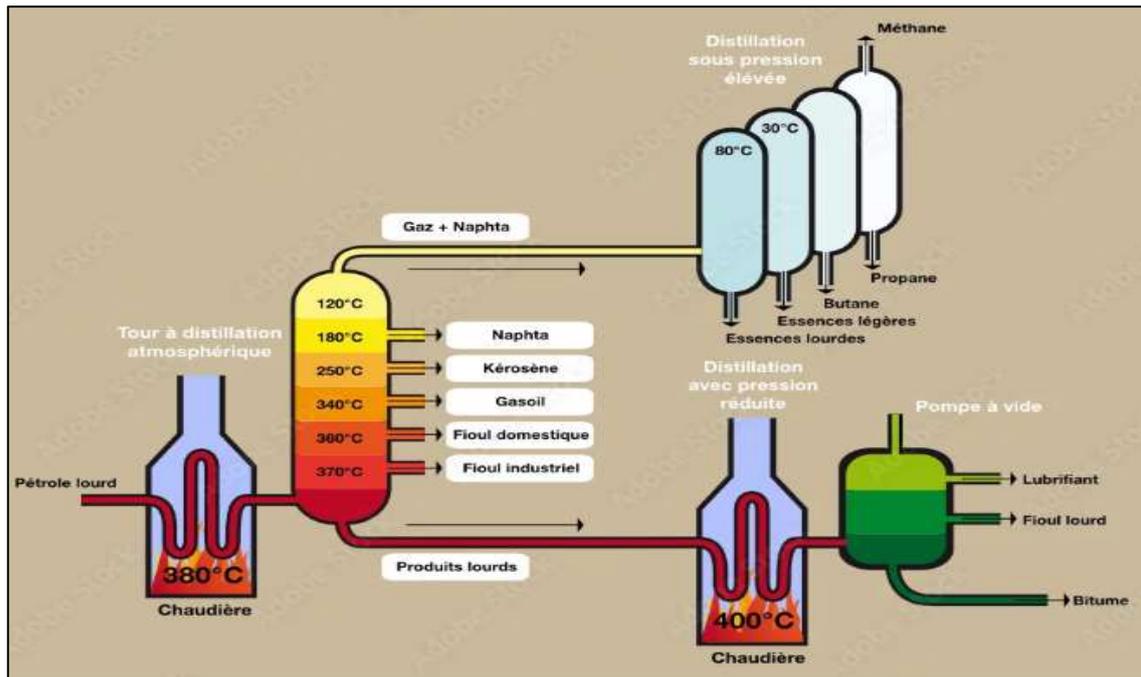


Figure 1.1: Procédé de distillation de pétrole brut [11].

1.2 Les produits pétroliers

1.2.1. Gaz de pétrole liquéfié

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est un mélange de propane et de butane, qui est stocké sous forme liquide à faible pression. Il peut être utilisé soit sous forme gazeuse après détente à pression atmosphérique, soit sous forme liquide à l'aide d'un système d'injection adapté. Ce gaz provient à la fois des opérations de purification du gaz naturel lors de son extraction et des différentes unités de raffinage du pétrole brut. Il est principalement utilisé comme combustible domestique ou industriel, mais il est également apprécié comme carburant en raison de ses faibles émissions polluantes [12].

1.2.2. Le propane

Le propane commercial doit contenir au moins 90% de propane et de propène. Sa masse volumique doit être égale ou supérieure à 0,502 kg/l à 15°C, et son point d'ébullition final doit être inférieur ou égal à -15°C. Ce produit est utilisé principalement comme carburant pour le chauffage, la cuisson et certains véhicules, en raison de ses caractéristiques de combustion propres et efficaces.

1.2.3. Le butane

Le butane est principalement composé de butane et de butène, et doit contenir moins de 19 % de propane et de propène. Sa masse volumique à 15°C doit être égale ou supérieure à 0,559 kg/l, tandis que son point d'ébullition final doit être inférieur ou égal à 1°C. De plus, la pression de vapeur du butane à 50°C ne doit pas dépasser 6,9 bars. Ce gaz est utilisé pour le chauffage domestique, les réchauds et comme carburant dans certaines applications.

1.2.4. Le kérosène

Le kérosène est principalement destiné à l'alimentation des moteurs d'avions à réaction. Il est composé d'un mélange d'hydrocarbures distillant entre 140°C et 300°C, principalement des hydrocarbures de C9 à C16, incluant des paraffines, des iso-paraffines, des naphténiques et des aromatiques. Ce carburant est essentiel dans l'aviation en raison de ses caractéristiques de performance et de sécurité à haute altitude [13].

1.2.5. Le fioul domestique

Le fioul domestique est un combustible utilisé principalement pour le chauffage des bâtiments, notamment dans les chaudières. Il se compose d'un mélange d'hydrocarbures de C9 à C20, avec un point d'ébullition situé entre 163°C et 357°C. Le fioul domestique est proche du gasoil et fait partie des fiouls légers, offrant une combustion efficace pour les systèmes de chauffage à base de fioul [14].

1.2.6. Le fioul lourd

Le fioul lourd est un produit dérivé des fractions les plus lourdes du pétrole brut, obtenu lors du raffinage du pétrole. Sa composition est complexe et peut varier en fonction de la source du pétrole brut. Il est constitué d'hydrocarbures paraffinique, naphténique et aromatique, et peut contenir des dérivés de soufre et des acides organiques. Il est classé en fonction de sa teneur en soufre. Utilisé principalement dans l'industrie et pour les centrales électriques, le fioul lourd est également employé dans certains navires [14].

1.2.7. Lubrifiants

Les lubrifiants sont des substances utilisées pour réduire les frottements et l'usure des pièces mobiles des moteurs et des machines. Composés d'hydrocarbures liquides et visqueux riches en paraffines, leur température de distillation varie entre 380°C et 500°C. Les lubrifiants sont obtenus par distillation sous vide des résidus issus de la distillation atmosphérique du pétrole. Ils se déclinent sous forme d'huiles blanches, d'huiles isolantes et de graisses lubrifiantes, essentielles pour le bon fonctionnement des moteurs et des équipements mécaniques [15].

1.2.8. Bitumes

Le bitume est un mélange d'hydrocarbures solides ou visqueux, généralement de couleur brune ou noire. Il est obtenu comme résidu de la distillation sous vide des produits issus de la distillation atmosphérique du pétrole. Le bitume est principalement utilisé dans la construction de routes, car il possède une grande adhérence et est particulièrement adapté pour la fabrication de l'asphalte. Ce matériau est également employé dans l'industrie de l'étanchéité et dans diverses applications de construction [15].

1.2.9. Essence

L'essence est un liquide inflammable, dérivé de la distillation du pétrole de formule chimique est (C₇H₁₆). Ce dernier étant utilisé comme carburant dans les moteurs à combustion interne. C'est un mélange d'hydrocarbures, auxquels peuvent être ajouté des additif pour améliorer ses performances (comme des agents antioxydants, ou des améliorants de la combustion). On y trouve en moyenne :

- 20 à 30 % d'alcanes, hydrocarbures saturés,
- 5 % de cyclo alcanes, hydrocarbures saturés cycliques,
- 30 à 45 % d'alcènes, hydrocarbures insaturés,
- 30 à 45 % d'hydrocarbures aromatiques, de la famille du benzène [16].

L'essence a une haute volatilité et un pouvoir calorifique qui permet aux moteurs de produire l'énergie nécessaire pour propulser un véhicule. Est un carburant essentiel dans le secteur des transports, servant principalement à alimenter les moteurs à combustion interne des voitures, motos et autres véhicules à moteur. Sa grande importance réside dans son rôle clé dans l'économie mondiale, facilitant la mobilité quotidienne, le transport de biens et de personnes, ainsi que le développement des infrastructures [17]. Parmi les types d'essence les plus courants, on retrouve l'essence normale, utilisée dans la majorité des véhicules standard, l'essence super (ou premium), qui possède un indice d'octane plus élevé, idéale pour les moteurs de haute performance, et l'essence sans plomb, qui est aujourd'hui la norme, excluant le plomb tétraéthyle autrefois utilisé, afin de réduire l'impact environnemental [18]. Ces différents types répondent aux exigences de performance des moteurs tout en minimisant les effets nocifs pour la santé et l'environnement [19].

1.3 Concepts sur le gasoil

1.3.1. Définition de gasoil

Le gasoil est un carburant liquide composé d'un mélange d'hydrocarbures (paraffiniques, naphthéniques, aromatiques et oléfiniques). Sa formule chimique est ($C_{16}H_{34}$), et sa température de distillation varie entre 200°C et 390°C. Il est principalement utilisé dans les moteurs diesel pour lesquels il est intéressant d'avoir son indice de cétane en vue de l'améliorer mais comme il y a généralement surproduction de gasoil, ce produit est une matière première pour l'industrie organique. Il est donc utilisé comme combustible ou comme matière première. Bien souvent, on confond, ou plutôt on utilise, indifféremment le nom gasoil avec diesel [15].

1.3.2. Origine et composition du gasoil

Le gazole, ou diesel, est un carburant obtenu par distillation fractionnée du pétrole brut, un processus qui consiste à chauffer le pétrole brut entre 200°C et 390°C sous pression atmosphérique pour séparer ses différents composants. Se situant entre les fractions plus légères comme l'essence (C5-C9) et les plus lourdes comme les fiouls lourds. Il est constitué principalement d'hydrocarbures environ 20 à 50 % de paraffines, 30 à 40 % de naphthéniques et 10 à 30 % d'aromatiques. La teneur en soufre, qui était historiquement élevée, est désormais fortement réduite à moins de 10 ppm dans le gazole routier, conformément aux normes environnementales européennes (EN 590), afin de limiter les émissions de polluants.

Les hydrocarbures composent des chaînes carbonées allant généralement de C10 à C22. On distingue dans sa composition des fractions légères (C10-C14), qui sont plus volatiles, facilitant ainsi le démarrage à froid, mais offrant une densité énergétique plus faible et un pouvoir lubrifiant limité. Les fractions lourdes (C15-C22), quant à elles, apportent une meilleure lubrification et une combustion plus stable, mais elles sont aussi plus polluantes si la combustion est incomplète [20].

1.3.3. Types de gasoil et son utilisation

A. Gazole à très faible teneur en soufre (ULSD)

Contient moins de soufre, réduit les émissions polluantes, améliore la performance moteur et l'économie de carburant. Disponible en grades 1-D, 2-D, ou 4-D [21].

- **Gazole 1-D (Diesel 1)** : Carburant léger, faible teneur en paraffine et en soufre, haute volatilité, bon pour le froid (point de congélation jusqu'à -40 °C). Contient des additifs pour protéger le moteur, utilisé pour les véhicules commerciaux, camions, conditions froides, démarrage facile en hiver.

- **Gazole 2-D (Diesel 2)** : Carburant plus lourd, plus visqueux, avec une meilleure lubrification, mais plus sensible au gel en hiver (point de congélation entre -28 °C et -7 °C). Plus économique et énergétique, utilise pour l'usage général pour véhicules diesel, générateurs, usage toute l'année, particulièrement en climat tempéré.

- **Gazole 4-D (Diesel 4)** : Mélange de distillats et de fioul résiduel, plus visqueux, moins volatil, utilisé pour moteurs lents à forte charge. Moins adapté au froid, utilisé pour les équipements lourds, moteurs stationnaires, marins ou hors-route.

B. Gazole teinté (Dyed Diesel)

Coloré en rouge, utilisé pour les véhicules hors-route (agriculture, chantier), souvent exonéré de taxes. Son usage sur route est interdit [21].

C. Biodiesel

Carburant renouvelable à base d'huiles végétales ou de graisses animales, souvent mélangé avec les gazoles standards pour réduire les émissions et améliorer la lubrification afin de Réduisent l'impact environnemental, améliorer la lubrification, mais doivent être utilisés avec précaution selon les moteurs [21].

1.3.4. Importance de caractérisation pour gasoil

La caractérisation des carburants est essentielle pour garantir leur qualité, leur performance et leur conformité aux normes environnementales et techniques, et optimiser leur formulation. Elle consiste à analyser et mesurer diverses propriétés physiques, chimiques et fonctionnelles du carburant afin d'assurer son adéquation à son usage prévu. Les caractéristiques de gazole sont présentées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Caractéristique physicochimique de gasoil [22].

Caractéristiques	Limites	Normes NA/ASTM
Densité à 15 °C	0,810-0,860	NA417/ASTM D1298
Distillation % vol		
65 % vol	> 250	NA1445/ASTMD86
90 % vol	< 360	
Pf % vol	< 390	
Viscosité cinématique (mm ² /s) à 40 °C	2-9	NA1443/ASTM D445
Teneur en soufre totale % poids	< 0,25	NA 2810/ASTM D1260
Teneur en cendre % poids	/	NA 1660 /ASTM D482
Teneur en eau % vol	/	NA 421 /ASTM D95
Point d'éclair °C	> 55	NA 2658/ ASTM D93A
Point écoulement °C	Indiquer	NA 2660/ASTM D97
Point congélation °C	Indiquer	ASTM D2386
Température limite de filtrabilité°C		
Hiver 01/11 au 31/03		ASTM D6371
Eté 01/04 au 31/10	< -5 < 5	
Indice de cétane	> 48	NA8117/ASTM D976
Résidu de carbone Conradson % poids	< 0,3	ASTM D189

1.4 Les caractéristiques physiques des carburants (gasoil et essence)

1.4.1. Aspect visuel

Le test de l'aspect visuel du gazole consiste à observer et à évaluer l'apparence physique du carburant afin de détecter toute contamination ou anomalie. Ce test permet de vérifier que le gazole est exempt d'impuretés visibles, telles que des particules solides, de l'eau ou des débris. Un gazole de bonne qualité doit être limpide et transparent, sans dépôts ni troubles. Si des particules, de l'eau ou des résidus sont visibles, cela peut indiquer une contamination du carburant qui pourrait affecter son bon fonctionnement dans le moteur.

1.4.2. Densité

La densité d'une substance est une grandeur physique importante pour identifier le type de carburant, sa mesure fait l'objet de la norme (NF T60-101), et définie comme le rapport entre la masse volumique du produit à une température donnée, et la masse volumique du corps de référence qui est en général celle de l'eau pour les liquides. Sa densité à température ambiante est de 1g/cm^3 (ou 1000 kg/m^3), à une température standard. Dans ce cas, la densité est égale à la masse volumique du produit et pour les gaz, utilise la référence masse volumique d'air ($1,293\text{ kg/m}^3$) [23]. La densité d'un matériau change généralement de manière inversible avec la température, c'est-à-dire que la densité varie en fonction de la température. Pour cela, on a calculé la densité à température déterminée par la formule suivante :

$$d_s = d + a(T - 15) \dots \dots \dots (1)$$

Avec d_s : La densité spécifique convertie à 15°C ,

d : La densité à température ambiante,

a : Le coefficient de dilatation volumétrique,

T : Température ambiante en degrés Celsius ($^\circ\text{C}$).

La mesure expérimentale de cette propriété se fait par différentes méthodes telles que :

- La méthode du pycnomètre,
- La méthode de l'aréomètre,
- La méthode du densimètre électronique.

1.4.3. La distillation ASTM

La distillation ASTM est une technique de distillation analytique non préparative destinée à caractériser la charge elle-même. Cette méthode s'applique aux produits dont les points d'ébullition s'étendent de 0°C à 400°C . La distillation correspond à la méthode d'ASTM D86 ou NM 07-002 pour les fractions légères et moyennes. La prise d'échantillon est de 100ml, la distillation se déroule dans un appareillage approprié et les conditions sont précisées en fonction de la nature de l'échantillon [24]. On observe simultanément la lecture de la température et du volume condensé. Les résultats du test sont reportés sur une courbe (figure 1.2) qui représente l'évolution de la température d'ébullition en fonction du volume distillé exprimé en % vol [24].

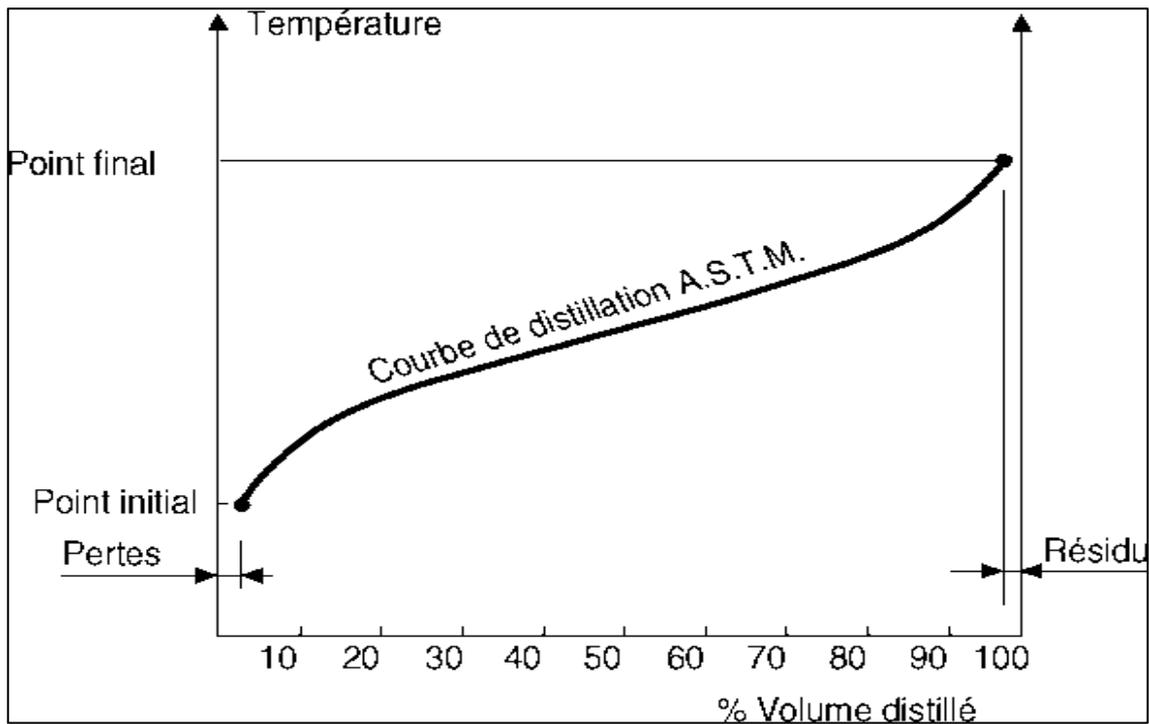


Figure 1.2 : Courbe de distillation ASTM [24].

On définit sur cette courbe quelques repères :

- Le point initial P_i correspondant à la première goutte de distillat recueilli,
- Le point final P_f associé à la dernière goutte de distillat recueilli,
- Le pourcentage volumique % vol des fractions distillées à une température donnée,
- Le pourcentage total du distillat recueilli,
- Le pourcentage du résidu restant dans le ballon de distillation,
- Le pourcentage des pertes correspond sensiblement à la fraction très légère distillée au début du chauffage et est calculé par la formule suivante :

$$V_p = 100 - (V_d + V_r) \dots \dots \dots (2)$$

Avec V_p : Volume de la perte en ml,

V_d : Volume de distillat en ml,

V_r : Volume de résidu en ml.

La volatilité est importante si V_p augmente [24].

