



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB BLIDA1

Faculté de Technologie

MEMOIRE DE MASTER

En Génie des procédés

Spécialité : Génie Chimique

**MODELISATION ET OPTIMISATION DES PRODUITS DE
FABRICATION DES ESSENCES SANS PLOMB**

Présenté par

Mlle. KORD Chahinez

Proposé et dirigé par :

Nom

Grade

Mr.DJAMEL EL HADI

Professeur

Promoteur

Mr.HADJ MESSAOUD REBIHA

Chef de service

Co-promoteur

Blida, juillet 2023

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mon institution académique, l'université **Saad Dahleb Blida1**, ainsi que le département de **Génie des procédés**, pour m'avoir offert cette opportunité d'approfondir mes connaissances et de réaliser ce mémoire de fin d'études.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon directeur de mémoire, le **Professeur Djamel El Hadi**, pour son accompagnement constant, ses conseils éclairés et sa disponibilité tout au long de ce projet. Son expertise, ses encouragements et son soutien inestimable ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Je tiens également à remercier chaleureusement toutes les professeures et les enseignantes du département de Génie des procédés, dont les enseignements ont façonné ma compréhension du sujet et ont nourri ma réflexion tout au long de mes études.

Un sincère remerciement à mon encadrant à la Raffinerie d'Alger, **M. Hadj Messaoud Rebiha**, pour son soutien précieux, ses conseils avisés et son expertise dans le domaine. Sa supervision attentive et ses retours éclairés ont été essentiels pour mener à bien cette recherche.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance envers les professeurs externes **Mme Rebiha**, **Mme Ezeroug**, **M. Houari** qui ont généreusement consacré leur temps et leur expertise à évaluer ce mémoire. Leurs commentaires éclairés, leurs critiques constructives et leurs suggestions précieuses ont contribué à améliorer la qualité de cette étude. Leur engagement envers l'excellence académique et leur volonté de partager leurs connaissances ont été une source d'inspiration pour moi. Je suis extrêmement reconnaissante pour leur participation et leur contribution significative à l'évaluation de mon mémoire.

Mes sincères remerciements vont également à ma mère, ma sœur, toute ma famille et mes amis proches pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leur amour. Leurs encouragements constants ont été une source de motivation essentielle dans les moments de doute et d'efforts intenses.

Je tiens également à exprimer ma sincère gratitude envers les membres du jury qui ont consacré leur temps et leur expertise pour évaluer ce mémoire. Leurs précieux

commentaires, suggestions et évaluations ont grandement enrichi ce travail de recherche. Leurs connaissances et leur engagement ont contribué à renforcer la rigueur scientifique de ce mémoire et ont été d'une valeur inestimable pour mon développement académique. Je tiens à les remercier chaleureusement pour leur dévouement et leur contribution à cette étape importante de ma formation.

Enfin, je suis reconnaissante envers toutes les personnes qui ont croisé ma route au cours de ces années d'études. Vos discussions, vos interactions et vos partages ont nourri ma réflexion, élargi mes horizons et ont contribué à ma formation en tant qu'étudiante.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers chacune des personnes mentionnées ci-dessus et à toutes celles qui ont contribué de quelque manière que ce soit à mon parcours académique. Leur soutien indéfectible restera à jamais gravé dans ma mémoire.

DEDICACE

En premier lieu, je remercie DIEU qui m'a donné la volonté et le courage d'affronter toutes les difficultés.

Je dédie ce mémoire à la mémoire de mon père bien-aimé, Redouane. Bien que tu ne sois plus physiquement présent, ton esprit, ton amour et ton héritage continuent de briller dans ma vie. Tu as été une source inépuisable d'inspiration, de force et de soutien tout au long de mon parcours académique.

À ma mère, je t'adresse mes remerciements pour ton amour, ta patience et ton soutien constant. Tu as assumé le rôle de deux parents et ta présence a été une source de réconfort et de motivation pour moi.

À ma sœur bien-aimée, Noure el houda, je te remercie d'avoir partagé ce voyage avec moi. Ton soutien inconditionnel et ton amitié précieuse ont été des éléments clés dans mon cheminement académique.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers mes amis proches, ainsi que Tante Zakia, Tante Khadidja, Tante Hafida, et mon oncle Toufik. Votre présence, vos encouragements, et les moments de rires que nous avons partagés ont allégé les défis et ont rendu ce parcours mémorable.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à mon parcours académique, aux enseignants, aux collègues et aux mentors, je vous remercie du fond du cœur. Vos conseils, votre expertise et votre soutien ont été des piliers essentiels de ma réussite.

Enfin, je tiens à rendre hommage à la mémoire de mon père, dont l'amour, les valeurs et les enseignements continuent de me guider. Tu resteras à jamais dans mon cœur et cette dédicace est une façon de te rendre hommage pour tout ce que tu as représenté dans ma vie.