1.4.4. La viscosité cinématique

La viscosité cinématique (ν) est une mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement sous l'effet de la gravité. Elle est définie comme le rapport entre la viscosité dynamique (ou absolue) et la densité du fluide. La viscosité cinématique exprime donc la fluidité d'un liquide à une température donnée, et elle est influencée par la température et la nature du fluide. L'unité de la viscosité cinématique est le millimètre carré par seconde (mm^2/s) et généralement mesurée à l'aide d'un viscosimètre à tube capillaire [25].

1.4.5. Point d'éclair (flash point)

Le point d'éclair (FP) des fractions pétrolières est la température la plus basse corrigée à 1atm (14,7psi) à laquelle les vapeurs provenant du gazole s'enflamment, c'est-à-dire qu'elles s'éclairent lorsqu'elles sont exposées à une flamme dans des conditions d'essai spécifiques. La détermination expérimentale du point d'éclair fait l'objet des normes : ASTM D92-46 dans le cas où l'essai est effectué creuset ouvert (Cleveland Open Cup) et ASTM D 93-46 dans le cas où l'essai est effectué à creuset fermé (Pensky-Martens 'closed cup').

Le point d'éclair est lié à la volatilité d'un carburant et à la présence de composants légers et volatils, la pression de vapeur plus élevée correspond à des points d'éclair inférieurs. Le point d'éclair d'un carburant indique la température maximale qu'il peut être stocké sans risque d'incendie grave [26].

1.4.6. Point écoulement (pour point)

Le point d'écoulement (PP) d'une fraction pétrolière est la température la plus basse à laquelle elle s'écoulera ou pourra être versée. Il est obtenu expérimentalement en utilisant la procédure ASTM D97. Le point d'écoulement est l'une des caractéristiques à basse température des fractions lourdes. Lorsque la température est inférieure au point d'écoulement d'un produit pétrolier, il ne peut pas être stocké ou transféré via un pipeline [26].

1.4.7. Point de trouble (Cloud point)

Le point de trouble (CP) d'un produit pétrolier est la température à laquelle les particules de paraffine solide maintenue en solution, commencent à se solidifier et à se séparer en minuscules cristaux, par un refroidissement progressif dans des conditions standards. À cette température, l'huile devient trouble et les premières particules de cristaux de cire sont observées (formées). La procédure standard pour mesurer le point de trouble est décrite dans la méthode d'essai ASTM D2500. Le point de trouble est l'une des caractéristiques importantes des produits pétroliers dans des conditions de basse température. Lorsque la température diminue en dessous du point de

trouble, la formation des cristaux de cire est accélérée. Par conséquent, produits à bas point de trouble sont souhaitables dans des conditions de basse température. Les cristaux de cire peuvent boucher les conduites et les filtres du circuit de carburant, ce qui pourrait entraîner le blocage des avions et des moteurs diesel par temps froid. Étant donné que le point de trouble est supérieur au point d'écoulement, on peut considérer que la connaissance du point de trouble est plus importante que le point d'écoulement pour établir des spécifications de fioul distillat pour une utilisation par temps froid [26].

1.4.8. Point de congélation (freezing point)

Le point de congélation (FRP) d'une fraction pétrolière est la température à laquelle les cristaux solides formes lors du refroidissement disparaissent lorsque la température augmente. Elle est déterminée expérimentalement par la procédure ASTM D2386. Le point de congélation est l'une des caractéristiques importantes à basse température des carburéacteurs carburants d'aviation) [26].

1.4.9. Indice de cétane (Cetane index)

L'indice de cétane (CI) est exprimé par un nombre égal au pourcentage volumique de cétane dans un mélange de cétane (n-hexadécane) et α -methylnaphtalene ayant la même qualité d'inflammation que l'échantillon de la fraction pétrolière [26].

1.4.10. La tension de vapeur reid

Le test de la tension de vapeur Reid (TVR) ou (PVR, pour "Reid Vapor Pressure") est une méthode utilisée pour mesurer la pression de vapeur d'un carburant, généralement de l'essence, à une température spécifique de 37,8°C (100°F). La tension de vapeur fait référence à la pression exercée par les molécules de vapeur d'un liquide lorsqu'il est en équilibre avec sa phase liquide à une température donnée [27]. Ce test calculer le pourcentage des fractions légers contiens dans essence, qui assure le démarrage facile des moteurs au froid, il est mesurer par apparait automatique de TVR en Kpas qui affiche la valeur sec (est le % des fractions léger) et la valeur total (est le % des fractions léger avec % de O2 et N2 contient dans l'air) [22].

1.4.11. La teneur en gomme

Le test de teneur en gomme mesure la quantité de résidus solides qui se forment dans l'essence lorsqu'elle est chauffée dans des conditions spécifiques. Ces résidus sont appelés "gommages" et se forment généralement lors de la combustion ou de l'évaporation du carburant dans les moteurs. La formation de gomme peut entraîner des dépôts dans les systèmes d'alimentation en carburant

et les chambres de combustion, ce qui peut nuire à la performance du moteur, à la consommation de carburant et à la longévité du moteur. Ce test est généralement effectué selon la norme ASTM D381, intitulée "Test Methode for Gum Content in Fuels by Jet Evaporation". Ce test consiste à évaporer une quantité mesurée de carburant sous des conditions de chaleur et de pression spécifiques, puis à peser la quantité de gomme restante après évaporation. Ce résidu est exprimé en milligrammes de gomme par 100 millilitres de carburant. Une teneur élevée en gomme peut entraîner des dépôts dans les injecteurs, les soupapes et les chambres de combustion, réduisant ainsi l'efficacité du moteur et augmentant les émissions [28].

1.4.12. Indice d'octane méthode recherche

L'indice d'octane (ou numéro d'octane RON) est une mesure de la capacité d'un carburant, comme l'essence, à résister à l'auto-allumage ou à la détonation prématurée dans le moteur. Cette détonation non contrôlée peut entraîner des bruits métalliques dans le moteur, une perte de performance et des dommages à long terme. Un indice d'octane élevé indique une meilleure résistance à la détonation.

L'indice d'octane est donc essentiel pour optimiser la performance des moteurs à combustion interne. Plus l'indice RON est élevé, plus l'essence peut être comprimée sans provoquer de détonation [29].

1.4.13. La corrosion à la lame de cuivre

La corrosion à la lame de cuivre est utilisée comme une éprouve pour déterminer l'apparition des composés soufrés en utilisant le cuivre étant particulièrement sensible à la présence de ces composés corrosifs. Ce test consiste à immerger une lame de cuivre dans un environnement corrosif (souvent une solution aqueuse, parfois avec des acides ou d'autres agents corrosifs) pendant une période déterminée. Le but est d'observer les effets de la corrosion sur la lame, tels que l'apparition de rouille, de décoloration, ou de dégradation du matériau [30].

1.5 La modélisation

1.5.1. Définition

La modélisation est un processus consistant à créer un modèle ou une représentation simplifiée d'un système, d'un phénomène ou d'un processus réel, par l'utilisation des logiciels statistiques afin de mieux comprendre son comportement, de prédire ses évolutions ou d'analyser des situations complexes. Le modèle représente les éléments clés du système réel, tout en omettant certains détails pour se concentrer sur les aspects essentiels [31]. La modélisation peut se faire sous différentes formes :

- **Mathématique** : À travers des équations ou des formules,
- **Physique** : Par la construction d'un prototype ou d'un modèle réduit,
- **Conceptuelle** : Par des diagrammes ou des représentations abstraites (par exemple, un diagramme de flux ou un diagramme de processus),
- **Informatique** : En créant des simulations ou des algorithmes qui imitent le comportement du système [31].

1.5.2. Objectif de la modélisation

La modélisation permet de réaliser des analyses approfondies et d'obtenir des résultats fiables et précis pour des systèmes complexes. Elle facilite le calcul des coefficients de variabilité et la création de corrélations entre les variables, ce qui est essentiel pour comprendre et prédire les comportements des systèmes. En intégrant des techniques statistiques avancées et des capacités de simulation, ces logiciels permettent de prendre des décisions basées sur des données concrètes, augmentant ainsi l'efficacité et la précision des modèles mathématiques et des stratégies de gestion [32].

1.6 Les corrélations

1.6.1. Définition

La corrélation est une mesure statistique qui permet d'évaluer la force et la direction de la relation entre deux variables. En d'autres termes, elle indique dans quelle mesure deux variables sont liées entre elles. Si deux variables sont fortement corrélées, cela signifie qu'une variation de l'une entraîne généralement une variation de l'autre, que ce soit dans la même direction (corrélation positive) ou dans une direction opposée (corrélation négative). Et aussi défini comme équation mathématique statistique qui interprète un phénomène physique ou chimique et qui peut servir comme un modèle, prêt pour l'application [33].

1.6.2. L'importance de la corrélation

La corrélation est un outil statistique essentiel dans de nombreux domaines, car elle permet de comprendre la relation entre différentes variables. Elle aide à identifier les tendances et les modèles cachés dans les données, facilitant ainsi la prédiction des évolutions futures. Par exemple, dans les secteurs du marketing et de la finance, la corrélation permet d'optimiser les ressources en mettant en évidence les facteurs les plus influents sur les résultats. Elle est également cruciale pour la prise de décisions éclairées, en fournissant des preuves solides sur les relations entre les variables, ce qui permet d'agir de manière plus ciblée. En science et en recherche, la corrélation est utilisée pour tester des hypothèses et explorer des phénomènes

complexes, contribuant à des découvertes importantes. De plus, elle joue un rôle clé dans la modélisation statistique, en aidant à prévoir des résultats et à évaluer les risques. Cependant, il est important de rappeler que la corrélation ne signifie pas causalité, elle indique seulement qu'il existe une relation observée entre les variables, sans prouver qu'une variable influence directement l'autre [34].

1.6.3. Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination note R^2 , est une mesure statistique utilisée en modélisation pour évaluer la qualité d'ajustement d'un modèle aux données expérimentales.

Ce coefficient indique la proportion de la variance de la variable dépendante (la variable que l'on cherche à expliquer) qui est expliquée par la ou les variables indépendantes (les variables explicatives de modèle). Plus R^2 est proche de 1, plus le modèle explique bien les variations des données observées et que la régression est idéale [35].

1.6.4. L'erreur absolue et erreur relative

Toute mesure effectuée en physique, comme dans d'autres sciences expérimentales, est toujours entachée d'incertitudes. En effet, il est impossible d'obtenir une mesure parfaitement précise, car divers facteurs peuvent influencer le résultat, comme les limitations des instruments, les erreurs humaines, ou même les conditions environnementales. C'est pourquoi il est essentiel de quantifier ces erreurs pour évaluer la précision des mesures [36].

A. Erreur absolue moyenne

L'erreur absolue est définie comme la différence entre la valeur mesurée et la valeur exacte ou valeur de référence d'une grandeur physique. Elle est donnée par la formule :

$$EAmoy = \frac{\sum(|T_{exp} - T_{cal}|)}{Nb} \dots\dots\dots (3)$$

Avec $EAmoy$: Erreur absolue moyenne

T_{exp} : La valeur expérimentale ou mesurée de température,

T_{cal} : La valeur estimée ou prédite par un modèle mathématique de température,

Nb : Nombre de points expérimentaux.

B. Erreur relative moyenne

L'erreur relative moyenne est une mesure statistique en % qui permet d'évaluer l'erreur moyenne d'un ensemble de mesures par rapport à la valeur expérimentale d'une grandeur physique. Elle exprime l'écart moyen entre les valeurs mesurées et la valeur expérimentale sous forme relative, c'est-à-dire en pourcentage de la valeur expérimentale. Cette mesure est souvent utilisée pour obtenir une idée de la précision d'une série de mesures [36]. L'erreur calculée par :

$$\text{ERmoy}(\%) = \sum \left(\frac{|T_{\text{exp}} - T_{\text{cal}}|}{T_{\text{exp}}} \times 100 \right) \div \text{Nb} \dots \dots \dots (4)$$

Avec ERmoy (%) : Erreur relative moyenne en pourcentage.

L'erreur relative est donc sans dimension et toujours positive.

Chapitre 2

Matériel et méthodes

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le lieu de stage et l'ensemble des matériels et méthodes utilisés dans notre travail pour identifier les caractéristiques physiques du carburant gazole.

2.1 Généralités sur le centre des carburants du CHIFFA (NAFTAL)

2.1.1. Historique du NAFTAL

NAFTAL est une société algérienne filiale à 100% de SONATRACH. Elle est chargée de la distribution des produits pétroliers sur le marché algérien. Par transfert de monopole et des biens personnels détenus ou gérés par SONATRACH (6 avril 1983 par le décret N° 80/101).

- Le 01^{er} janvier 1982, elle est chargée de l'industrie de raffinage des hydrocarbures liquides,
- Le 05 février 1983, elle procède à la modification de la dénomination d'E.R.D.P en NAFTAL en date du 25 août 1987, promulgation du décret N° 87/190 portant création par transfert de l'activité raffinage NAFTAL est désormais chargée de la commercialisation et de la distribution des produits pétroliers,
- Le 18 avril 1998, elle a changé de statut avec la transformation de NAFTAL en société par actions de capital social de 6,65 milliards de dinars, en 2010 NAFTAL a un volume total de 14,1 millions de tonnes de produits pétroliers [22].

2.1.2. Unité district carburant CHIFFA

C'est un centre qui a été construit en 1942 par l'armée française, il a été intégré à la SONATRACH. De 1982 à 1984, l'unité a subi une rénovation complète, restauration et équipement en avril 1984[22].

2.1.3. Composants de l'unité

- Dix bacs de stockage d'une capacité de stockage de 33000 m³ dont deux bacs de 10000 m³, quatre bacs de 2000 m³ et trois bacs de 1000 m³,
- Quatre postes de chargement,
- Deux magasins de PDR,
- Réseau d'eau avec un bac de stockage de 3000 m³,
- Réseau anti-incendie,
- Camion anti-incendie,
- Bloc administratif,
- Laboratoire de contrôle de qualité,
- Installation composant l'unité,

- Magasin : espace de stockage des échantillons, contrôlés par la salle de contrôle [22].

2.1.4. Laboratoire

Le rôle de laboratoire est de faire des analyses normalisées pour carburants terre (gasoil et essence sans plomb), afin de contrôler la qualité et la conformité des produits stockés au centre. Donc des analyses sont effectuées pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques des carburants tels que la densité à 15°C, point éclair, la distillation ASTM. La prise d'échantillon à partir du bac est faite à l'aide d'une bouteille bonbonne en bronze sur trois niveaux : Haut, Milieu, Bas, avec relevé de la température. «Les échantillons sont étiquetés correctement et conservés».

2.1.5. Transport et Stockage des Hydrocarbures

A. Source de ravitaillement

L'approvisionnement en produits pétroliers s'effectue par pipeline 10 pouces et de 55 km. Il s'agit d'un transfert de produits carburants depuis la raffinerie vers les bacs de stockage à travers les canalisations qui sont complètement enterrées jusqu'aux réservoirs de stockage. La seule source de ravitaillement des centres carburants sont les raffineries (Alger-Skikda Arzew-Hassi Messaoud-Adrar) [37]. La source de ravitaillement du centre carburant CHIFFA est la raffinerie d'Alger Berraki (SidiArcine).

B. Le parc de stockage

Le parc de stockage. C'est une zone généralement de grande surface où se situe un ensemble de bacs de stockage. Ils peuvent être de différentes ou de même capacité. Ils sont bien sûr connectés une canalisation d'entrée et une autre de sortie et éventuellement connectés entre eux [22].

Les différents bacs existent dans le centre des carburants CHIFFA sont représentés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Capacités des bacs [22].

Bac	Volume (m³)	Contenu
R100	10000	Gasoil
R110	1000	Gasoil
R120	10000	Gasoil
R130	1000	Gasoil
R140	2000	Essence sans plomb
R150	2000	Essence sans plomb
R160	2000	Essence sans plomb
R170	1000	Essence sans plomb
R180	2000	Essence sans plomb
R190	2000	Essence sans plomb

2.2 Méthodes de mesure des propriétés physiques du gasoil

2.2.1. Condition de réception d'un échantillon

A. Échantillonnage

Le produit doit être bien échantillonné et bien identifié avant l'analyse au laboratoire, les échantillons sont prélevés à différents niveaux HMB (haut, milieu, bas). L'échantillon rempli dans des bouteilles en plastique.



Figure 2.1 : Échantillons gasoil et essence sans plomb.

B. Étiquetage

L'échantillon doit être mis dans un récipient étiqueté où est mentionné :

- La nature du produit : essence sans plomb ou bien gasoil,
- Date et heure de prélèvement,
- Numéro de bac,
- Opérateur.

Le modèle de l'étiquette est représenté sur la figure suivant :

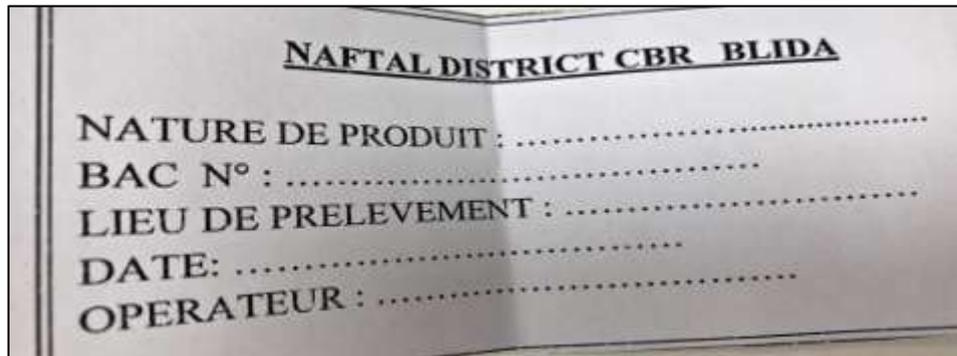


Figure 2.2 : Étiquette d'échantillon.

2.2.2. Aspect visuel

A. Principe

Environ 900ml de fuel est versée dans une éprouvette de 1L, l'échantillon est agité de manière à former un tourbillon. La présence des sédiments et des gouttelettes d'eau est alors examinée.

B. Appareillage

L'appareillage est composé d'une éprouvette de 1L d'un diamètre de 100mm.

C. Mode opératoire

- Verser l'échantillon dans une éprouvette de 1 litre,
- Examiner visuellement dans un endroit bien éclairé, la clarté, la limpidité, la couleur, la présence des bulles d'air et la présence des gouttelettes d'eau dans l'échantillon. Agiter circulairement afin de produire un tourbillon et examiner la présence des particules solides, ces dernières se déplacent au centre du tourbillon.

2.2.3. Densité à 15°C

A. Principe

Après avoir l'aspect visuel du produit, il convient de déterminer la densité à 15°C du produit mesuré. Celle-ci est déterminée à l'aide de la table ASTM 53 B à partir de la densité lue et de la température de l'échantillon. Suivant la norme NA 417 équivalente à ASTM D 1298 : La

présente norme internationale prescrit une méthode pour la détermination de la densité à 15°C des produits pétroliers liquides à l'aide d'un aréomètre.