Que ce mémoire soit un témoignage de ma reconnaissance envers toutes les personnes mentionnées, ainsi qu'envers mon père qui a toujours cru en moi. Votre influence a été un cadeau précieux dans mon parcours académique et dans la personne que je suis devenue.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	13
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA RAFFINERIE D'ALGER.....	15
1.1 Historique de la raffinerie.....	15
1.2 Objectif et capacité de production de la raffinerie d'Alger.....	16
1.3 Principales installations de la raffinerie.....	17
1.3.1 Unité de distillation atmosphérique "Topping" (Unité 100).....	17
1.3.2 Unité de séparation des gaz liquéfiés "gaz-plant" (unité 300).....	17
1.3.3 Parc de stockage	17
1.3.4 Unité de craquage catalytique (RCC) (U 530).....	18
1.3.5 La section MS BLOC.....	18
1.3.5.1 Unité d'hydrotraitement des naphtas NHT (U-500).....	18
1.3.5.2 Unité d'isomérisation des naphtas (U-510).....	18
1.3.5.3 Unité de reforming catalytique CCR (U-520).....	18
1.3.6 La section Sulfure BLOC.....	18
1.3.7 Les utilité.....	18
1.3.7.1 Unité de l'eau brute (unité 701).....	19
1.3.7.2 Les tours de refroidissement (Unité 710/711).....	19
1.3.7.3 Unité d'eau déminéralisée (unité 720).....	19
1.3.7.4 Unité d'eau anti incendie (Unité 741).....	19
1.3.7.5 Unité 751.....	19
1.3.7.6 Unité de production d'air (Unité 781).....	19
1.3.7.7 La torche (Unité 791).....	20
1.3.7.8 Unité de production d'azote (unité 810).....	20
1.3.7.9 Unité de polissage des condensats (unité 830).....	20
1.3.7.10 Unité de soude caustique et acide chlorhydrique (unité 840).....	20
1.3.7.11 Unité de traitement des effluents (Unité 850).....	20
1.3.8 Laboratoire.....	20
1.3.8.1 Service contrôle.....	20
1.3.8.2 Service chimie.....	21
CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	22
2.1 Généralités sur le raffinage	22
2.1.1 Définition.....	22
2.1.2 Histoire et importance économique.....	22
2.1.3 Procédé de raffinage.....	23
2.1.4 Produits pétroliers.....	23
2.2 Généralités sur l'essence.....	24
2.2.1 Définition.....	24
2.2.2 La différence entre l'essence plombée et l'essence sans plomb.....	24
2.2.3 Les caractéristiques physico-chimiques de l'essence sans plomb.....	25
2.2.4 Les propriétés antidétonantes de l'essence : « L'indice d'octane ».....	25
2.2.4.1 Définition de l'indice d'octane.....	25
2.2.4.2 La détermination de l'indice d'octane.....	25
2.2.5 La production de l'essence sans plomb.....	26
2.2.6 Nouvelles spécifications des essences.....	26

2.3 Les principales étapes impliquées dans la production des essences sans plomb.....	27
2.3.1 Unité de distillation atmosphérique «ADU» (U-100).....	27
2.3.2 Section MS-Block (Motor Sprit Block).....	30
2.3.2.1 Unité d'hydrotraitement du Naphta NHT (Unité 500).....	30
2.3.2.2 Unité d'isomérisation de Naphta léger (U-510).....	31
2.3.2.3 Unité de reformage catalytique continue du Naphta lourd CCR (U-520)....	32
2.3.3 Unité de Craquage catalytique Résiduel du fluide RFCC (U-530).....	34
2.3.4 La station de Blending (Mélange).....	35
CHAPITRE 3 : TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET MATERIAUX.....	37
3.1 Matériels utilisés.....	37
3.2 Les produits utilisés.....	39
3.3 Le choix des produits de bases pour la formulation d'essences.....	39
3.4 Méthodes utilisées.....	40
3.4.1 Protocole de préparation.....	40
3.4.2 Analyse des caractéristiques physico-chimiques des mélanges.....	41
3.5 Plans d'expérience.....	42
3.5.1 La variation des concentrations des variables de contrôle dans la formulation.....	42
3.5.2 Plan de mélange.....	43
3.5.3 Evaluation de la qualité des modèles prédictifs.....	44
3.5.4 Etude corrélative.....	45
3.5.5 Validation des modèles.....	46
3.5.5.1 Analyse des résidus.....	46
3.5.5.2 Mesure de la qualité de la prédiction- Etude du coefficient de détermination.....	46
3.5.5.3 Détermination du RMSEP et RMSPD.....	46
3.5.6 Analyse de variance.....	47
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	48
4.1 Exploitation des résultats.....	48
4.1.1 Histogrammes de Q^2 et R^2	48
4.1.2 Les réponses.....	49
4.1.3 Corrélation élaborée.....	51
4.1.4 Analyse et validation des modèles.....	55
4.1.4.1 Pour la densité.....	55
4.1.4.2 Pour la TVR.....	57
4.1.4.3 Pour le NO.....	58
4.1.5 Analyse de variances.....	60
4.1.6 Les isoréponses.....	62
4.2 Optimisation de la formulation.....	64
CONCLUSION.....	67
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	69
ANNEXE A	71
ANNEXE B.....	72
ANNEXE C.....	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	La raffinerie d'Alger RA1G.....	15
Figure 1.2	Infrastructure énergétique en Algérie.....	16
Figure 2.1	Schéma représentant le procédé de distillation atmosphérique.....	29
Figure 2.2	Schéma général de procédé d'Hydrotraitement du Naphta non traité.....	30
Figure 2.3	Schéma de section réactionnelle du procédé d'isomérisation.....	31
Figure 2.4	Illustration des 4 réacteurs en série de l'unité CCR.....	33
Figure 2.5	Schéma de Section de réaction de reforming catalytique.....	34
Figure 2.6	Schéma de Section réaction-régénération et fractionnement.....	35
Figure 3.1	Densimètre.....	38
Figure 3.2	Analyseur de vapeur.....	38
Figure 3.3	Moteur CFR Engine.....	38
Figure 3.4	Un mélange d'essence sans plomb.....	41
Figure 4.1	Histogrammes de Q^2 et R^2	48
Figure 4.2	Effets et interactions dans le modèle de densité.....	52
Figure 4.3	Visualisation graphique des coefficients du modèle de densité.....	52
Figure 4.4	Effets et interactions dans le modèle de la TVR.....	53
Figure 4.5	Visualisation graphique des coefficients du modèle de la TVR.....	53
Figure 4.6	Effets et interactions dans le modèle du NO.....	54
Figure 4.7	Visualisation graphique des coefficients du modèle NO.....	54
Figure 4.8	Répartition des résidus en fonction de la densité prévue par le modèle.....	56
Figure 4.9	Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la densité.....	56
Figure 4.10	Répartition des résidus en fonction de la TVR prévue par le modèle.....	57
Figure 4.11	Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la TVR.....	58
Figure 4.12	Répartition des résidus en fonction du NO prévue par le modèle.....	59
Figure 4.13	Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées du NO.....	59
Figure 4.14	Densité.....	62

Figure 4.15 Tension de vapeur de Reid.....	63
Figure 4.16 Indice d'octane.....	63
Figure 4.17 Formule optimale pour l'essence avec performances cibles.....	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Capacité de production annuelle de la raffinerie d'Alger.....	17
Tableau 2.1	Spécifications techniques de l'essence.....	27
Tableau 2.2	Points de fractionnement des produits de distillation atmosphérique.....	28
Tableau 3.1	Liste des instruments de mesure utilisés.....	37
Tableau 3.2	Les différents produits utilisés dans l'expérience.....	39
Tableau 3.3	Caractéristiques des produits de base utilisés dans la formulation.....	40
Tableau 3.4	Limites de concentration des variables indépendantes dans la formulation....	43
Tableau 3.5	Plans de mélange des essences sans plomb reformulées.....	44
Tableau 4.1	Évaluation de la qualité du modèle pour les variables Densité, TVR et NO..	49
Tableau 4.2	Densités des essences obtenues.....	49
Tableau 4.3	TVR des essences obtenues.....	50
Tableau 4.4	NO des essences obtenues.....	51
Tableau 4.5	L'analyse des variances pour la densité.....	60
Tableau 4.6	L'analyse des variances pour la TVR.....	61
Tableau 4.7	L'analyse des variances pour NO.....	61
Tableau 4.8	Comparaison entre les prédictions logicielles et les résultats expérimentaux des caractéristiques de l'essence optimisée.....	65

LISTE DES ABRIVIATIONS

ADU : Unité de Distillation Atmosphérique.

ANOVA: Analyse de Variance.

API: Institut Américain du Pétrole (American Petroleum Institut).

ARU : Unité de Régénération de l'Amine.

ASTM: Société Américaine pour les Tests et les Matériaux (American Society for Testing and Materials).

CCR : Reformage Catalytique Continu Régénération.

CFR: Recherche coopérative sur les carburants (Cooperative Fuel Research).

CH: Cyclohexane.

CLO : Huile Clarifiée (gazoline).

CP: Cyclopentane.

CPP : Unité Centrale de Production Propre.

CPU: Unité de Polissage des Condensats.

d_4^{15} : La Densité à 15 °C.

EAC : Eau d'Alimentation de Chaudière.

ECS: Système de Contrôle Electrique (Electrical Control System).

ETP : Unité de Traitement des Effluents (Effluent Treatment Plant).

FGATU : Unité de Traitement des Gaz Acide a l'Amine.

GPL : Gaz Pétrolier Liquéfié.

GTG: Générateur de Turbine à Gaz (Gas Turbine Generator).

HGO: Gazole lourd (Heavy Gazol).

HP: Haute Pression.

IC : Unité d'Isomérisation Catalytique.

ISO : Organisation Internationale de Normalisation.

LCO : Huile de cycle léger (Light Cycle Oil).

LGO: Gazole léger (Light Gas Oil).

MCP: Méthylcyclopentane.

MEROX : Oxydation des Mercaptans (Mercaptan Oxidation).

MODDE6 : Méthode d'estimation des dérivés directionnels (Method Of Directional Derivatives Estimation).

MON : Indice d'Octane de Moteur.