B. Matériels

- **Éprouvette de 500ml** : avec un diamètre intérieur au moins supérieur de 25mm au diamètre extérieur de l'aéromètre et une hauteur telle que l'aéromètre puisse flotter dans l'échantillon.
- **Thermomètre** : utiliser pour mesurer la température de l'échantillon dans le laboratoire (référence de la température (IP39C/IP64C/ASTM12C)).
- **Aréomètre** : un aréomètre de Fahrenheit se présente comme une ampoule de verre qui est représentée sur la figure suivant :



Figure 2.3: Aréomètre.

- Pour le Gasoil un aréomètre de : 0,800 – 0,850,
- Pour l'essence un aréomètre de : 0,700 – 0,750.

C. Méthode de calcul

- Table ASTM 53B

La table 53B permet de déterminer la densité à 15°C, directement à partir de la densité observée à la température du produit mesuré, à l'aide d'un densimètre pour produits pétroliers (étalonné à 15°C). La table 53B (Voir Annexe A) s'applique exclusivement aux produits pétroliers raffinés [38].

D. Mode opératoire

- Assurer que l'échantillon est fluide lors de la prise de l'essai (sa température ni trop élevée pour ne pas perdre tous les légers ni trop basse pour ne pas avoir la formation des solides),
- Éviter toutes les bulles d'air lors du transfert de l'échantillon vers l'éprouvette,

- L'éprouvette et le thermomètre sont à environ 5°C de la température d'essai. Placer l'éprouvette contenant la prise en position verticale dans un endroit à l'abri des courants d'air, et où la température du milieu ambiant ne variera pas de plus de 2°C pendant la durée nécessaire pour réaliser l'essai,
- Introduire un thermomètre approprié et agiter de manière uniforme l'échantillon (horizontalement et verticalement) ensuite mesurer avec une précision de 0.1°C près de la température d'essais et cela pour avoir une masse volumique et une température uniforme durant l'essai,
- Retirer le thermomètre du liquide après enregistrement de la température d'essai,
- Introduire l'aréomètre au sein du liquide est laissé se déposer lentement,
- Noter la valeur obtenue sur l'aréomètre au point de l'échelle où l'échantillon apparait en dessus de la surface principale de liquide, déterminer ce point en se plaçant au-dessus de la surface plane de liquide,
- On note la température et la densité du produit analysé, Puis on calcul la densité à 15°C par la formule (1).

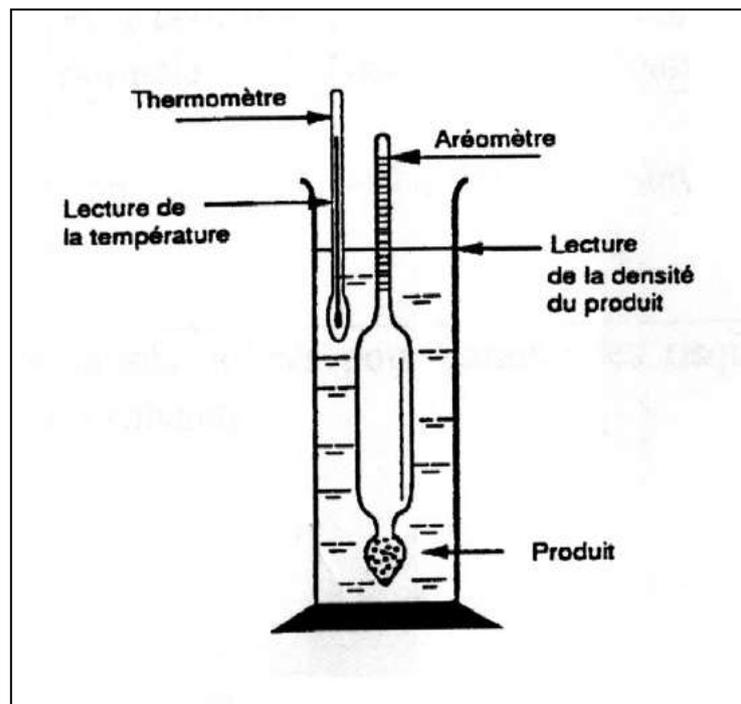


Figure 2.4: Mesure de la densité.

2.2.4. Point éclair (vase fermé)

A. Principe

Le point éclair est la température la plus basse à laquelle les vapeurs d'un liquide (ici le gazole) s'enflamment momentanément au contact d'une source d'allumage dans des conditions définies. L'analyse est effectuée selon la norme ASTM D93 utilisée pour déterminer le point d'éclair afin d'éviter une explosion pendant le stockage ou le transport du produit [39].

B. Appareillage

Ce test est effectué par l'appareil automatique de point éclair D93 (vase fermé), qui est représenté dans la figure 2.5. Il est introduit par les équipements suivants :

- Tête multifonction motorisée automatique permet la connexion des capteurs (température, détecteur de flash, agitateur, allumeur),
- Écran tactile couleur pour le contrôle, la programmation et l'affichage des résultats de mesure,
- Bouton rotatif sert à naviguer dans les menus et à saisir les paramètres de test,
- Allumeur électrique encapsulé (Source d'allumage pour le test),
- Chambre de mesure avec couvercle fermé Où l'échantillon est placé pour le test du point d'éclair en enceinte fermée (méthode Pensky-Martens),
- Capteur de température pour la mesure précise de la température de l'échantillon.



Figure 2.5: Appareil de mesure de point éclair (vase fermé).

C. Mode opératoire

- Nettoyer et sécher soigneusement la coupelle de l'appareil,
- Verser un volume approprié d'échantillon de gazole jusqu'au le trait de jauge de la coupelle,
- Installer le couvercle équipé de l'agitateur, du thermomètre et de l'allumeur,
- Sélectionner la méthode adaptée (procédure pour le gazole/distillats pétroliers),
- Régler la vitesse de chauffage (typiquement 5 à 6°C/min),
- Régler la vitesse d'agitation (90 à 120 tr/min),
- Programmer l'intervalle d'application de la source d'allumage (généralement tous les 1°C ou 2°C),
- Démarrer le test via l'interface tactile,
- L'appareil chauffe l'échantillon à la vitesse programmée tout en l'agitant,
- À chaque intervalle défini, l'allumeur (électrique ou flamme) est brièvement introduit au-dessus de la surface du liquide,
- L'agitateur s'arrête brièvement pendant l'application de la source d'allumage, puis reprend,
- Le système détecte automatiquement l'apparition d'un flash (inflammation brève des vapeurs),
- Dès qu'un flash est détecté, la température correspondante est enregistrée : c'est le point d'éclair du gazole,
- Laisser refroidir la coupelle avant de la nettoyer [39].

2.2.5. Distillation ASTM

A. Principe

Est une méthode de séparation entre les fractions lourdes et légères, basée sur la différence de la température d'ébullition et réalisée selon la norme ASTM D86.

B. Appareillage

L'appareillage est composé de :

- Ballon de distillation de 125ml,
- Éprouvette graduée de 100ml,
- Thermomètre ASTM (8C pour gasoil de 0 à 400°C, 7C pour essence de 0 à 300°C),
- Support du ballon,
- Éprouvette pour le résidu 5ml ou 10ml,
- Appareil de distillation ASTM.

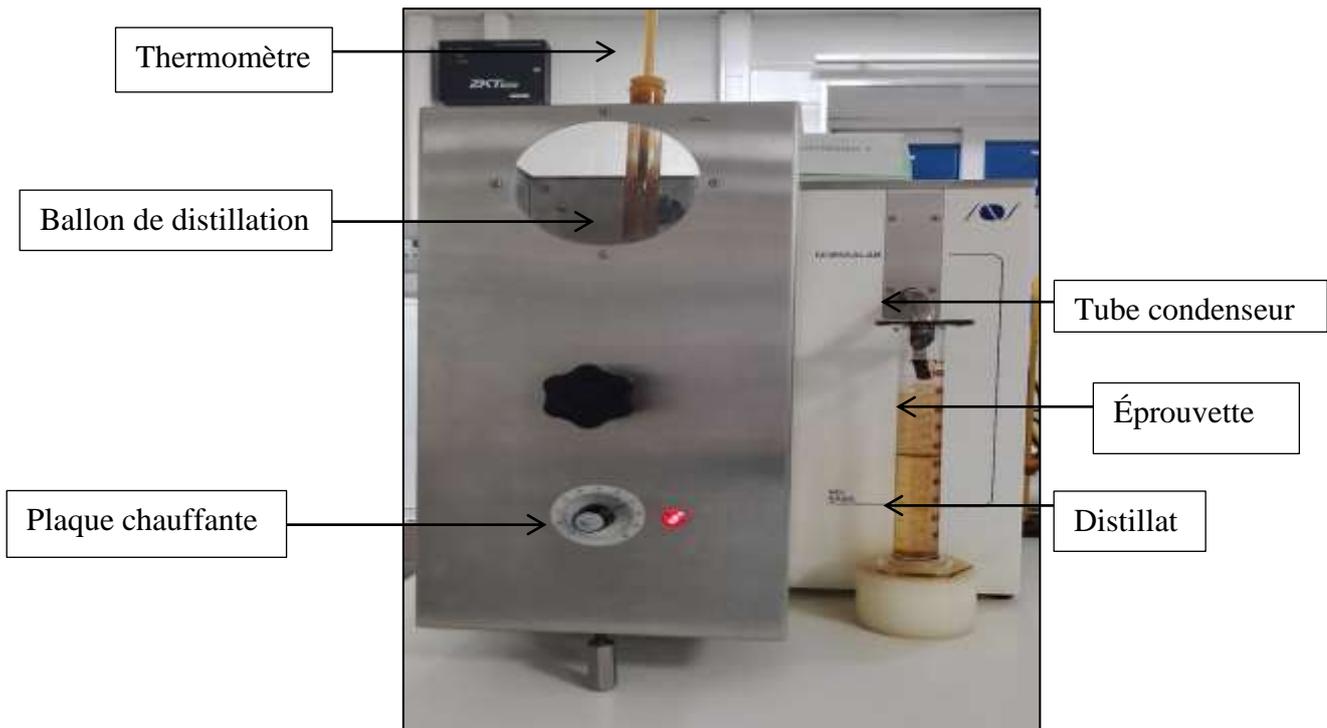


Figure 2.6: Appareil de distillation ASTM.

C. Mode opératoire

Pour réaliser la distillation ASTM du gasoil, nous avons procédé de la manière suivante [22] :

- Préparer 100ml de l'échantillon et placer dans le distillateur, introduit par un thermomètre 8C,
- Régler le chauffage afin que le temps s'écoulant entre le début de la chauffe et l'obtention de la première goutte n'excède pas les limites,
- Ramener l'éprouvette à ce qu'elle fasse contact avec la pointe du tube condenseur,
- Observer et noter le point initial de distillation à la première goutte,
- Régler le chauffage de façon à ce que le temps qui s'écoule entre le point initial et 5% ou 10% volume récupérés, reste dans les limites avec un débit de distillation de 4 à 5 ml/min,
- Quand rien ne nous est spécifié : relever le point initial, 10%, 50%, 95% et point final (pour les essences) et point initial, 10%, 50%, et 65%, 90%, point final (pour le gasoil), comme on peut noter les points chaque 5%,
- Fin de la distillation, noter le volume recueilli et le reste correspond aux résidus et pertes,
- Après le refroidissement du ballon, mesurer le contenu de celui-ci à l'aide d'une éprouvette de 5ml,
- Les pertes sont calculées par la formule (2),
- En fin d'analyse, on compare les points obtenus avec ceux de la norme indiquée au tableau 1.1.

2.2.6. Viscosité cinématique

A. Le principe

C'est le rapport entre la viscosité dynamique (résistance interne à l'écoulement) et la masse volumique du fluide. Le principe de ce test repose sur la mesure du temps d'écoulement du fluide sous l'effet de la gravité à travers un tube capillaire calibré sans force externe appliquée autre que son propre poids selon la norme D445.

B. Appareillage

- Viscosimètre à capillaire en verre série 0C No. H22,
- Support de viscosimètre,
- La poire pour l'aspiration de produit,
- Bain thermostaté,
- Thermomètre,
- Chronomètre de précision.

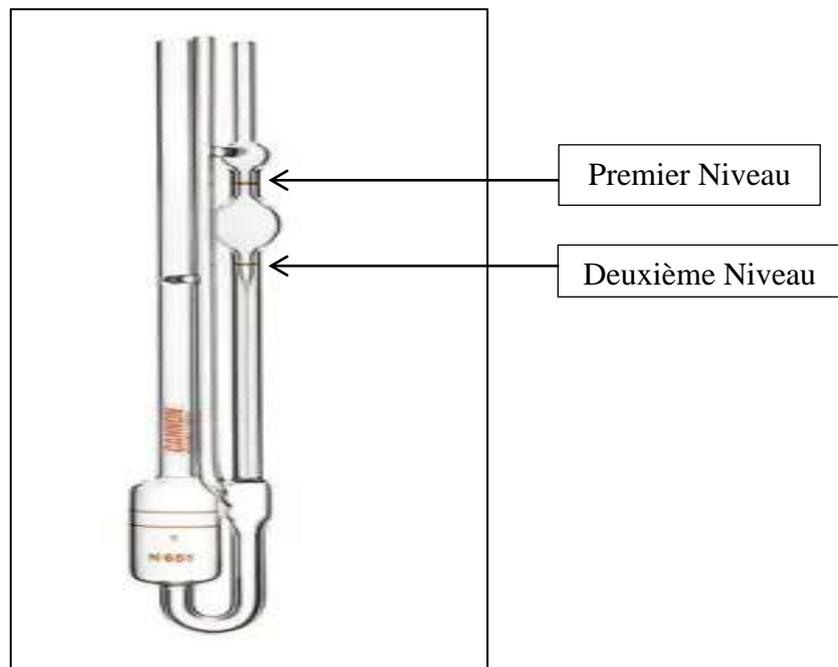


Figure 2.7: Viscosimètre à capillaire.

- Le tube de capillaire est caractérisé par un constant (ou facteur de correction) selon son diamètre intérieur, c'est le principe pour le choix de viscosimètre. Par exemple, on choisit un tube de capillaire avec un diamètre intérieur plus large pour l'huile par rapport au gasoil parce qu'il est plus lourd.



Figure 2.8: Bain thermostaté de viscosité à 40°C.

C. Mode opératoire

Pour mesurer la viscosité cinématique de gazole, nous avons procédé de la manière suivante [40] :

- Mettre en marche le bain thermostat et le laisser se stabiliser à la température affichée (40°C),
- Choisir le viscosimètre adéquat pour le test (voir annexe B),
- Charger le viscosimètre et le placer dans le bain,
- Maintenir le viscosimètre chargé dans le bain, suffisamment longtemps pour qu'il atteigne la température d'essai (30 minutes),
- Ajuster le volume pour le faire coïncider avec les traits de remplissage,
- Laisser l'échantillon s'écouler librement, mesurer en seconde à 0,1s près le temps qu'il faut au ménisque pour passer du premier niveau de chronométrage au deuxième,
- Noter le résultat,
- Calculer la viscosité cinématique moyenne, v en (mm^2/s) à partir de la formule suivant :

$$v = C \times t \dots \dots \dots (5)$$

Avec v : Est la viscosité cinématique, en millimètres carrés par seconde,

C : Est la constante d'étalonnage du viscosimètre série 0C No. H22 ($C = 0,003409 \text{ mm}^2/\text{s}^2$),

t : Est le temps d'écoulement, en secondes.

2.2.7. Le point d'écoulement

A. Principe

Le principe du test du point d'écoulement pour le gasoil (gazole) consiste à déterminer la température minimale à laquelle le carburant peut encore s'écouler spontanément, sans agitation, lorsqu'il est refroidi. Cette température caractérise la fluidité du gasoil à basse température, ce qui est crucial pour assurer son pompage et son utilisation dans des conditions froides.

B. Appareillages

- Tube à essai cylindrique en verre transparent,
- Thermomètre ASTM 5C,
- Bain de refroidissement.

C. Mode opératoire

Le point d'écoulement et congélation sont mesurés selon les normes ASTM D97 et D2386 par les étapes suivantes [41] :

- Verser l'échantillon dans le tube à essai (cylindrique en verre transparent à fond plat) jusqu'au trait de jauge,
- Fermer le tube avec son bouchon (en liège, adapté au tube à essai et percer au centre) équipé du thermomètre (ASTM 5C, 6C ou 61C) approprié en fonction du point d'écoulement estimé,
- Introduire le tube à essai dans la jaquette (en métal, étanche, cylindrique et à fond plat),
- Retirer le tube à essai tous les 3 °C voire (annexe C),
- Quand l'échantillon ne coule plus, maintenir le tube en position horizontal pendant 5 secondes et si l'échantillon ne présente pas des signes d'écoulement après les 5 secondes noter la valeur observée de la température, qui représente la température de point de congélation,
- Le point d'écoulement, c'est la température observée plus 3°C.



Figure 2.9: Bain de refroidissement.



Figure 2.10: L'échantillon à la température de congélation.

2.2.8. Indice de cétane

L'indice de cétane est une valeur qui caractérise la capacité d'un carburant diesel à s'enflammer spontanément sous compression dans un moteur diesel. Plus l'indice est élevé, plus le carburant s'enflamme rapidement après l'injection, ce qui améliore les performances du moteur et réduit les émissions.

A. Méthode de calcul

- Par logiciel

La valeur d'indice de cétane déterminée par logiciel, on introduit les valeurs de température d'ébullition T_{10} , T_{50} , T_{90} (d'après les résultats de distillation ASTM) et de la densité à 15°C pour donner les résultats d'indice.

Ce logiciel est une application pour la table ASTM 53B [38].

- Par corrélation de l'ASTM

Cette méthode fait l'objet de la norme ASTM D976. Elle donne la valeur de CI en fonction de la densité spécifique d_s et la température $T_{50}^{\circ}\text{C}$ (température correspondant à 50% évapores de la distillation ASTM D86) [26] :

$$\text{CI} = B - 0,554T_{50} + 97,803(\log T_{50})^2 \dots \dots \dots (6)$$

$$B = 454,74 - 1641,416d_s + 774d_s^2 \dots \dots \dots (7)$$

Avec d_s : Densité spécifique (à 15°C),

T_{50} : Température correspondant à 50% de volume distillé en $^{\circ}\text{C}$,

CI : Cetane index,

B: Constante de corrélation.

2.3 Les paramètres ambiants de laboratoire

2.3.1. Définition

Les paramètres ambiants de laboratoire désignent l'ensemble des conditions environnementales physiques et chimiques contrôlées et surveillées dans un laboratoire afin de garantir la fiabilité, la reproductibilité et la validité des résultats d'analyse ou d'essai. Ces paramètres peuvent influencer directement les équipements, les réactifs, les échantillons et les mesures réalisées. Ils incluent notamment :

- Température ambiante : température de l'air dans le laboratoire, qui doit être stable et adaptée aux exigences des analyses et de la conservation des réactifs,
- Humidité relative : taux d'humidité de l'air, important pour éviter la dégradation des échantillons et la corrosion des équipements,
- Pression atmosphérique : notamment la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du laboratoire, qui peut être contrôlée pour éviter les contaminations (pression positive ou négative selon les besoins),
- Propreté de l'air : contrôle des particules en suspension (poussières, micro-organismes), essentiel dans les laboratoires sensibles (ISO classes de salles propres).