MS Block: Bloc de Moteur Sprit (Motor Sprit Block).

MTBE: Ether méthyl-tert-butyle.

NHT : Hydrotraitement du Naphta.

NO : Nombre ou indice d'octane.

NOC: Société Nationale du pétrole (National Oil Corporation).

RA1G : Raffinerie d'Alger.

RCO : Huile de craquage catalytique de résidus (Residue Catalytic Cracking Oil).

RFCC : Craquage Catalytique du Fluide Résiduel.

RMSEP : Erreur quadratique moyenne de prédiction (Root Mean Square Error of Prediction).

RMSPD : Différence moyenne quadratique en pourcentage (Root Mean Square Percentage Difference).

RON : Indice d'Octane de Recherche.

SEAL : Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger.

STG: Générateur de turbine à vapeur (Steam Turbine Generator).

SRU: Unité de Récupération du Soufre.

SWS : Unité de Stripage des Eaux Acide.

TBP : Point d'ébullition total (Total Boiling Point).

TVR : Tension de Vapeur de Reid.

WTI: Intermédiaire de l'ouest du Texas (West Texas Intermediate).

%A : Le pourcentage en aromatiques.

%N : Le pourcentage des naphènes.

%P : Le pourcentage en paraffines.

الملخص

تتطور صناعة الوقود الخالي من الرصاص باستمرار لتلبية الطلب المتزايد على المنتجات ذات الجودة العالية وصديقة للبيئة. في هذا السياق، يركز هذا العمل على نمذجة وتحسين الوقود الخالي من الرصاص. الهدف الرئيسي هو تطوير نماذج رياضية للتنبؤ بخصائصه بناءً على تراكيز المكونات المختلفة. تتكون التركيبة الأمثل من 45% من الريفورمات، و10% من الايزوميرات، و35% من الغازولين، و5% من النافثا، و5% من الإيثر الميثيلي للترترا إيثيلين. أكدت الاختبارات التجريبية أن هذه التركيبة تلي المواصفات المطلوبة، مع مؤشر الأوكتان 95، وكثافة 0.7715 كجم/م³، وضغط بخار ريد 0.722 بار.

الكلمات المفتاحية: نمذجة، تحسين، مؤشر الأوكتان، ريفورمات، ايزوميرات، إيثر الميثيلي للترترا إيثيلين.

ABSTRACT

The unleaded gasoline industry is constantly evolving to meet the increasing demand for environmentally friendly and high-quality products. In this context, this present work focuses on the modeling and optimization of unleaded gasoline. The main objective is to develop mathematical models to predict their characteristics based on the concentrations of different components. The optimal formula obtained consists of 45% reformat, 10% isomerate, 35% gasoline, 5% naphtha, and 5% MTBE. Experimental tests have confirmed that this formula meets the required specifications, with an octane rating of 95, a density of 0.7715 kg/m³, and a Reid vapor pressure of 0.722 bar.

Keywords: modeling, optimization, octane number, reformat, isomerate, mtbe.

RESUME

L'industrie des essences sans plomb évolue constamment pour répondre à la demande croissante de produits respectueux de l'environnement et de haute qualité. Dans ce contexte, ce présent travail se focalise sur la modélisation et l'optimisation des essences sans plomb. L'objectif principal est de développer des modèles mathématiques pour prédire leurs caractéristiques en fonction des concentrations des différents composants. La formule optimale obtenue se compose de 45% de reformat, 10% d'isomerat, 35% de gazoline, 5% de naphta et 5% de MTBE. Les tests expérimentaux ont confirmé que cette formule respecte les spécifications requises, avec un indice d'octane de 95, une densité de 0,7715 kg/m³ et une tension de vapeur de Reid de 0,722 bar.

Mots clés : modélisation, optimisation, indice d'octane, reformat, isomerat, mtbe.

INTRODUCTION GENERALE

Depuis l'introduction des voitures à essence au début du XXe siècle, les carburants utilisés dans ces véhicules ont connu de nombreuses modifications et améliorations. Parmi ces changements, l'introduction de l'essence sans plomb a été l'un des plus significatifs. Cette nouvelle forme de carburant a été développée dans les années 1970 pour répondre à la demande croissante de carburants respectueux de l'environnement et plus sûrs pour la santé humaine.

L'utilisation courante de ces carburants dans les voitures a rendu essentielle la mesure de leur indice d'octane pour évaluer leur qualité. Cet indice est un indicateur important de la qualité de combustion des carburants ainsi que des conditions optimales pour leur utilisation. Il est étroitement lié à l'efficacité des moteurs, qui s'améliore avec un indice d'octane plus élevé. Toutefois, des valeurs d'indice d'octane insuffisantes peuvent entraîner une détonation, tandis que des valeurs excessivement élevées peuvent causer des problèmes mécaniques et thermiques tels que des bruits de cliquetis métallique.