2.3.2. Mesure des paramètres ambiants de laboratoire

On mesure les paramètres ambiants de laboratoire température ambiante (T_{amb}), pression atmosphérique (P_{atm}) et l'humidité relative (H_r) à l'aide d'un appareil comme un thermo-hygromètre ou un hygromètre équipé d'un capteur de pression. Ces instruments combinés permettent une mesure simultanée et en temps réel des trois paramètres, ce qui est essentiel pour évaluer précisément les conditions ambiantes.

Le thermo-hygromètre doit être placé dans une zone représentative de l'environnement à mesurer, à l'abri des sources directes de chaleur, de courant d'air ou d'humidité localisée pour éviter les biais [42].



Figure 2.11: Thermo-hygromètre.

2.3.3. Effets des paramètres ambiants sur les résultats des tests de carburant

- La température ambiante affecte la stabilité chimique du gazole. Des températures élevées accélèrent la dégradation du carburant, notamment par hydrolyse, ce qui peut modifier ses propriétés physico-chimiques et fausser les résultats des tests. Elle influence aussi la phase physique du carburant : à basse température, le gazole peut se figer (cristallisation des paraffines), ce qui impacte la mesure de la viscosité, du point de trouble ou du point d'écoulement,
- Lors des tests en laboratoire, la pression peut aussi affecter les mesures de volatilité et de distillation du carburant, car elle modifie les points d'ébullition des composants,
- L'humidité de l'air est un facteur critique car elle favorise la condensation d'eau dans les réservoirs et le carburant. La présence d'eau dans le gazole dégrade sa qualité, provoque la croissance microbienne et peut fausser les résultats des tests (corrosion, variation de densité, formation de sédiments).
- Une humidité élevée peut aussi influencer la stabilité à l'oxydation du carburant et modifier ses propriétés rhéologiques [42].

2.4. Étalonnage des équipements

Dans le laboratoire de contrôle qualité des carburants, l'étalonnage des équipements est une étape cruciale et non négociable pour garantir la fiabilité et l'exactitude des résultats d'analyse. Cette procédure consiste à comparer les mesures d'un instrument avec celles d'un étalon de référence traçable qui s'appelle les MRC (matériaux de référence certifiés, sont des matériaux avec une incertitude de mesure associée et une traçabilité à une unité de système international). La certification est réalisée par un organisme de métrologie ou un producteur de MRC accrédité, la durée d'étalonnages est de 1 an pour les instruments et 2 ans pour les bains [22].

Pendant ces périodes d'étalonnage, une attention particulière est portée à l'évaluation et au calcul des incertitudes des mesures. Il est impératif de quantifier l'intervalle dans lequel la vraie valeur est susceptible de se trouver, compte tenu de toutes les sources potentielles d'erreur [22].

Ce processus rigoureux assure non seulement la conformité aux exigences réglementaires et normatives, mais renforce également la confiance dans les données analytiques, permettant ainsi de prendre des décisions éclairées concernant la qualité et la conformité des carburants.

2.5. La modélisation par logiciel STATISTICA

STATISTICA est un logiciel statistique efficace pour analyser et prévoir les propriétés et la consommation du gazole. Il utilise principalement la régression multiple ou l'analyse de corrélation pour établir des relations entre variables, permettant d'optimiser les formulations et de prévoir les comportements à partir des données sans recourir systématiquement à des expériences coûteuses. Cette méthode est particulièrement adaptée aux grands phénomènes économiques et industriels, mais nécessite une validation rigoureuse et un bon choix des variables pour être fiable [43].

Chapitre 3

Résultats et discussion

Introduction

Ce chapitre vise à présenter les résultats expérimentaux des analyses faites sur les caractéristiques physiques du gazole (on a traité 20 échantillons de gazole) afin de vérifier leur conformité, et modéliser les résultats obtenus par distillation ASTM par logiciel STATISTICA pour créer des modèles mathématiques et établir de nouvelles méthodes de caractérisation.

3.1 Résultats des analyses physiques de gazole

3.1.1. L'aspect visuel

Les résultats du test doivent être reportés parmi les cas suivants :

- La couleur : La couleur normale de gazole est généralement claire et limpide, allant d'un jaune pâle à un brun clair ambre,
- Limpidité : Le gazole doit être transparent et ne pas présenter de trouble,
- Présence des particules : on cherche l'absence des particules solides en suspension, de sédiments au fond du récipient ou de dépôts sur les parois,
- Présence d'eau : On vérifie l'absence de gouttelettes d'eau en suspension (aspect laiteux ou trouble) ou d'une phase aqueuse distincte au fond du récipient,
- Les échantillons analysés sont clairs et limpides, exempts de poussière, de nuages, de gouttelettes d'eau et de particules.

3.1.2. La densité (ASTM D1298)

La densité de gazole est un paramètre de qualité important car elle influence la performance du moteur, l'émission de polluants et la consommation de carburant. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant qui représente les valeurs des T, d et ds qui a été calculée par la formule (1). D'après le tableau 3.1, on constate que les densités à 15°C des 20 échantillons obtenus se situent toutes dans l'intervalle [0,810 - 0,860] Ces résultats sont conformes à la norme.

Tableau 3.1: Densités des échantillons de gazole.

Échantillon	T (°C)	d	ds
E1	15,5	0,8410	0,8441
E2	16,4	0,8355	0,8365
E3	18,8	0,8330	0,8385
E4	14,5	0,8320	0,8317
E5	17,9	0,8350	0,8370
E6	21,8	0,8330	0,8376
E7	15,3	0,8340	0,8342
E8	19,9	0,8335	0,8367
E9	16,9	0,8365	0,8377
E10	21,1	0,8340	0,8380
E11	17,4	0,8370	0,8387
E12	17,3	0,8365	0,8381
E13	20,4	0,8345	0,8382
E14	16,1	0,8380	0,8388
E15	16,7	0,8385	0,8396
E16	16,3	0,8375	0,8383
E17	18,3	0,8365	0,8388
E18	18,3	0,8360	0,8383
E19	17,7	0,8385	0,8403
E20	16,4	0,8395	0,8404

Exemple de calcul pour E10 :

Avec $T = 21,1^{\circ}\text{C}$, $d = 0,8340$, $a = 0,00067$

$$ds = 0,8340 + 0,00067(21,1 - 15)$$

$$ds = 0,8380$$

Une densité trop faible indique la présence de composants légers, une adultération avec des produits moins denses (comme du kérosène), ou un problème de raffinage. Cela peut entraîner une diminution de la puissance du moteur et une augmentation de la consommation de carburant.

Une densité trop élevée indique la présence de composants lourds ou une contamination. Cela peut affecter la combustion, entraîner des dépôts dans le moteur et potentiellement augmenter les émissions de particules [44].

L'augmentation de la température du gazole provoque une dilatation thermique, qui se traduit par une augmentation de son volume en raison de l'accroissement de l'énergie cinétique des molécules constituant le gazole. Étant donné que la masse de l'échantillon reste constante, cette augmentation de volume entraîne inévitablement une diminution de sa densité. C'est pourquoi il est crucial de prendre la température lors de la mesure et de la spécification de la densité des produits pétroliers, d'où la nécessité de la correction à une température de référence standard (15°C) [44].

3.1.3. Le point éclair (ASTM D93A)

Le point éclair est un indicateur direct du risque d'incendie associé à un liquide. Plus le point éclair est bas, plus le liquide peut former des vapeurs inflammables à des températures ambiantes basses, et augmente le risque accidentel en présence d'une source de chaleur. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 3.2: Point éclair des 20 échantillons.

Échantillon	FP (°C)	Échantillon	FP (°C)
E1	74	E11	80
E2	81	E12	77
E3	79	E13	79
E4	73	E14	80
E5	78	E15	83
E6	80	E16	78
E7	72	E17	80
E8	81	E18	80
E9	77	E19	76
E10	81	E20	77

D'après l'analyse des résultats obtenus par le tableau 3.2 des points éclair pour les 20 échantillons, on constate que toutes les valeurs sont supérieures à 70°C et varient entre [72-83°C]. Cela indique que le carburant testé est conforme aux exigences de sécurité [FP > 55°C]. Les points éclair élevés suggèrent une bonne qualité en termes de volatilité (faible risque de formation des vapeurs inflammables à des températures ambiantes normales, soulignant une bonne sécurité lors de la manipulation et du stockage) et une absence probable de contamination significative par des produits plus légers [44].

3.1.4. La distillation ASTM (ASTMD86)

Les résultats de la distillation ASTM obtenus sont donnés dans les deux tableaux suivant qui représentent les températures d'ébullition (°C) à différents pourcentages volumiques distillés V% pour 20 échantillons :

Tableau 3.3.1 : Températures (°C) de la distillation ASTM (échantillon 1 à 10).

% V	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Pi	182	183	180	179	178	183	174	178	178	178
5	205	206	201	204	194	208	190	203	205	205
10	216	217	218	215	212	213	205	215	217	216
15	228	227	229	226	223	226	216	226	228	226
20	239	237	237	236	232	235	225	233	236	235
25	247	244	245	245	240	244	239	241	244	244
30	255	251	252	253	248	251	245	250	252	251
35	262	260	261	260	255	259	255	256	259	259
40	269	265	268	266	262	266	269	263	266	266
45	274	271	274	274	269	272	275	270	272	272
50	280	277	280	279	276	279	280	277	279	278
55	285	284	286	286	282	286	285	283	284	285
60	297	291	297	293	289	293	290	290	290	294
65	302	298	299	299	296	300	298	296	297	301
70	310	305	304	306	303	307	307	304	304	312
75	318	312	315	313	311	315	315	312	312	321
80	327	320	325	322	320	324	324	320	321	330
85	337	330	335	330	330	335	335	330	331	339
90	351	341	343	342	341	347	343	340	345	348
95	359	352	360	355	354	362	353	354	357	355
Pf	365	362	364	360	354	363	358	357	366	364

Tableau 3.3.2 : Températures (°C) de la distillation ASTM (échantillon 11 à 20).

% V	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20
Pi	180	180	179	182	183	183	175	186	179	178
5	207	205	205	203	205	204	201	206	202	202
10	216	216	214	212	215	212	215	212	215	213
15	226	227	226	224	222	227	224	227	226	222
20	234	236	235	235	234	235	234	234	235	232
25	242	244	242	243	241	243	241	241	242	240
30	249	251	250	250	249	251	248	249	249	248
35	255	258	257	259	256	259	255	255	257	255
40	264	265	264	265	263	266	262	262	264	262
45	271	271	271	272	270	273	268	270	271	270
50	278	277	277	279	278	279	276	277	279	278
55	283	284	284	281	284	286	282	284	285	285
60	291	292	290	293	292	292	291	291	293	291
65	297	298	298	300	298	299	298	299	300	299
70	306	305	305	307	305	307	306	307	308	306
75	314	314	313	315	313	315	314	315	315	314
80	323	322	322	325	323	325	324	325	326	323
85	333	333	332	334	334	335	335	336	336	333
90	344	345	344	341	345	346	346	349	349	345
95	360	357	357	360	360	360	360	364	360	358
Pf	367	366	364	365	370	367	360	367	361	361

Le gazole est un mélange d'hydrocarbures dont la plage d'ébullition se situe généralement entre environ 170°C et 390°C. Les Points initiaux d'ébullition Pi varient de 178°C à 183°C. Ces valeurs sont cohérentes avec le point de départ de la plage d'ébullition du gazole, et absence de contamination majeure par les produits très légers (point initial d'ébullition anormalement bas). Les points finals Pf varient de 357°C à 367°C, ces valeurs se situent également dans la plage

attendue pour le point final de gazole < 390°C et absence de contamination par les produits lourds (point final d'ébullition anormalement élevé) [45].

En regardant les températures aux différents pourcentages distillés (10%, 50%, 65%, 90%), on observe une progression régulière de la température avec l'augmentation des pourcentages distillés pour tous les échantillons. Cela suggère une distribution relativement normale des hydrocarbures dans la plage d'ébullition de gazole.

Le tableau 3.4 représente les résultats cruciaux sur le bilan massique de distillation ASTM (la charge = distillat + résidu) pour les 20 échantillons de gazole :

Tableau 3.4: Valeurs de distillat (Vd), résidu (Vr) et de la perte (Vp).

Échantillon	Vd (ml)	Vr(ml)	Vp (ml)
E1	98,0	1,4	0,6
E2	98,4	0,6	1,0
E3	98,0	1,5	0,5
E4	99,0	1,7	0,3
E5	98,0	1,5	0,5
E6	97,5	1,8	0,7
E7	97,2	1,7	1,1
E8	98,5	1,0	0,5
E9	99,0	0,7	0,3
E10	97,7	1,3	1,0
E11	97,1	1,9	1,0
E12	99,0	0,8	0,2
E13	98,5	1,0	0,5
E14	97,0	1,8	1,2
E15	97,6	1,4	1,0
E16	98,0	1,3	0,7
E17	98,0	1,4	0,6
E18	97,4	1,6	1,0
E19	98,0	1,4	0,6
E20	98,2	1,4	0,4

Les volumes de distillat sont généralement élevés, autour de 97ml à 99ml sur un volume initial de 100ml. Cela est cohérent avec la nature du gazole, dont la majorité des composants devraient distiller dans la plage de l'essai. Les volumes de résidus sont faibles, généralement entre 0,7ml et 0,9ml. Cela confirme la faible présence de composants très lourds dans les échantillons.

Les valeurs des pertes varient de 0,2ml à 1,2ml. La plupart des valeurs sont faibles et inférieures ou proches de 1ml, ce qui suggère une bonne qualité d'exécution des tests et absence des

fractions très légers. Cependant, quelques échantillons (E7, E14) présentent des pertes légèrement supérieures à 1ml, ce qui indique une légère variabilité dans la précision des manipulations pour ces échantillons spécifiques.

La viscosité cinématique (ASTM D445)

La viscosité cinématique est une mesure de la résistance interne d'un fluide à l'écoulement sous l'effet de gravité. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 3.5: Viscosité cinématique de 20 échantillons.

Échantillon	v (mm ² /s)	Échantillon	v (mm ² /s)
E1	3,1900	E11	3,2200
E2	3,0500	E12	3,0300
E3	3,0900	E13	3,1100
E4	3,0100	E14	3,9600
E5	3,2100	E15	3,1500
E6	3,1700	E16	3,0000
E7	3,1900	E17	3,0380
E8	3,2100	E18	3,0400
E9	3,0800	E19	3,0600
E10	3,2100	E20	3,0630

Exemple de calcul pour E10 :

Avec $t = 941,625$ s, $C = 0,003409$ mm²/s²

$$v = 0,003409 \times 941,625$$

$$v = 3,2100 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Les valeurs obtenues par le Tableau 3.5 sont autour de (3mm²/s), cela indique que le gazole testé est conforme aux exigences de viscosité cinématique entre (2 à 9 mm²/s) et à une fluidité appropriée pour une bonne performance du système d'injection du moteur, une atomisation correcte du carburant, une combustion efficace et absence de contamination par des produits plus ou moins visqueux. Les valeurs de viscosité cinématique sont relativement regroupées, avec une plage de variations d'environ (1mm²/s), cela suggère une bonne homogénéité du viscosimètre entre les différents échantillons du lot de gazole testé.

3.1.5. Les points écoulement et congélation (ASTM D97 et ASTM D2386)

Le tableau 3.6 présente les résultats des tests de points d'écoulement et de point de congélation pour 20 échantillons de gazole, ces deux propriétés sont cruciales pour évaluer le comportement du gazole à basse température.

Tableau 3.6: Point d'écoulement et de congélation de 20 échantillons.

Échantillon	PP (°C)	FRP (°C)
E1	-9	-12
E2	-12	-15
E3	-12	-15
E4	-6	-9
E5	-6	-9
E6	-9	-12
E7	-9	-12
E8	-9	-12
E9	-9	-12
E10	-9	-12
E11	-6	-9
E12	-9	-12
E13	-9	-12
E14	-9	-12
E15	-6	-9
E16	-9	-12
E17	-9	-12
E18	-12	-15
E19	-12	-15
E20	-6	-9

En examinant les résultats obtenus, on observe que tous les échantillons ont des points d'écoulement et de congélation bas, essentiels pour assurer le bon fonctionnement des véhicules diesel à température froide. Si ces températures sont trop élevées, des cristaux de cire peuvent se former dans le carburant, obstruant les filtres et les conduites de carburant entraînant des problèmes de démarrage et d'alimentation du moteur [46].

Les tests sont faits dans la période d'hiver au mois de février, donc le TLF (Température limite de filtrabilité) pour le point d'écoulement est de -5 (le test de TLF réalisé au niveau du laboratoire central).

3.1.6. L'indice de cétane (ASTM D976)

Le tableau 3.7 représente les résultats d'indice de cétane pour 20 échantillons de gazole, obtenus par deux méthodes différentes :

-CI1 représente les résultats d'indice calculés par logiciel (basés sur une équation qui utilise la densité à 15°C et la température d'ébullition T_{10} , T_{50} , T_{90}),

-CI2 représente les résultats d'indice calculé par corrélation de l'ASTM selon les formules (6) et (7).

Tableau 3.7: Indice de cétane par deux méthodes.

Échantillon	CI1	ds	T₅₀ (°C)	B	CI2
E1	51,4	0,8441	280	-379,2954	51,2860
E2	53,8	0,8365	277	-376,7067	53,2990
E3	54,7	0,8385	280	-377,3882	53,1930
E4	56,4	0,8317	279	-375,0306	55,3610
E5	53,4	0,8370	276	-397,9019	53,2870
E6	53,8	0,8376	279	-377,0869	53,3050
E7	55,2	0,8342	280	-375,9106	54,6710
E8	53,7	0,8367	277	-376,7810	53,2250
E9	53,8	0,8377	279	-377,1264	53,2650
E10	51,8	0,8380	278	-377,2298	52,9700
E11	53,3	0,8387	278	-377,4703	52,7297
E12	51,4	0,8381	277	-377,2641	52,7420
E13	53,6	0,8382	277	-377,2986	52,7070
E14	53,4	0,8388	279	-377,5050	53,7240
E15	52,9	0,8396	278	-377,5270	52,6730
E16	53,6	0,8383	279	-377,3330	51,2640
E17	52,8	0,8388	276	-377,5050	52,3050
E18	53,2	0,8383	277	-377,3330	52,6730
E19	52,9	0,8403	279	-378,0173	52,3740
E20	52,7	0,8404	278	-378,0463	52,1540

Exemple de calcul pour E10 :

$$B = 454,74 - 1641,416 \times 0,8380 + 774 \times 0,8380^2$$

$$B = -377,2298$$

$$CI2 = (-377,2298) - 0,554 \times T^{50} + 97,803(\log T_{50})^2$$

$$CI2 = 52,9700$$

On remarque que tous les échantillons de gazoles présentent des valeurs d'indice de cétane nettement supérieures à la limite minimale de 48, que ce soit par la méthode de CI1 ou par CI2. Cela indique que tous les échantillons devraient offrir de bonnes performances en termes d'allumage et de combustion dans les moteurs diesel.

On observe une bonne concordance générale entre les valeurs d'indice de cétane obtenues par deux méthodes pour la majorité d'échantillons. Les valeurs de CI1 et CI2 sont relativement proches et l'écart entre eux est très petit.

3.1.7. Les mesures des paramètres ambiants de laboratoire

Les mesures de ces paramètres sont faites avant de réaliser les tests caractéristiques de carburants. Les résultats sont représentés dans le tableau 3.8.