Les gouvernements du monde entier ont encouragé l'utilisation de l'essence sans plomb en raison de son potentiel à réduire la pollution de l'air. En effet, l'utilisation de ce carburant permet de réduire les émissions de polluants atmosphériques dangereux pour la santé humaine, tels que les particules fines, le dioxyde de soufre et l'oxyde d'azote. Cependant, l'utilisation prolongée de l'essence plombée a eu des conséquences environnementales néfastes, notamment en contribuant à la pollution atmosphérique et à la formation de smog.

Depuis son introduction, l'essence sans plomb a été largement adoptée par les consommateurs et les gouvernements à travers le monde. Selon les données de l'Agence Internationale de l'Énergie, la consommation mondiale d'essence sans plomb a atteint près de 3,5 millions de barils par jour en 2020.

Ainsi, la recherche sur l'optimisation des carburants sans plomb a connu une forte croissance ces dernières décennies, pour améliorer l'efficacité énergétique des moteurs tout en réduisant leur impact environnemental. Cette recherche vise à produire des essences sans plomb à haut indice d'octane qui répondent aux normes environnementales en vigueur dans chaque pays, tout en offrant des performances optimales pour les véhicules.

Il est important de souligner que la production d'essence sans plomb peut varier en fonction des réglementations et des normes environnementales propres à chaque pays. Par conséquent, les processus de production peuvent différer légèrement en fonction de l'emplacement des raffineries.

Dans ce contexte, ce travail se concentre sur la modélisation et l'optimisation des produits de fabrication des essences sans plomb. L'objectif de ce travail est de produire des essences sans plomb à haut indice d'octane (supérieur à 91) pour différentes compositions de matières premières nécessaires à leur préparation, de manière à assurer des conditions de stockage et de transport optimales tout en respectant les normes d'hiver et d'été pour leurs caractéristiques.

Ce travail de recherche est structuré en une introduction générale, quatre chapitres distincts et une conclusion générale. Le premier chapitre présente le lieu du stage et met en évidence les principaux intérêts de la raffinerie d'Alger (RA1G) ainsi que les installations clés dont elle dispose. Le deuxième chapitre présente une étude bibliographique sur le raffinage et l'essence, en détaillant les principales étapes impliquées dans la production de l'essence sans plomb. Le troisième chapitre décrit les matériels, les techniques expérimentales utilisées et les matériaux utilisés dans le cadre de l'étude. Enfin, le dernier chapitre présente les résultats obtenus et les discussions qui en découlent, en proposant également des perspectives pour des recherches futures dans ce domaine.

CHAPITRE 1

PRESENTATION DE LA RAFFINERIE D'ALGER

Introduction

Une raffinerie est une installation industrielle qui se compose de processus unitaires de génie chimique et d'opérations unitaires, permettant de transformer des matières premières en produits à haute valeur ajoutée ou de raffiner des matériaux bruts.

Ce chapitre présentera brièvement la raffinerie d'Alger RA1G en fournissant des informations sur son historique, son objectif et capacité de production, ainsi que ses différentes installations et unités.



Figure 1.1 La raffinerie d'Alger RA1G.

1.1 Historique de la raffinerie :

La raffinerie d'Alger fut créée en décembre 1959 suite à la découverte du pétrole au sud algérien en septembre 1959. Bien que le chantier fût ouvert en janvier 1960, le démarrage de la raffinerie n'a eu lieu que le 19 janvier 1964 par un groupe de compagnies étrangères.

Le coût de construction est estimé à 210 millions dinars, dont 170 millions par les installations et 40 millions de frais établis et autres. Avant 1971, l'alimentation de la raffinerie était par tankers du pétrole de Bejaia au port pétrolier d'Alger, ensuite par pipe de 26 pouces jusqu'au parc de stockage. Un piquage a eu lieu à béli Mansour à partir de pipe reliant Hassi-Messaoud –Bejaia ; un oléoduc de 18 pouces d'une longueur de 131 Km jusqu'à la raffinerie avec un débit de 500 m³ /h [1].