Certains tests physiques des produits pétroliers peuvent être légèrement influencés par la température ambiante et dans une moindre mesure, par la pression et l'humidité. Enregistrer les conditions ambiantes fait partie des bonnes pratiques de laboratoire et assure une traçabilité complète des conditions dans lesquelles les tests ont été réalisés. Les températures mesurées varient de 15,3°C à 23,5°C. La majorité des valeurs se situent dans une plage considérée comme ambiante et généralement acceptable pour la plupart des tests des produits pétroliers.

L'humidité relative varie de 17,9 % à 66%. Cette plage est assez large. Une humidité relative très basse ou très élevée peut potentiellement affecter certains aspects des tests ou le compartiment des échantillons.

La pression atmosphérique varie de 1000,6 mbar à 1104,2 mbar. Elle a une influence plus directe sur les tests impliquant des changements de phase, comme la distillation ASTM qui doit être effectuée à la pression atmosphérique, et des corrections peuvent être nécessaires si la pression s'écarte significativement de la pression standard (1013,25 mbar). Dans notre résultat des pressions, on a une variation notable entre les mesures. Une pression plus élevée peut légèrement augmenter les points d'ébullition et une pression plus basse peut les diminuer [47].

Tableau 3.8: Paramètres ambiants de laboratoire.

Échantillon	Tamb (°C)	Hr (%)	Patm (mbar)
E1	17,2	49	1103,1
E2	18,2	47,8	1104,2
E3	19,3	48,3	1103,6
E4	19,8	48,0	1014,2
E5	21,0	49,0	1015,9
E6	20,2	47,3	1004,3
E7	20,6	44,9	1011,7
E8	20,9	43,6	1009,1
E9	19,3	31,8	1006,4
E10	22,2	43,8	1004,7
E11	20,1	60,9	1009,0
E12	17,6	50,7	1001,6
E13	18,4	53,8	1001,9
E14	21,6	48,8	1000,6
E15	21,6	50,1	1006,2
E16	19,9	45,0	1004,5
E17	22,5	46,9	1015,1
E18	22,5	47,9	1015,1
E19	19,7	66,0	1014,1
E20	19,9	54,7	1019,0

3.2 Modélisation de la distillation ASTM

3.2.1. Le modèle mathématique proposé

On a établi un modèle mathématique polynômial de troisième degré, qui relie les T d'ébullition et les %v de distillation ASTM. Il est représenté sous la forme :

$$T = aV^3 + bV^2 + cV + d \dots \dots \dots (6)$$

Avec T : représente la température de distillation,

V : représente le pourcentage volumique distillé,

a, b, c, d : Constantes caractéristiques des échantillons analysés.

On a fait une modélisation pour les résultats de distillation ASTM de gazole obtenus en utilisant le logiciel STATISTICA.

Le tableau 3.9 représente les coefficients de modèle mathématique pour différents échantillons, on remarque que les valeurs des coefficients de modèle mathématique varient d'un échantillon à l'autre. Cela indique que chaque échantillon de gazole a un compartiment de distillation légèrement différent, ce qui peut être dû à des variations dans la composition chimique des hydrocarbures présents dans chaque échantillon.

Tableau 3.9: Coefficients de modèle mathématique pour 20 échantillons.

Échantillon	a	b	c	d
E1	218.10^{-6}	-0,0319	2,8492	191,6600
E2	187.10^{-6}	-0,0275	2,5862	193,8460
E3	250.10^{-6}	-0,0372	3,0683	188,6019
E4	216.10^{-6}	-0,0328	2,8969	189,5900
E5	242.10^{-6}	-0,0364	3,0881	182,1912
E6	204.10^{-6}	-0,0286	2,6409	192,4917
E7	205.10^{-6}	-0,0343	3,3027	173,9025
E8	189.10^{-6}	-0,0273	2,5987	191,1486
E9	243.10^{-6}	-0,0349	2,8661	191,4270
E10	107.10^{-6}	-0,0151	2,1707	195,9141
E11	178.10^{-6}	-0,0240	2,3864	194,8225
E12	208.10^{-6}	-0,0296	2,6568	192,5606
E13	199.10^{-6}	-0,0282	2,6135	191,8444
E14	206.10^{-6}	-0,0302	2,7863	188,6873
E15	187.10^{-6}	-0,0258	2,5167	191,8493
E16	219.10^{-6}	-0,0317	2,8323	189,2663
E17	198.10^{-6}	-0,0270	2,5623	190,5405
E18	196.10^{-6}	-0,0257	2,4637	192,9365
E19	192.10^{-6}	-0,0270	2,6140	190,8225
E20	169.10^{-6}	-0,0241	2,5239	189,6269

Le modèle mathématique pour E10 :

$$T = 107.10^{-6}V^3 - 0,0151V^2 + 2,1707V + 195,9141$$

Chacun de ces coefficients a une signification dans la description de la courbe de distillation pour un échantillon donné :

Les valeurs de (a) sont généralement très petites (de l'ordre 10^{-6}), Ce qui indique que les termes cubiques (a) ont une influence relativement faible sur la forme globale de la courbe de distillation. Cependant, même la petite variation peut entraîner des différences subtiles dans la

concavité de la courbe, en particulier aux extrémités de la plage de distillation. Le signe positif de (a) indique que la pente augmente de plus en plus rapidement avec le pourcentage distillé [48].

Les valeurs de (b) sont de l'ordre de (-0,03), avec des légères variations entre les échantillons. Ce terme a une influence plus significative que le terme cubique sur la courbe de distillation. Le signe négatif de (b) indique que la pente de la courbe de distillation diminue avec l'augmentation du pourcentage distillé dans la plage considérée.

Les valeurs de (c) sont autour de (2,5 à 3,3) ce qui suggère que le terme linéaire est le contributeur majeur à l'augmentation de la température de distillation avec le pourcentage distillé, il représente la pente générale de la courbe.

Les valeurs de (d) varient entre (170 et 195), coefficient est une approximation du point d'ébullition initial de chaque échantillon. Des valeurs plus élevées de (d) indiquent que l'échantillon contient des composants plus lourds qui commencent à bouillir à des températures plus élevées. La variabilité de (d) entre les échantillons suggère des différences dans la composition des fractions les plus légères [48].

3.2.2. Les paramètres statistiques

Pour optimiser et évaluer la performance du modèle obtenu, on a calculé les paramètres statistiques qui sont représentés dans le tableau 3.10.

Ces paramètres nous donnent une indication sur la qualité de l'ajustement de notre modèle aux données de distillation expérimentales pour chaque échantillon.

- Les erreurs EAmoy et ERmoy (%) sont calculés par les formules (3) et (4),
- Le coefficient de détermination R² déterminé par le logiciel STATISTICA.

Exemple de calcul EAmoy pour E10 :

$$E_{Amoy} = \frac{(1,4039 + 0,2198 + 0,5577 + 0,8483 + 1,5715 + 0,6468 + 0,9937 + 0,5317 + 0,8195 + 2,1406 + 2,5120 + 1,0141 + 1,7274 + 1,2675 + 1,8903 + 2,0605 + 1,6976 + 0,7211 + 2,9494)}{19}$$

$$E_{Amoy} = 1,2934$$

Exemple de calcul ERmoy (%) pour E10 :

$$ER_{moy} (\%) = \left[\frac{(0,0068 + 0,0010 + 0,0024 + 0,0036 + 0,0064 + 0,0025 + 0,0038 + 0,0019 + 0,0030 + 0,0077 + 0,0088 + 0,0034 + 0,0005 + 0,0040 + 0,0058 + 0,0062 + 0,0050 + 0,0020 + 0,0083)}{19} \right] 100$$

$$ER_{moy} (\%) = 0,4417 \%$$

D'après les résultats de tableau on remarque :

Les valeurs de l'erreur absolue moyenne sont généralement faibles (inférieur à 1,6), cela indique un meilleur ajustement de modèle aux données.

Les valeurs de l'erreur relative moyenne en % sont très faibles généralement (inférieur à 0,6 %), donc on a un meilleur ajustement relatif.

La valeur de R^2 pour tous les échantillons présents est extrêmement proche de 1, ce qui signifie que le modèle explique une très grande partie de la variabilité des données.

Tableau 3.10: Paramètres statistiques de modèle.

Échantillon	EAmoy	ERmoy (%)	R²
E1	0,9848	0,3438	0,9995
E2	0,4668	0,1702	0,9999
E3	1,2511	0,4589	0,9992
E4	0,4879	0,1746	0,9998
E5	0,6919	0,2987	0,9997
E6	0,8770	0,3391	0,9996
E7	1,5166	0,5688	0,9991
E8	0,5747	0,2143	0,9998
E9	0,4910	0,1756	0,9998
E10	1,2934	0,4417	0,9994
E11	0,7808	0,2763	0,9997
E12	0,3848	0,1391	0,9999
E13	0,4549	0,1767	0,9999
E14	1,1503	0,4076	0,9993
E15	0,8130	0,3007	0,9997
E16	0,5783	0,2360	0,9998
E17	0,6533	0,2585	0,9998
E18	0,8909	0,3493	0,9996
E19	0,7017	0,2659	0,9998
E20	0,5883	0,2098	0,9998

On conclut que les valeurs des erreurs sont très faibles combinées aux valeurs de R^2 proche de 1 pour tous les échantillons. Ce qui confirme que le modèle polynomial est très bien optimisé pour représenter les courbes de distillations ASTM, et les coefficients constants que nous avons déterminés pour chaque échantillon permettent de prédire la courbe de distillation avec une très haute fiabilité.

3.2.3. Les courbes de distillation ASTM

Les courbes de distillation sont représentés dans les figures 3.1 et 3.2 pour les échantillons 19 et 20. (Les courbes des autres échantillons sont représentées dans l'annexe D).

La courbe de distillation est un outil essentiel pour caractériser un produit pétrolier comme le gazole. Elle représente la température d'ébullition en fonction du volume distillé.

T_{exp} (courbe rouge) : c'est la courbe de température expérimentale. Elle représente la température mesurée lors de la distillation réelle de l'échantillon gazole.

T_{cal} (courbe bleue) : c'est la courbe de température calculée par le modèle mathématique proposé.

Le graphe montre que la distillation du gazole varie entre la plage de 200°C à 370°C, et les deux courbes sont très proches, ce qui indique une fiabilité du modèle utilisé.

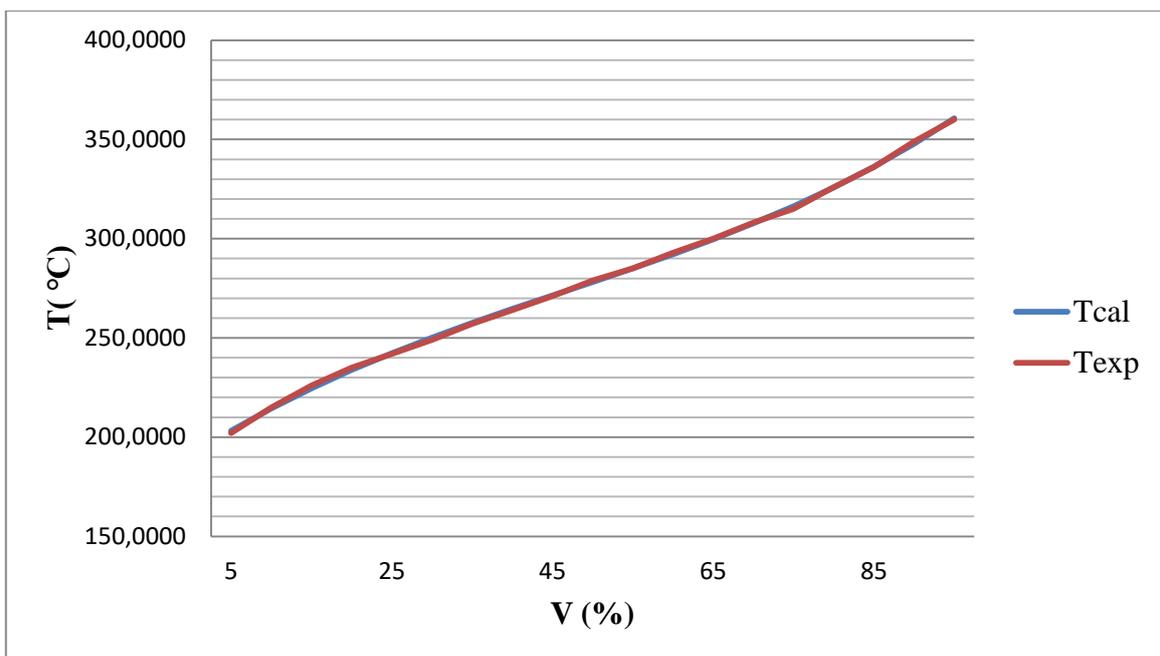


Figure 3.1: Courbe de distillation ASTM pour échantillon 19.

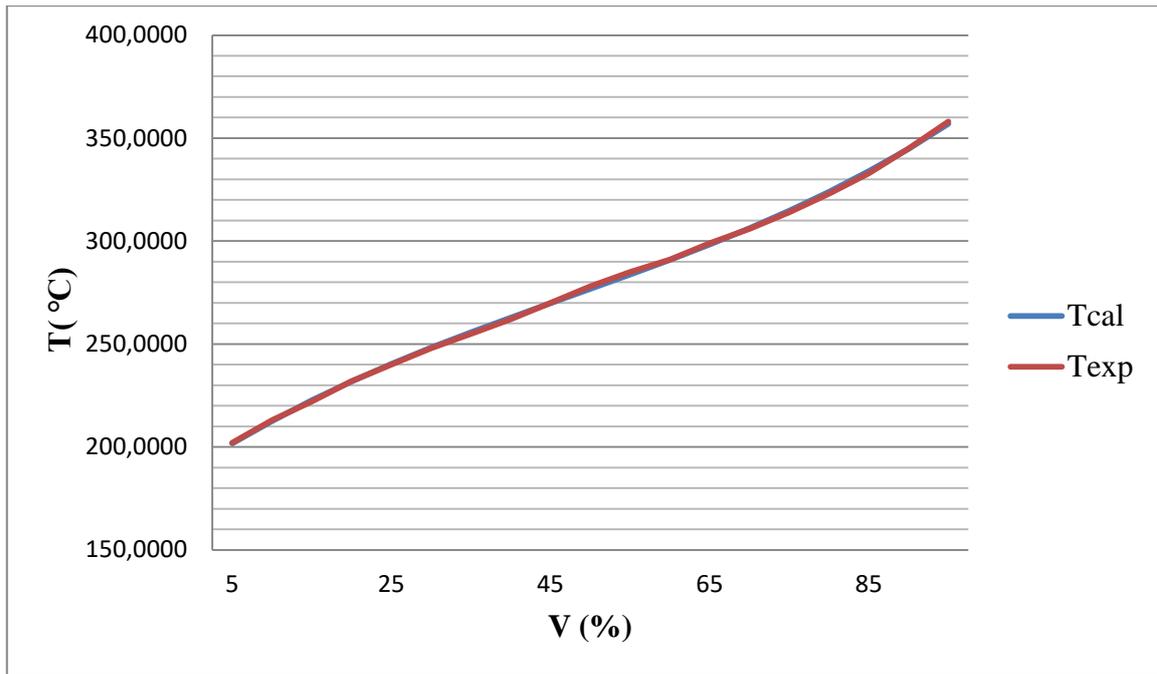


Figure 3.2: Courbe de distillation ASTM pour échantillon 20.

En observant la proximité de la courbe modélisée avec la courbe expérimentale, on peut évaluer visuellement la qualité de l'ajustement, dans ce cas la forme spécifique de la courbe est influencée par les coefficients du modèle obtenu. L'ajustement étroit du modèle aux données expérimentales et les valeurs de R^2 proche de 1 confirme que le modèle polynomial de degré 3 représente bien le comportement de distillation.

3.2.4. Comparaison des températures expérimentales et calculées

A. On a fait une comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées des températures caractéristiques de distillation ASTM (T_{10} , T_{65} , T_{90}) Les résultats sont représentés dans les tableaux 3.11, 3.12, 3.13 suivants :

$$\text{Avec : } \Delta T = |T_{\text{exp}} - T_{\text{cal}}| \dots \dots \dots (7)$$

Tableau 3.11: Température expérimentale et calculée au point V=10%.

Échantillon	T_{exp} (°C)	T_{cal} (°C)	ΔT
E1	216	217,1779	1,1779
E2	217	217,1454	0,1454
E3	218	215,8143	2,1857
E4	215	215,4076	0,4976
E5	212	209,6715	2,3286
E6	213	216,2454	3,2454
E7	205	203,7033	1,2967
E8	215	214,5892	0,4108
E9	217	216,7931	0,2069
E10	216	216,2199	0,2199
E11	216	216,4678	0,4678
E12	216	216,3851	0,3851
E13	214	215,3607	1,3607
E14	212	213,7405	1,7405
E15	215	214,6238	0,3762
E16	212	214,6341	2,6341
E17	215	213,6626	1,3374
E18	212	215,19998	3,1998
E19	215	214,4621	0,5379
E20	213	212,6252	0,3748

Ce tableau compare la température d'ébullition expérimentale et la température calculée par le modèle polynomiale degré 3 à 10% de volume distille pour chaque échantillon.

La température à 10% de volume distillé permet d'évaluer la légèreté des composants les plus volatils du gazole, qui influencent directement le démarrage à froid, la formation de brouillard de carburant, ainsi que la facilité d'atomisation et de combustion dans les moteurs diesel.

Une T_{10} trop basse indique une proportion élevée des fractions légères, menant à une évaporation excessive et à des risques accrus de formation des vapeurs inflammables. A l'inverse, une T_{10} élevée peut nuire au démarrage du moteur. Ainsi, cette température est un paramètre essentiel pour assurer une bonne performance de moteur, sécurité et respect des normes environnementales [49].

Tableau 3.12: Température expérimentale et calculée au point V=65%.

Échantillon	T_{exp} (°C)	T_{cal} (°C)	ΔT
E1	302	301,8648	0,1352
E2	298	297,2590	0,7410
E3	299	299,5053	0,5053
E4	299	298,6658	0,3341
E5	296	295,4155	0,5845
E6	300	299,4207	0,5793
E7	298	299,9686	1,9686
E8	296	296,3182	0,3182
E9	297	296,8378	0,1622
E10	301	302,7275	1,7275
E11	297	297,6187	0,6187
E12	298	297,7549	0,2451
E13	298	297,3278	0,6722
E14	300	298,8708	1,1292
E15	298	297,8056	0,1944
E16	299	299,3437	0,3437
E17	298	297,3575	0,6425
E18	299	298,2775	0,7225
E19	300	299,6620	0,3380
E20	299	298,3280	0,6720

Le tableau représente la différence entre les valeurs de T_{exp} et T_{cal} à 65%. On remarque que le modèle a bien prédit la température à 65%, avec des températures supérieures à la limite minimale de 250°C.

La température à 65% correspond aux fractions moyennes, responsables en grande partie de la performance énergétique et de l'efficacité de la combustion rapide et incomplète, augmentant les émissions polluantes. Une T₆₅ très élevée signale une teneur excessive en composés lourds, susceptibles de générer des dépôts dans le moteur, une mauvaise atomisation et une diminution du rendement. Cette température est essentielle pour évaluer l'équilibre entre volatilité, rendement énergétique et propreté de la combustion dans les moteurs diesel modernes [49].

Tableau 3.13: Température expérimentale et calculée au point V=90%.

Échantillon	Texp (°C)	Tcal (°C)	ΔT
E1	351	348,4762	2,5238
E2	341	340,5489	0,4511
E3	343	345,6293	2,6293
E4	342	342,1164	0,1164
E5	341	341,3110	0,3110
E6	347	347,4288	0,4288
E7	343	342,8230	0,1770
E8	340	341,0198	1,0198
E9	345	343,7182	1,2818
E10	348	347,2789	0,7211
E11	344	345,4119	1,4119
E12	345	344,4520	0,5480
E13	344	343,9125	0,0875
E14	341	345,1217	4,1217
E15	345	345,7371	0,7371
E16	346	346,5639	0,5639
E17	346	346,6482	0,6482
E18	349	349,2413	0,2413
E19	349	347,8337	1,1663
E20	345	344,9187	0,0813

Ce tableau compare la Texp et Tcal par modèle polynomial au point 90% de volume distillé. Les valeurs des températures sont généralement proches et inférieures à la limite maximale 360°C et avec des valeurs de différence faibles.

La température à 90 % de volume distillé est un indicateur clé des caractéristiques des fractions les plus lourdes du gazole. Une T₉₀ élevée indique une forte proportion de ces fractions lourdes, ce qui peut entraîner une combustion incomplète, des dépôts au niveau des injecteurs et des soupapes. Une T₉₀ trop basse pourrait signaler un carburant léger, susceptible d'avoir une lubrification insuffisante ou de poser des problèmes de sécurité en raison d'une volatilité excessive. Donc la précision de notre modèle à ce point 90 % est importante pour s'assurer qu'il capture correctement le comportement de distillation à la fin du processus [49].

On observe que pour la plupart des échantillons à différents pourcentages (10%, 65%, 90%), les températures calculées sont relativement proches des températures expérimentales, ce qui permet d'évaluer la capacité du modèle à capturer correctement le comportement des échantillons gazole.

ΔT représente la différence entre les températures calculées et expérimentales et nous donne une précision sur le modèle mathématique, des valeurs plus faibles indiquent une meilleure concordance entre le modèle et les données expérimentales, à différents pourcentages volumiques.

B. Pour visualiser et évaluer la performance et la fiabilité du modèle mathématique proposé, on a tracé les courbes des températures expérimentales en fonction des températures calculées. Les résultats sont présentés pour les échantillons 19 et 20 dans les figures 3.3 et 3.4, (les courbes des autres échantillons sont représentées dans l'annexe E).

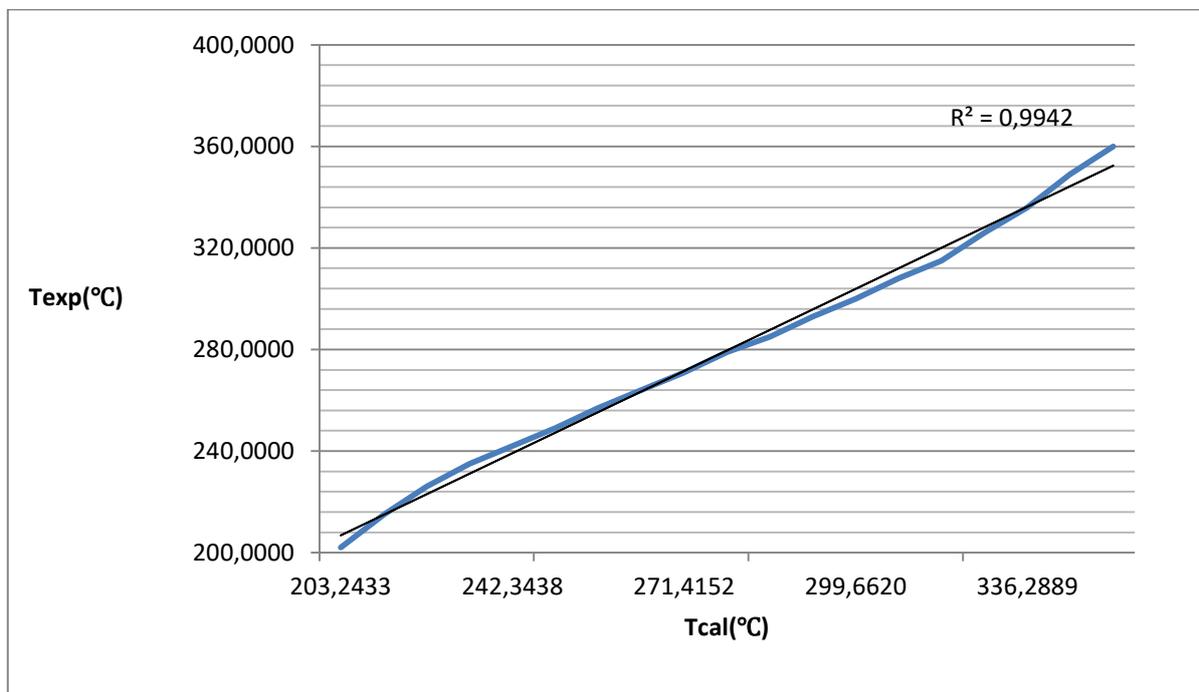


Figure 3.3: Courbe de Texp en fonction de Tcal pour l'échantillon 19.

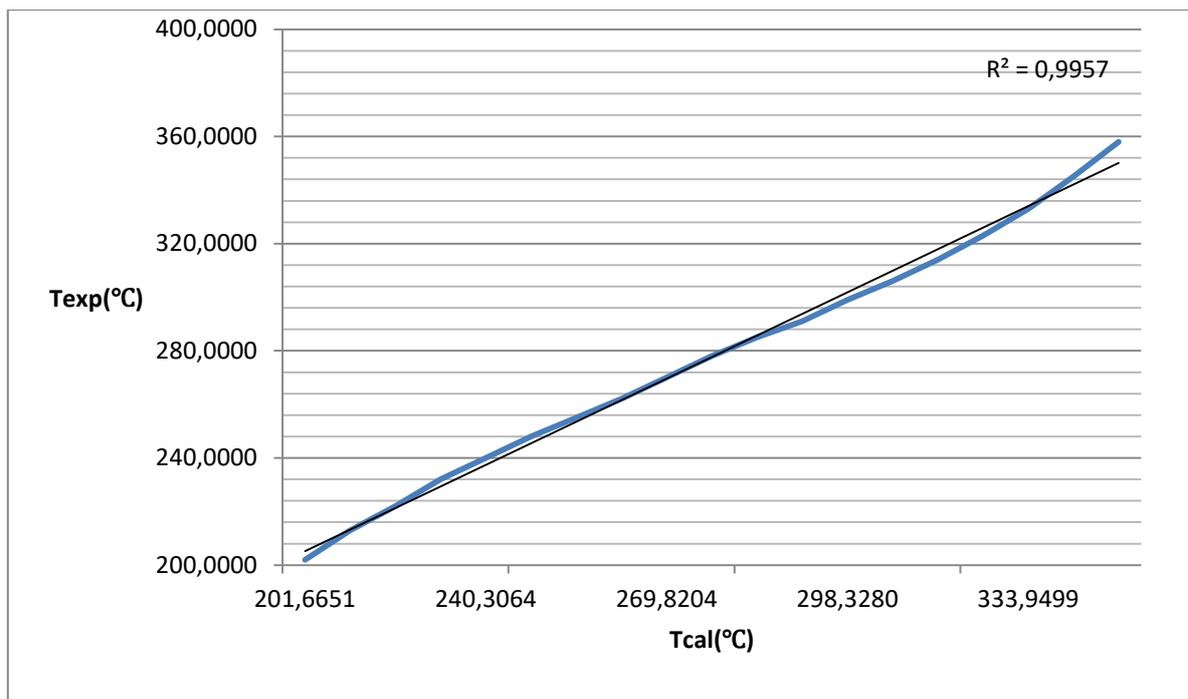


Figure 3.4: Courbe de Texp en fonction de Tcal pour l'échantillon 20.

Ce graphe est une représentation visuelle entre les températures expérimentales et les températures par le modèle mathématique. La forte corrélation correspond aux valeurs élevées de R^2 (proche de 1) et des faibles erreurs moyennes.

On observe que les points traces pour ces échantillons forment une tendance linéaire claire et se situent très près d'un linge droit imaginaire. Cela indique une forte corrélation entre les températures prédites par modèle mathématique et les températures expérimentales de distillation. La proximité des points au linge diagonal est une indication à la bonne qualité de l'ajustement, donc le modèle polynomiale degré 3 est capable de représenter avec précision le comportement de distillation de gazole.

3.2.5. La caractérisation de la distillation ASTM par les dérivées $\frac{dT}{dV}$ et $\frac{d^2T}{dV^2}$

Pour une meilleure caractérisation et exploitation des résultats de la distillation ASTM, nous proposons une nouvelle méthode basée sur le calcul de la première et la deuxième dérivée de la fonction $T = f(V)$.

La première dérivée :
$$\frac{dT}{dV} = 3aV^2 + 2bV + c \dots \dots (8)$$

La deuxième dérivée :
$$\frac{d^2T}{dV^2} = 6aV + 2b \dots \dots \dots (9)$$

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.14: Caractérisation des échantillons gazole par le calcul des dérivées.

Échantillon	$\left(\frac{dT}{dV}\right)_{10}$	$\left(\frac{dT}{dV}\right)_{65}$	$\left(\frac{dT}{dV}\right)_{90}$	6a
E1	2,2150	1,4619	2,3998	131.10^{-5}
E2	2,0923	1,3818	2,1808	112.10^{-5}
E3	2,3992	1,4008	2,4469	15.10^{-4}
E4	2,3062	1,374	2,2462	130.10^{-5}
E5	2,4322	1,4207	2,4129	145.10^{-5}
E6	2,1302	1,5094	2,4512	122.10^{-5}
E7	2,6780	1,4406	2,1082	123.10^{-5}
E8	2,1084	1,4389	2,2686	113.10^{-6}
E9	2,2365	1,4079	2,4893	146.10^{-5}
E10	1,9011	1,5654	2,0548	642.10^{-6}
E11	1,9603	1,5254	2,3957	107.10^{-5}
E12	2,1289	1,4562	2,3985	125.10^{-5}
E13	2,1096	1,4724	2,3768	119.10^{-5}
E14	2,2450	1,4773	2,3644	124.10^{-5}
E15	2,0569	1,5335	2,4175	112.10^{-5}
E16	2,2632	1,4818	2,4406	131.10^{-5}
E17	2,0820	1,5643	2,5169	119.10^{-5}
E18	2,0087	1,6083	2,6023	118.10^{-5}
E19	2,1332	1,5481	2,4341	115.10^{-5}
E20	2,0926	1,5332	2,2929	101.10^{-5}

La première dérivée de modèle polynomial représente la pente de la courbe de distillation à un pourcentage volumique distillé donné, et indique le taux de changement de la température avec le volume distillé à des points caractéristiques.

$\left(\frac{dT}{dV}\right)_{10}$: La première dérivée de modèle mathématique à 10% de volume distillé, représente la pente de la courbe de distillation au début de la distillation. Des valeurs plus élevées ici suggèrent que la température augmente rapidement au début, indiquent la présence de la pauvreté en composés volatils, on observe une certaine variabilité entre les échantillons [50].

$\left(\frac{dT}{dV}\right)_{65}$: La première dérivée de modèle mathématique à 65% de volume distillé, représente la pente au milieu de la plage de distillation, cette valeur donne une indication de la volatilité des composants qui distillent dans ces fractions intermédiaires. On remarque que les pentes sont

généralement faibles ce qu'indique une région où la distribution des points d'ébullition est moins étendue.

$\left(\frac{dT}{dV}\right)_{90}$: La première dérivée de modèle mathématique à 90% de volume distillé, représente la pente vers la fin de distillation. Une pente élevée indique la présence de composants plus lourds avec des températures d'ébullition plus élevées.

6a : Représente la tangente de la deuxième dérivée qui lie la concavité de la courbe de distillation. La valeur de la tangente est toujours positive, ce qui indique une légère tendance à une concavité vers le haut pour la plupart des échantillons, cela signifie que le taux d'augmentation de la pente de la courbe de distillation tend à augmenter avec le volume distillé.

On conclut que les dérivées calculées fournissent une caractérisation plus détaillée par rapport à la volatilité du gazole qui évolue sur toute la plage de distillation. Les pentes à différents points donnent des informations sur la distribution des points d'ébullition des composants présents [50].

- Une pente faible à une température relativement basse pour un volume de distillat significatif indique la présence des composés légers,

- Une pente forte à une température plus élevée pour un volume de distillat important indique la présence des composés plus lourds.

3.3. Modélisation de point éclair et la densité

3.2.6. Modèle mathématique proposé

Pour développer une relation mathématique prédictive qui permette d'estimer ou de prévoir le point éclair d'un échantillon de gazole en se basant sur la densité, on a fait une modélisation pour les résultats obtenus en densité et point éclair pour 20 échantillons, par la proposition d'un modèle polynomial de troisième degré. Il est représenté sous la forme :

$$FP = ads^3 + bds^2 + cds + d \dots \dots \dots (10)$$

Avec FP : Flash point (point éclair),

ds : La densité spécifique convertie à 15°C,

a, b, c, d : Constantes caractéristiques des échantillons analysés.

a : -203682

b : 341445,4

c :-143003

d :0

Exemple de modèle mathématique :

$$FP = -203682ds^3 + 341445,4ds^2 - 143003ds$$

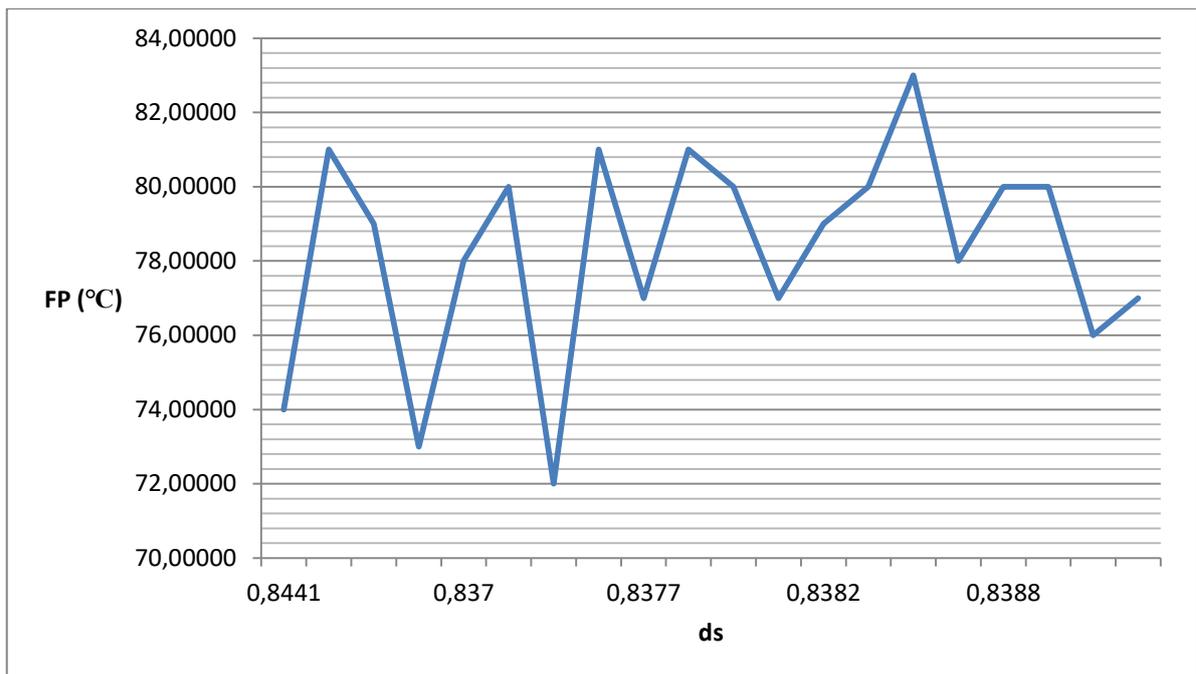


Figure 3.5: Courbe de FP en fonction de ds pour 20 échantillons.

La courbe démontre que pour les 20 échantillons analysés, il n'y a pas de relation simple linéaire ou constamment monotone entre le point d'éclair et la densité. Au lieu de cela, le point d'éclair fluctue significativement avec les changements de densité, suggérant que la composition sous-jacente des échantillons, qui influence les deux propriétés, varie considérablement d'un échantillon à l'autre.

3.2.7. Les paramètres statistiques

Afin d'optimiser la performance du modèle mathématique proposé, on a calculé les paramètres statistiques suivants :

R^2 : 0,7236

$$EAmoy = \frac{(0,19186+2,3714+0,2814+1,4551+0,9193+0,8438+4,2011+2,2449+2,1837+1,7540+0,7283+2,2598+0,2703+0,7382+3,9414+1,2474+0,7382+0,7225+2,7008+1,6359)}{20}$$

$$EAmoy = 1,5730$$

$$ERmoy (\%) = \left[\frac{(0,0025+0,0292+0,0035+0,0199+0,0117+0,0105+0,0583+0,0277+0,0283+0,0216+0,0091+0,0029+0,0034+0,0092+0,0474+0,0163+0,0092+0,0090+0,0355+0,0212)}{20} \right] 100$$

$$ERmoy (\%) = 1,8867 \%$$

Bien que les erreurs de notre modèle soient faibles, indique une précision moyenne des prédictions, la valeur du coefficient de détermination obtenue est considérée comme insuffisante pour que le modèle soit jugeable. En effet, pour qu'un modèle soit accepté, il faut avoir un coefficient de détermination au minimum 0,85.

Par conséquent ce modèle n'explique pas une proportion suffisamment élevée de la variabilité du point éclair pour être valide.

Conclusion

Conclusion

Ce travail nous a permis de développer une méthode innovante pour la caractérisation du gazole, en s'appuyant sur les données de distillation ASTM obtenues au laboratoire de contrôle qualité des carburants NAFTAL. À travers l'analyse de 20 échantillons, la mesure des propriétés physiques du gazole (densité, point éclair, distillation ASTM, viscosité cinématique, point d'écoulement et l'indice de cétane) a été réalisée par les différentes normes. Les résultats obtenus montrent que les valeurs trouvées sont conformes.

Pour une meilleure exploitation de la distillation ASTM, on a élaboré un modèle polynomial de degré 3 reliant la température au volume distillé. Les résultats obtenus montrent une bonne corrélation entre les données expérimentales et les valeurs prédites. Le modèle obtenu est caractérisé par une bonne précision, avec des coefficients de détermination élevés ($R^2=0,9997$), des erreurs ($ER_{moy}= 0,2903\%$ et $EAmoy= 0,7842$) et écarts faibles entre les températures observées et celles prédites, ce qui montre la fiabilité du modèle proposé.

L'exploitation du modèle, par le calcul des dérivées, nous a permis de trouver une nouvelle méthode de caractérisation du carburant gazole et apportant une meilleure compréhension de sa composition (les fractions légères et lourdes). Cette approche représente une alternative efficace aux méthodes classiques, en offrant gain de temps, simplicité d'application et de réduction des coûts expérimentaux. Cette méthode contribue ainsi à l'amélioration des techniques de contrôle qualité et de formulation des produits pétroliers. Elle pourrait être étendue à d'autres fractions pétrolières ou intégrée dans des systèmes automatisés de suivi en raffinerie.