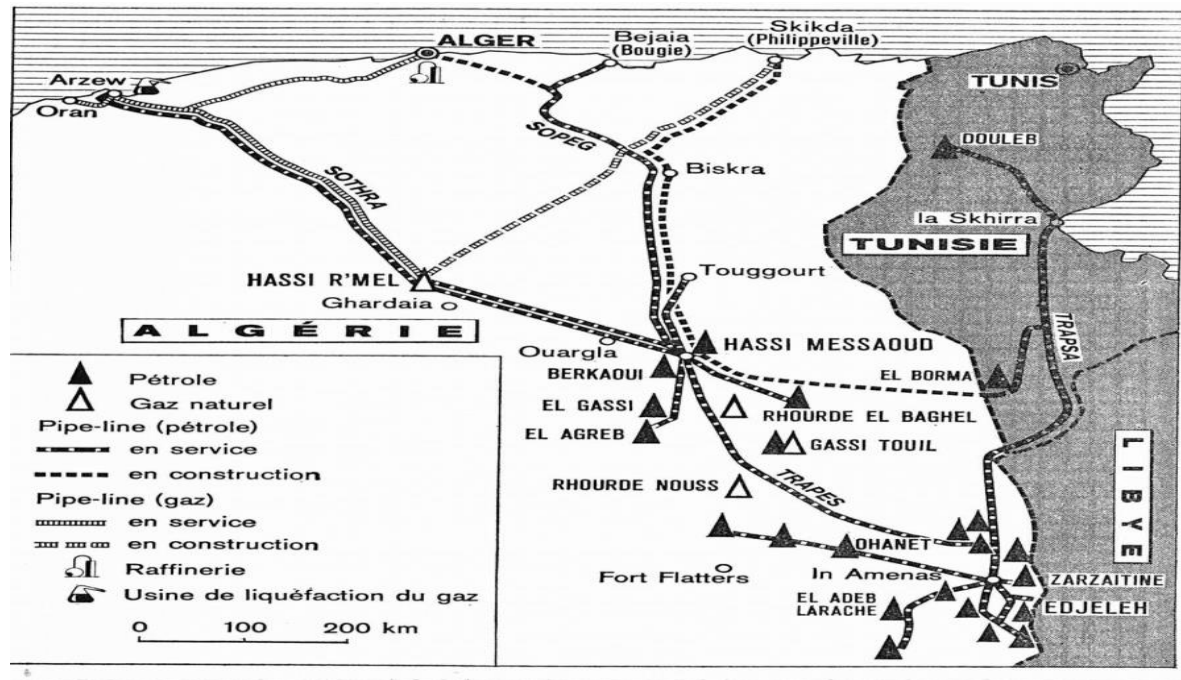


Figure 1.2 Infrastructure énergétique en Algérie.

En ce qui concerne le choix de la région algéroise, elle se présente comme un pôle futur de développement industriel. En plus, elle a l'avantage d'être le plus grand centre de consommation avec une part de 40 à 50% de la demande intérieure. Ce qui revient à dire que la production à partir de la raffinerie d'Alger sera moins coûteuse que celle venant des autres raffineries. Actuellement, un programme de réhabilitation de la raffinerie est mis en place, avec quatre nouvelles unités (RFCC, CCR, IC, NHT). Cette réhabilitation consiste entre autres à augmenter la production du gasoil et des essences sans plomb pour les besoins de la Région Centre [1].

1.2 Objectif et capacité de production de la raffinerie d'Alger :

L'objectif de la raffinerie d'Alger est de transformer le pétrole brut de Hassi Messaoud en produits de première nécessité et en divers produits destinés à l'industrie pétrolière.

La gamme de produits de la raffinerie est en conformité avec les normes nationales et internationales. (Tableau 1.1).

La capacité de production de la raffinerie d'Alger est de 3.5 millions tonnes/an.

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

Produit	Production annuelle (tonnes)
Reformat	603333
Isomérat	364333
Naphta (exportation)	76000
Fuel oil	60000
Propane	69333
Butane	209667
Essence sans plomb	1 357 000
Gasoline	376000
Kérosene	620666
Gasoil	1261667

1.3 Principales installations de la raffinerie :

La raffinerie comporte les installations de production suivante :

1.3.1 Unité de distillation atmosphérique "Topping" (Unité 100) :

D'une capacité de 3.5 millions de tonnes par an qui est destinée à séparer les différents produits pétroliers [2].

1.3.2 Unité de séparation des gaz liquéfiés "gaz-plant" (unité 300) :

Elle a pour objectif de séparer le mélange de gaz (GPL) en produits liquides finis qui sont le propane et le butane [2].

1.3.3 Parc de stockage :

Composé de 53 réservoirs cylindriques d'une capacité totale de 474500 m³ pour le stockage des différents produits. Et de 9 réservoirs sphériques d'une capacité de 15106 m³ pour le stockage du propane et du butane [3].

1.3.4 Unité de craquage catalytique (RFCC) (U 530) :

Conçue pour traiter 1MT par an à partir du résidu atmosphérique obtenu dans l'unité de distillation atmosphérique (unité 100), à l'aide d'un procédé de craquage catalytique à haute température [4].

1.3.5 La section MS BLOC : Elle se décompose en trois unités :

1.3.5.1 Unité d'hydrotraitement des naphthas NHT (U-500) :

L'unité 500 est une unité d'hydrotraitement des naphthas, permettant d'obtenir différentes coupes de naphta débarrassées de multiples composés tels que l'eau, les halogènes, les sulfures, le nitrogène, les oléfines et dioléfines, le mercure, l'arsenic, etc. pouvant altérer l'efficacité des catalyseurs utilisés dans les unités aval d'isomérisation et de reforming CCR [5].

1.3.5.2 Unité d'isomérisation des naphthas (U-510) :

Cette unité sert à l'isomérisation des naphthas, c'est-à-dire à la transformation des C5 et C6 en leurs isomères, afin d'obtenir un produit à haut indice d'octane utilisé dans les sections de mélanges pour obtenir les essences commerciales produites par la raffinerie [6].

1.3.5.3 Unité de reforming catalytique CCR (U-520) :

L'unité de Reforming CCR a été installée en vue de remplacer l'unité de reforming catalytique, car elle permet d'obtenir un meilleur rendement et un produit à indice d'octane élevé [7].