Suite aux efforts visant à affiner la prédiction du point éclair en fonction de la densité, un autre modèle mathématique a été établi pour explorer cette relation. Cependant, les résultats des erreurs ($ER_{moy}= 1,8867\%$ et $EAmoy= 1,5730$) et un coefficient de détermination ($R^2=0,7236$), la faiblesse persistante du R^2 indique qu'une part significative des variations du point d'éclair demeure inexplicquée par la seule densité, suggérant la nécessité d'intégrer d'autres paramètres explicatifs ou d'explorer les relations non-linéaires plus complexes pour construire un modèle prédictif plus performant et acceptable.

ANNEXES

Annexe A :

T. Tableau de correction des températures d'après ASTM. IP Petroleum Measurement Table (Metric Edition) TAB. E. 53

Densité à la température de l'essai T Densité mesurée (g/ml)	Facteur de correction à g/ml degré	Densité à la température de l'essai T Densité mesurée (g/ml)	Facteur de correction à g/ml degré
0,620 - 0,625	0,00097	0,775 - 0,780	0,00073
0,625 - 0,630	0,00096	0,780 - 0,785	0,00073
0,630 - 0,635	0,00095	0,785 - 0,790	0,00072
0,635 - 0,640	0,00094	0,790 - 0,795	0,00072
0,640 - 0,645	0,00093	0,795 - 0,800	0,00071
0,645 - 0,650	0,00092	0,800 - 0,805	0,00070
0,650 - 0,655	0,00092	0,805 - 0,810	0,00069
0,655 - 0,660	0,00091	0,810 - 0,815	0,00069
0,660 - 0,665	0,00090	0,815 - 0,820	0,00068
0,665 - 0,670	0,00089	0,820 - 0,825	0,00068
0,670 - 0,675	0,00089	0,825 - 0,830	0,00067
0,675 - 0,680	0,00088	0,830 - 0,835	0,00067
0,680 - 0,685	0,00087	0,835 - 0,840	0,00067
0,685 - 0,690	0,00087	0,840 - 0,845	0,00066
0,690 - 0,695	0,00086	0,845 - 0,850	0,00066
0,695 - 0,700	0,00086	0,850 - 0,855	0,00066
0,700 - 0,705	0,00085	0,855 - 0,860	0,00065
0,705 - 0,710	0,00084	0,860 - 0,865	0,00064
0,710 - 0,715	0,00083	0,865 - 0,870	0,00064
0,715 - 0,720	0,00083	0,870 - 0,875	0,00064
0,720 - 0,725	0,00082	0,875 - 0,880	0,00064
0,725 - 0,730	0,00082	0,880 - 0,885	0,00064
0,730 - 0,735	0,00081	0,885 - 0,890	0,00064
0,735 - 0,740	0,00080	0,890 - 0,895	0,00063
0,740 - 0,745	0,00079	0,895 - 0,900	0,00063
0,745 - 0,750	0,00079	0,900 - 0,905	0,00063
0,750 - 0,755	0,00078	0,905 - 0,910	0,00062
0,755 - 0,760	0,00077	0,910 - 0,915	0,00062
0,760 - 0,765	0,00076	0,915 - 0,920	0,00062
0,765 - 0,770	0,00075	0,920 - 0,925	0,00062
0,770 - 0,775	0,00074	0,925 - 0,930	0,00062

$D_t \text{ à } 15^\circ\text{C} = D_{t_{LM}} + a (T - 15)$

Figure A: Table ASTM 53B

Annexe B:

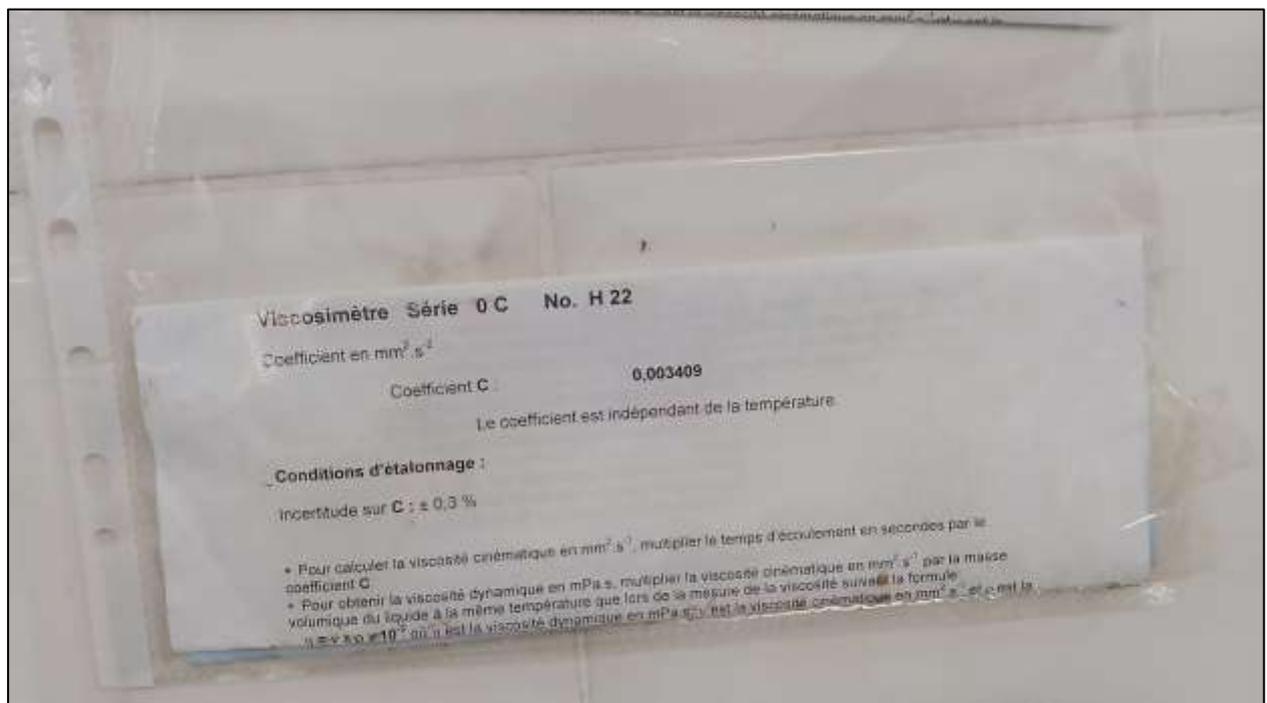


Figure B: Coefficient de viscosimètre

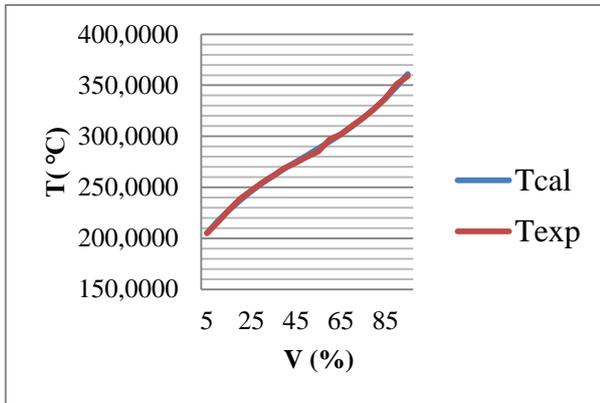
Annexe C:

BAIN	Température du bain (°C)	Température de l'échantillon (°C)
1	0 ± 1.5	9
2	-18 ± 1.5	9 à -6
3	-33 ± 1.5	-6 à -24
4	-51 ± 1.5	-24 à -42

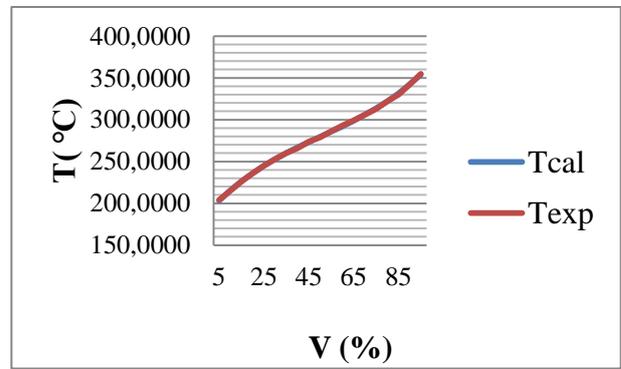
Figure C: Les températures de bain de refroidissement

Annexe D:

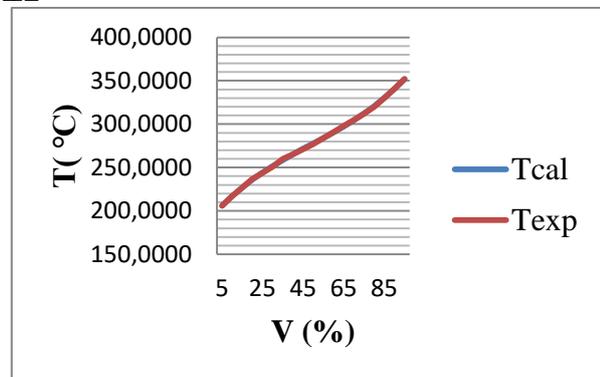
E1



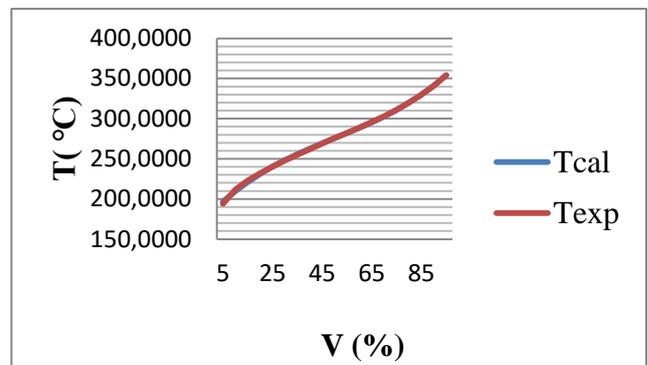
E4



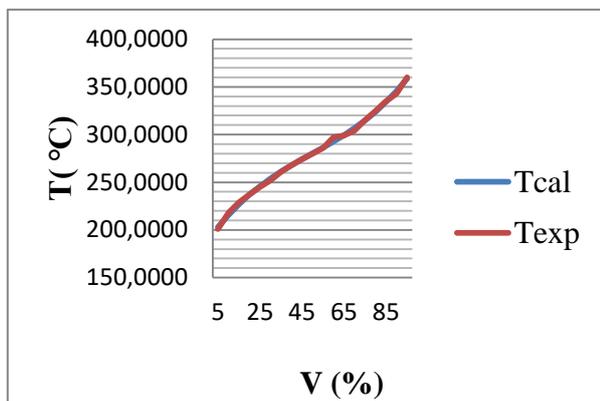
E2



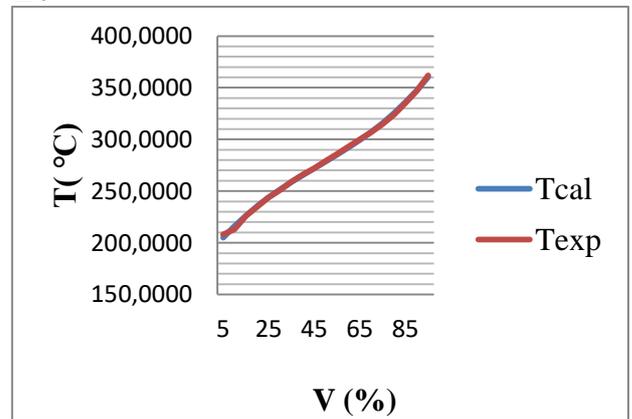
E5

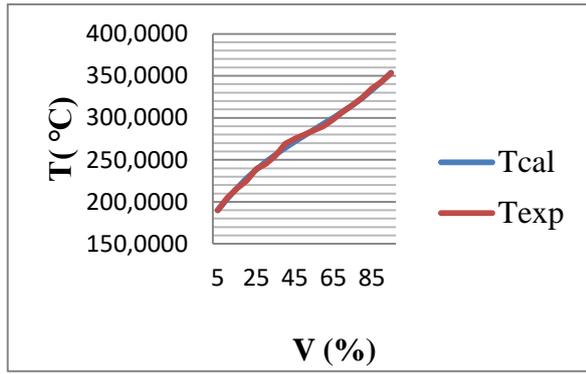
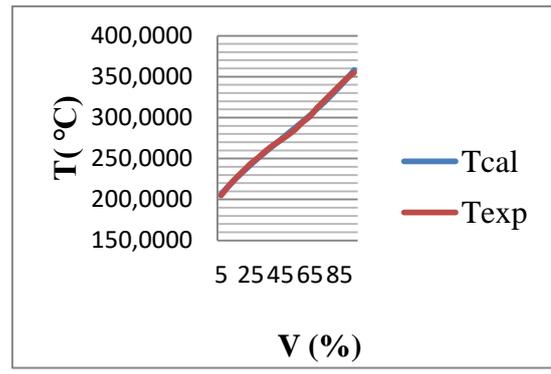
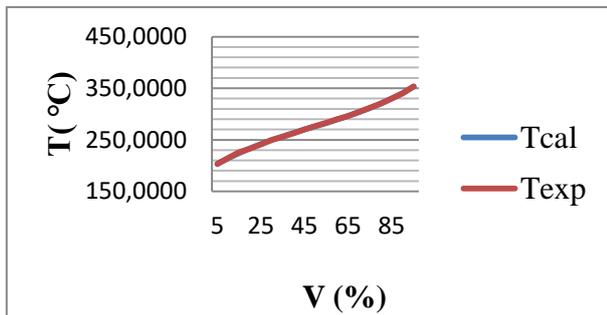
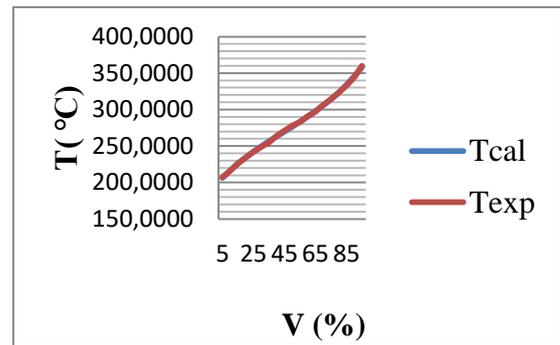
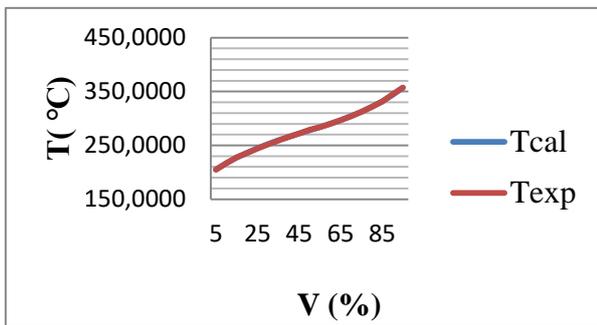
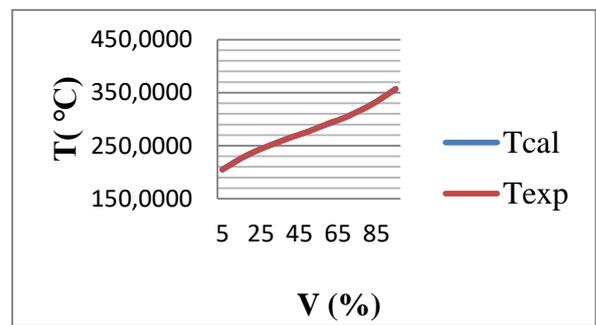


E3

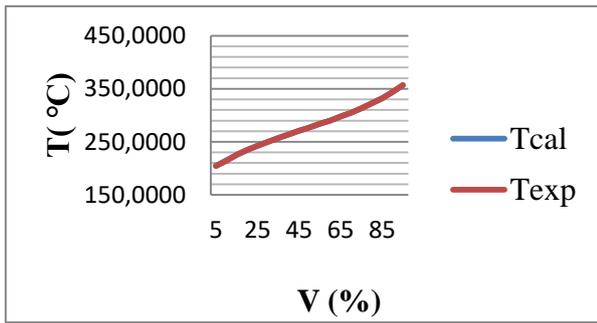


E6

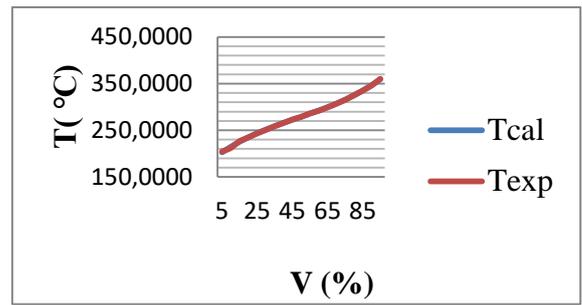


E7**E10****E8****E11****E9****E12**

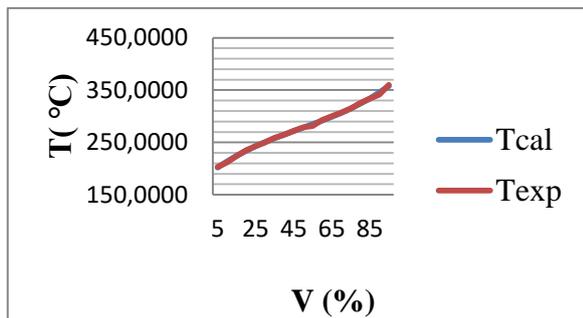
E13



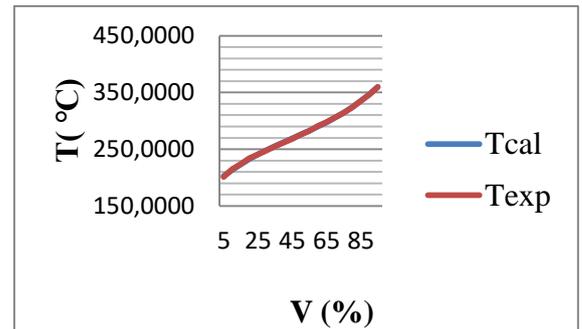
E16



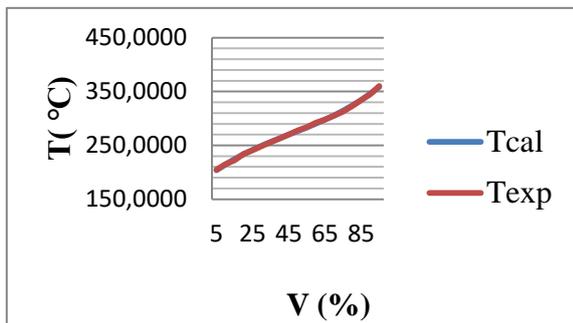
E14



E17



E15



E18

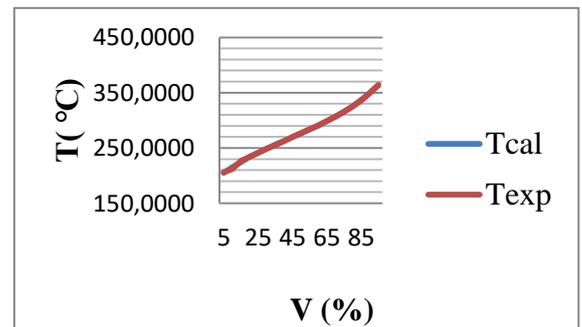
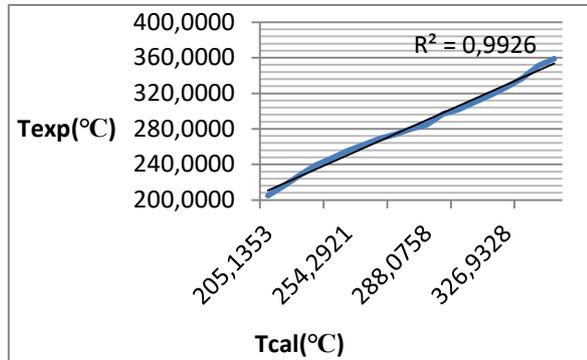


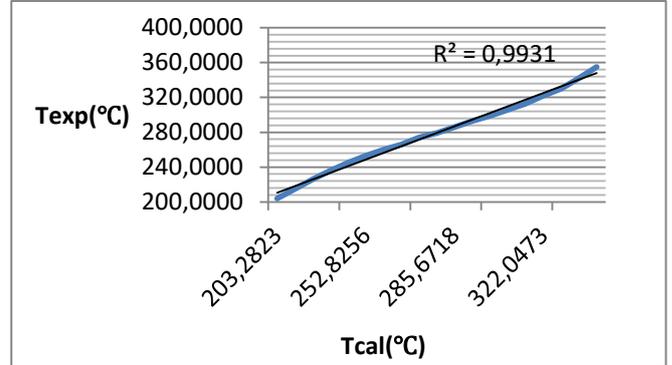
Figure D : Les courbes de distillation ASTM (échantillon 1 à 18).