A l'aide d'un catalyseur, cette unité a pour but de produire un naphta à haut indice d'octane, afin de le mélanger et obtenir des essences à fort indice d'octane [7].

1.3.6 La section Sulfure BLOC : Elle se décompose en quatre unités [8] :

- a- Unité de traitement des gaz acide (fuel-gaz) à l'amine (Unité-560-FGATU).
- b- Unité de stripage des eaux acide (Unité-570-SWS).
- c- Unité de régénération de l'amine (Unité-580-ARU).
- d- Unité de récupération du Soufre (Unité-590-SRU).

1.3.7 Les utilités : Elle se compose des unités suivantes :

1.3.7.1 Unité de l'eau brute (unité 701) :

L'unité d'eau brute 701 reçoit l'eau brute des puits de forage situés à l'intérieur de la raffinerie et peut également être alimentée en eau de SEAL par un pipeline. L'unité d'eau brute 701 distribue l'eau aux différents utilisateurs de la raffinerie [9].

1.3.7.2 Les tours de refroidissement (Unité 710/711) :

Cette unité fournit de l'eau de refroidissement aux utilisateurs au sein de la raffinerie et est alimentée par l'unité d'eau brute 701.

1.3.7.3 Unité d'eau déminéralisée (unité 720) :

Cette unité reçoit de l'eau brute provenant de l'unité d'eau brute 701 située au sein de la raffinerie et traite cette eau pour la convertir en eau déminéralisée [11].

1.3.7.4 Unité d'eau anti incendie (Unité 741).

1.3.7.5 Unité 751 :

Les systèmes de vapeur et d'eau d'alimentation de chaudière font partie des nouvelles installations pour la raffinerie d'Alger, et sont désignés sous l'appellation d'unité CPP 751 (centrale de production propre, ou centrale électrique dédiée, c'est-à-dire de production d'électricité pour consommation propre). Cette unité est conçue pour fournir de la vapeur aux consommateurs dans les installations des unités de procédés et pour produire une eau d'alimentation de chaudière (EAC) de qualité utilisée en interne par les nouvelles chaudières mais aussi fournie sous forme d'EAC haute pression (HP) à différentes unités de la raffinerie. En outre, le complexe est équipé d'un turbogénérateur à gaz (Gas Turbine Generator, GTG) et d'un turbogénérateur à vapeur (Steam Turbine Generator, STG) raccordés au système de contrôle-commande électrique (Electrical Control System, ECS) et qui couvrent les besoins électriques de l'ensemble de la raffinerie [12].

1.3.7.6 Unité de production d'air (Unité 781) :

L'air comprimé est nécessaire dans la raffinerie pour les besoins suivants : En tant qu'air pour les instruments pour le fonctionnement des instruments utilisés dans l'installation ainsi que pour purger certains tableaux de commande. Et en tant qu'air comprimé pour les robinets d'incendie, pour la régénération catalytique, pour le décokage des fours, etc [13].

1.3.7.7 La torche (Unité 791) :

Le système de torchère collecte et élimine en toute sécurité les flux de décharge d'hydrocarbures gazeux de la raffinerie d'Alger, ainsi que les liquides entraînés ou condensés à l'intérieur des conduites de la torchère [1].

1.3.7.8 Unité de production d'azote (unité 810) :

L'unité de production d'azote consiste en une unité de production d'azote gazeux et liquide avec des installations associées de stockage et de vaporisation de l'azote liquide [14].

1.3.7.9 Unité de polissage des condensats (unité 830) :

Une (CPU) est installée au sein des nouvelles unités de fluides de la raffinerie d'Alger. Cette unité est une installation centralisée de traitement des condensats pollués générés par diverses unités de traitement de la raffinerie. Les condensats purifiés provenant de l'unité CPU (U-830) sont renvoyés vers le désaérateur de la nouvelle unité CPP (U-751) [15].

1.3.7.10 Unité de soude caustique et acide chlorhydrique (unité 840) :

Le système de soude caustique est prévu pour satisfaire les exigences de la raffinerie [16].

1.3.7.11 Unité de traitement des effluents (Unité 850) :

L'objectif de cette unité est le traitement de toutes les eaux usées générées par l'exploitation de la raffinerie. Les eaux usées sont collectées et traitées dans la nouvelle station de traitement des effluents (ETP) [17].

1.3.8 Laboratoire :

Le laboratoire effectue sur les différents produits intermédiaires ou finis, un certain nombre de tests classiques à fin de contrôler les spécifications des produits pétroliers selon les normes et détecter les anomalies de fonctionnement du process pour optimiser les paramètres. Le département laboratoire fait partie de la sous-direction technique et il est composé de deux services :

1.3.8.1 Service contrôle :

Comme son nom l'indique, elle est chargée de contrôler la qualité des produits et effectue pour cela différents types d'analyses :

- La distillation permettant de vérifier le point initial et le point final de la coupe pétrolière.

- La mesure de la densité.
- La vérification des points suivantes : congélation, trouble, et point d'éclair du gasoil et du kérosène ou/et jet A1.
- La mesure de la conductibilité de kérosène et/ou jet A1.
- La vérification de la couleur de certains produits.
- La mesure de l'indice des essences à l'aide d'un moteur CFR.