Annexe E :

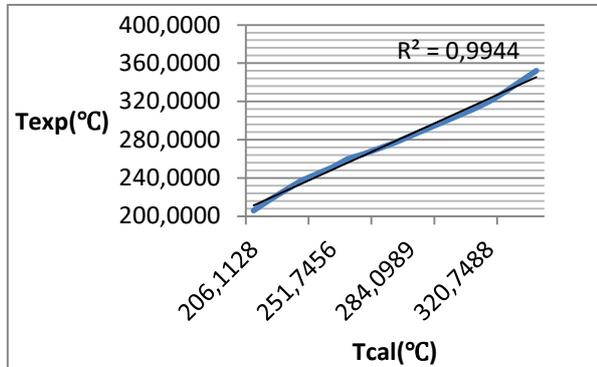
E1



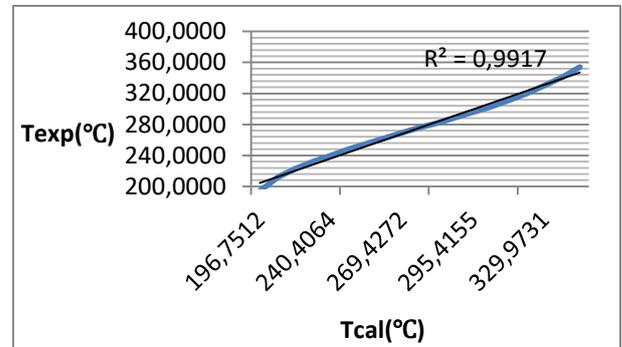
E4



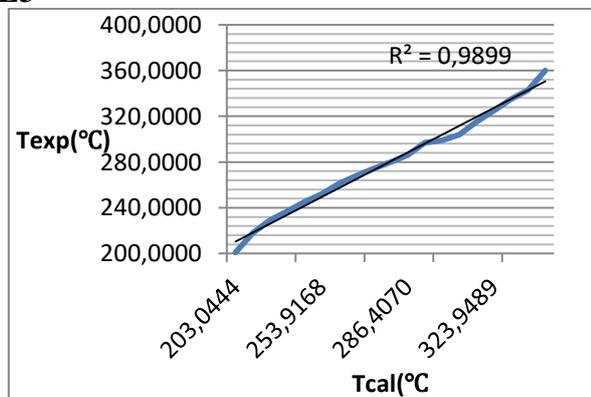
E2



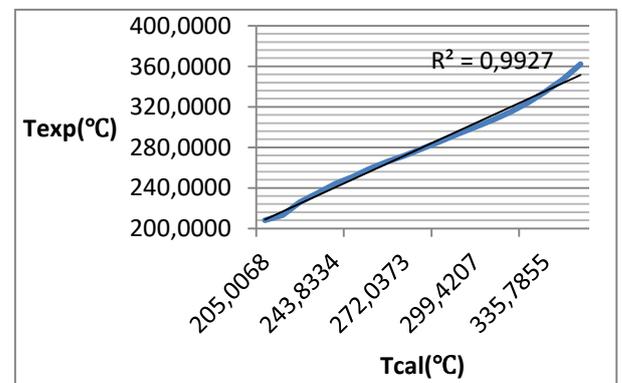
E5

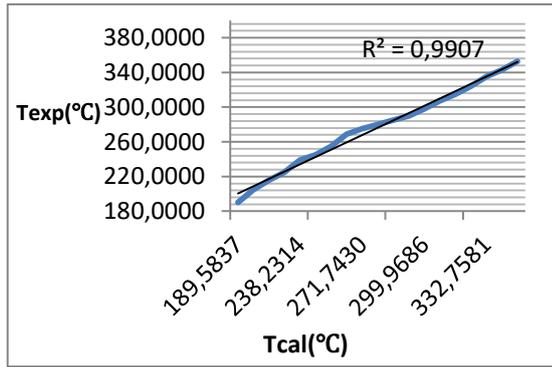
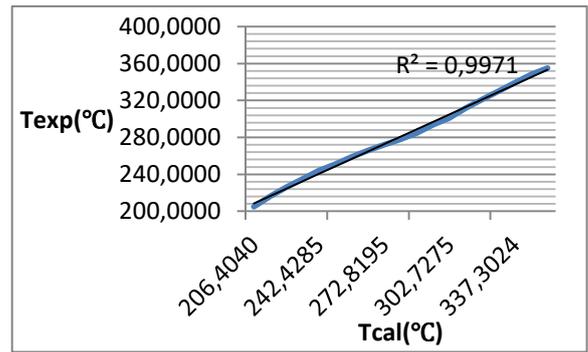
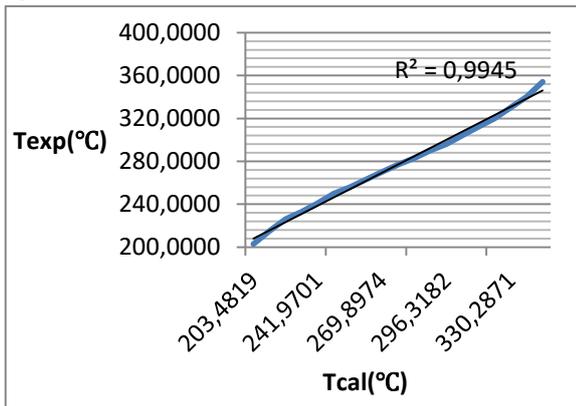
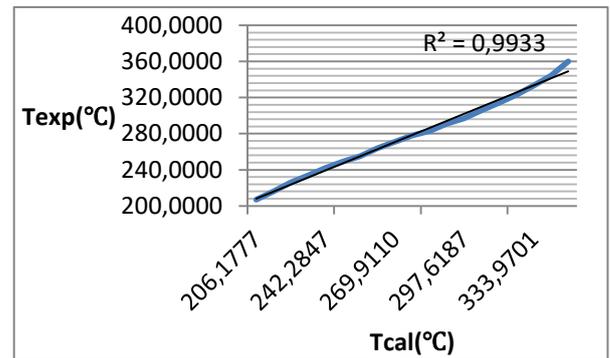
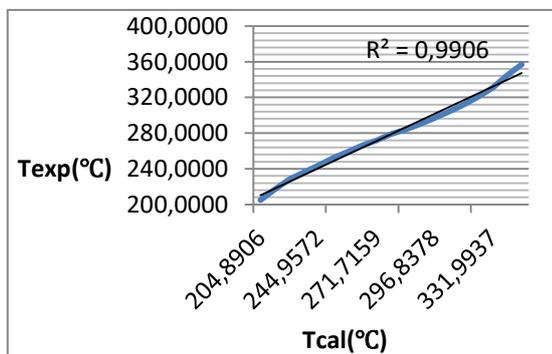
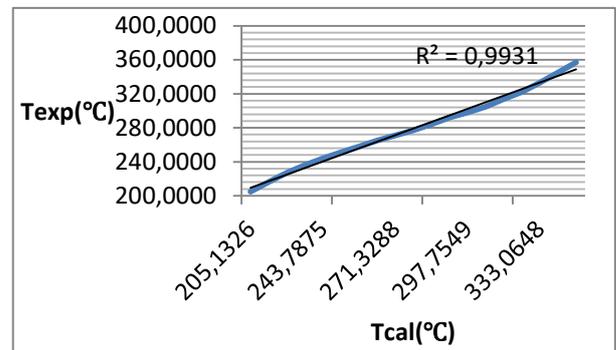


E3



E6



E7**E10****E8****E11****E9****E12**

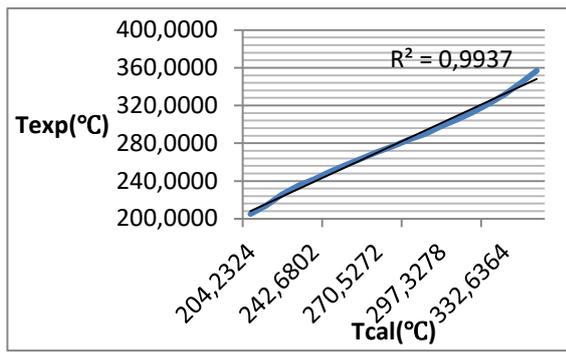
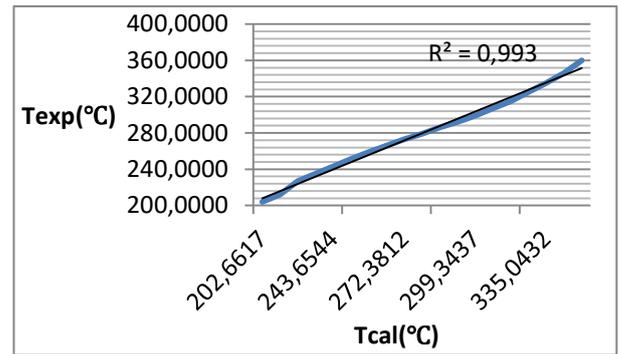
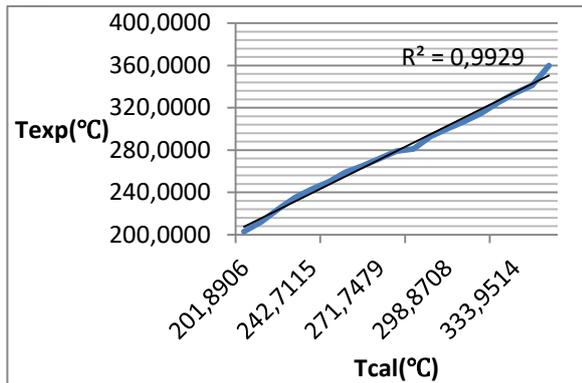
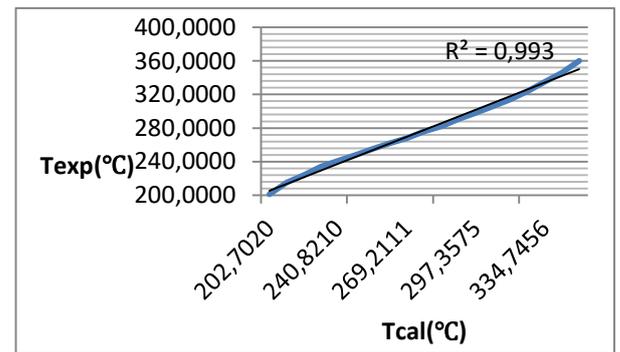
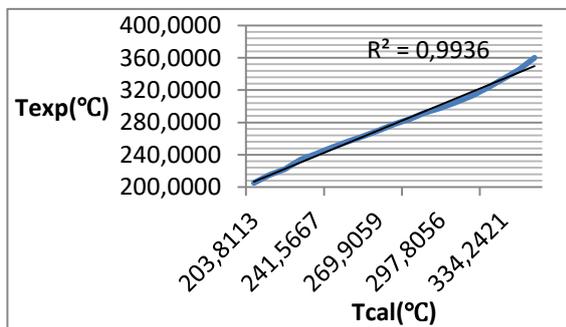
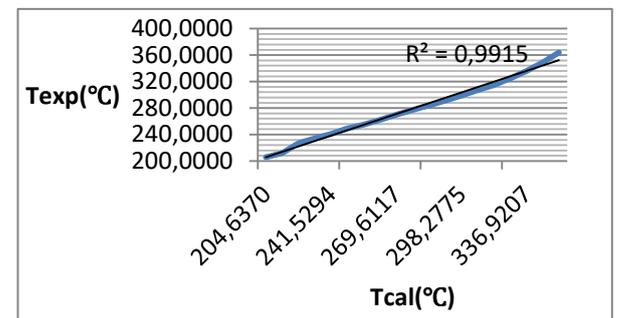
E13**E16****E14****E17****E15****E18**

Figure E : Les courbes des températures observées en fonction des températures prédites (échantillon 1 à 18).

Références

- [1]: Rabchi KH. Rezigat T. " Etude de suivi par caractérisations de la production de l'essence sans plomb", université Mohamed Boudhief M'sila, 2020.
- [2]: PRSOKOURIAKOV et A.DRABKINE«La chimie de pétrole et du gaz». Edition Moscou, 1983.
- [3]: Chitour, Chems Eddine. Raffinage: les propriétés physiques des hydrocarbures et des fractions pétrolières. Office des publications universitaires, 1999.
- [4]: Colin F., Pollution localisé des sols et des sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés, Académie de sciences, rapport N° 44, Ed. Tec et Doc, 417, 2000.
- [5]: J.-P. Favennec (1998). "Le raffinage d pétrole : exploitation et gestion de la raffinerie". Tome 5, pp. 55-126. Éditions OPHRYS, 1998.
- [6]: Perret, J., and P. Wuithier. "Pétrole brut et fractions pétrolières. 296 ed." Paris: Institut Français de Pétrole(1958).
- [7]: (Sources : Tissot & Welte, 1984 ; Selley, 1998 ; Horsfield & Larter, 2007). Juste pour la fin origine.
- [8]: Wuithier, P., "Le Pétrole, Raffinage et Génie Chimique", Tome1, Éditions. Technip, Paris, 1972.
- [9]: Uzio D., 'Catalyse a raffinage', Division catalyse-société chimique de France, 2011, pp. 1-2.
- [10]: Ministry of Energy and Mining – Algeria.
- [11]: TOCQUE E., et TRAVERS, C., (pétrole) Techniques du génie, édition (2012).
- [12]: Montage X., Guibet. J-C. "Carburant liquides : essences et carburants pour moteurs à allumage commandé «. BE 8 544 Technique de l'ingénieur, 2011, pp. 12-13.
- [13]: Motage X. " Carburants liquides : gazoles, jets fuels et autres distillats moyens". BE 8 545 v2 Technique de l'ingénieur, 2011, pp. 3-4.

- [14]: Pilorget .C, Dananche. B., Luce .D. Fevotte. J. " éléments techniques sur l'exposition professionnelle aux carburants et solvants pétroliers ". Institut de veille sanitaire, 2007, pp.6-8.
- [15]: publications Un. "2000 annuaire des statistiques de l'énergie" .Notion unies, 2002 pp. 114-117.
- [16]: Belhadri. F "Étude de la production de l'essence sans plomb, Université de Mohammed Boudiaf, Oran.
- [17]: EIA (Energy Information Administration), "Petroleum and Other Liquids", www.eia.gov.
- [18]: Total Energies, «Les différents types de carburants", www.totalenergies.com.
- [19]:Le Ministère de la Transition Écologique : "Les carburants et leur impact environnemental".
- [20]: Tomina, N. N., Pimerzin, A., Zhilkina, E. O., & Eremina, Y. V. (2009). Comprehensive analysis of diesel hydro treating feedstock.
- [21]: Complete guide to different diesel fuel grades.
- [22]: documentations sur le centre des carburants du CHIFFA (NAFTAL).
- [23]: J. Denis, J. Briant et J.C. Hipeaux, 'Physico-Chimie des Lubrifiants, Analyses et Essais', Publication de l'institut français du pétrole, Editions Technip, Paris, 1997.
- [24]: Wauquier, J.-P., "Le Raffinage du Pétrole. Pétrole brut. Produits pétroliers. Schémas de fabrication", Tome1, Éditions Technip, Paris, 1994.
- [25]: Petroleum products-Transparent and opaque liquids -Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity.
- [26]: Daubert, T. E. and Danner, R. E., "Technical Data Book-Petroleum Refining", 6th Edition, American Petroleum Institute (API), Washington, DC, 1997.
- [27]: ASTM D323 - Standard Test Method for Reid Vapor Pressure of Petroleum Products.
- [28]: ASTM D381 - Standard Test Method for Gum Content in Fuels by Jet Evaporation.
- [29]: ASTM D2699 - Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel.

- [30]: S. S. Deshpande et al. "Corrosion Engineering".
- [31]: Le Moigne, J.-L. (1990). La modélisation des systèmes complexes. Dunod. Stachowiak, Herbert (1973).
- [32]: Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *PNAS*, 99(suppl. 3), 7280–7287.
- [33] : "Applied Multivariate Statistical Analysis" par Richard A. Johnson et Dean W. Wichern.
- [34]: Investopedia - Article expliquant la corrélation dans le contexte économique et financier, notamment son rôle dans l'analyse des investissements.
- [35]: "Applied Linear Statistical Models" par Michael H. Kutner, Christopher J. Nachtsheim, John Neter, et William.
- [36]: Article : «ERREURS ET INCERTITUDES DANS LES MESURES PHYSIQUES : aspect théorique». Chapitre 3.
- [37]: Agoune. F. "Évaluation de L'endommagement des tubes dans leurs Conditions D'exploitation" Mémoire de Magister, Université Mentouri – Constantine2010.
- [38]: Sarl afa France.
- [39]: Pensky-Martens Flash Point Tester: PMA - Anton Paar.
- [40]: ASTM D 445 / ISO 3104.
- [41]: ASTM D 97 / NA 2660.
- [42]: Iso-17025-2017-exigences-de-ressources.
- [43]: Statistical modeling- an international journal.
- [44]: 'Petroleum refining' par James H. Gary, GelnnE.Handwerk et Mark J.Kaise.r.
- [45]: ASTM D86 'Standard test method for distillation of petroleum products and liquid fuels at atmospheric pressure'.
- [46]: 'Standard Handbook of petroleum and natural gas engineering' par William C.Lyons et ErleC.Dougherty.
- [47]: ISO/IEC 17025 'exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essai'.

[48]: 'Modeling the Distillation curves of crude oil fractions using polynomial regression'.

[49]: EN 590 diesel fuel specifications/nationwidefuels.co.uk.

[50]: Numerical Analysis de Burden et Faire ou 'Applied Numerical methods with MATLAB for Engineers Scientists'.