1.3.8.2 Service chimie :

Elle est chargée d'effectuer des analyses qualitatives et quantitatives sur les différents produits finis et sur les eaux de procès [18].

Conclusion :

La principale mission de la raffinerie est de maintenir la production de produits de première nécessité et d'autres produits pétroliers conformes aux normes nationales et internationales.

CHAPITRE 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction :

Ce chapitre présente le raffinage, les essences et les étapes de production associées. Nous aborderons les principes du raffinage, l'importance des essences en tant que carburants, et les étapes clés de production, de prétraitement du pétrole brut à la séparation des fractions d'essences. Cette vue d'ensemble nous aidera à comprendre les défis, les opportunités et les considérations environnementales liées à l'industrie des essences.

2.1 Généralités sur le raffinage :

2.1.1 Définition :

Le raffinage du pétrole est l'ensemble des opérations qui, à partir d'une matière première d'origine pétrolière, le pétrole brut, ont pour but d'obtenir des fractions liquides utilisables par l'industrie chimique et les différents secteurs de l'économie : transport, chauffage, électricité... etc [19].

En résumé, le raffinage du pétrole est un processus industriel qui permet de transformer le pétrole brut en différentes fractions liquides telles que l'essence, le diesel, le fioul, le kérosène, etc., qui sont ensuite utilisées dans diverses applications industrielles et énergétiques [20].

2.1.2 Histoire et importance économique :

L'histoire du raffinage du pétrole remonte au XIXe siècle, lorsque les premières raffineries ont été construites aux États-Unis et en Europe [21].

Selon Roberts (2012), le raffinage du pétrole a commencé au 19ème siècle avec l'invention de la lampe à huile, mais les premières raffineries modernes ont été érigées aux États-Unis dans les années 1860 en réponse à la demande croissante de produits pétroliers tels que le kérosène pour l'éclairage. Au fil des décennies, l'industrie du raffinage s'est développée pour devenir un élément clé de l'industrie pétrolière et de l'économie mondiale (Roberts, 2012) [21].

Le raffinage du pétrole est une activité économique cruciale qui fournit une gamme de produits énergétiques pour les transports, l'agriculture, l'industrie et la production d'électricité. L'industrie du raffinage est également une source importante d'emplois directs et indirects, de recettes fiscales et de revenus pour les entreprises et les États. En 2019, l'industrie du raffinage des États-Unis a généré environ 131 milliards de dollars de revenus et a employé directement plus de 50 000 personnes et indirectement plus de 500 000 personnes [22].

2.1.3 Procédé de raffinage :

Le procédé de raffinage du pétrole est un processus complexe qui implique plusieurs étapes de traitement du pétrole brut pour produire différentes fractions de produits pétroliers tels que l'essence, le diesel, le fioul, le kérosène, etc. Selon Perrin (2019), les principales étapes du raffinage sont :

- **La distillation** : c'est la première étape du raffinage, qui consiste à chauffer le pétrole brut à haute température pour le faire bouillir. Les différentes fractions de produits pétroliers se séparent alors selon leur point d'ébullition.
- **Le craquage** : c'est une étape où les molécules de produits pétroliers plus lourds sont brisées en molécules plus légères, afin d'augmenter la production de produits tels que l'essence.
- **Le reformage** : c'est une étape où les molécules de produits pétroliers sont réarrangées pour produire des produits tels que l'essence à indice d'octane élevé.
- **L'hydrotraitement** : c'est une étape où les produits pétroliers sont traités avec de l'hydrogène pour éliminer les impuretés et améliorer leur qualité.

Le procédé de raffinage peut également inclure d'autres étapes, telles que la désulfuration, la déshydratation, l'isomérisation, etc., en fonction des besoins de production de différents produits pétroliers [20].

2.1.4 Produits pétroliers :

Les produits pétroliers raffinés peuvent être divisés en deux grandes catégories : les carburants et les produits non-carburants. Les carburants comprennent l'essence, le diesel, le kérosène et le gaz de pétrole liquéfié (GPL), tandis que les produits non-carburants incluent le fioul lourd, le bitume, le lubrifiant, les cires, les graisses et les huiles minérales.

La production de chaque produit raffiné dépend du type de pétrole brut utilisé, ainsi que du type de traitement et de raffinage appliqué. Par exemple, la production d'essence nécessite un raffinage plus poussé que la production de fioul lourd.

Les carburants sont les produits raffinés les plus importants en termes de volume de production et de consommation. L'essence est le principal carburant utilisé pour les voitures, tandis que le diesel est principalement utilisé pour les camions et les véhicules utilitaires. Le kérosène est principalement utilisé pour l'aviation, tandis que le GPL est principalement utilisé pour le chauffage et la cuisine résidentiels.

Les produits non-carburants ont également une grande importance économique et sont utilisés dans une variété d'applications, telles que la construction, l'asphaltage, la fabrication de plastiques, la production d'électricité et les lubrifiants pour machines.

La qualité des produits pétroliers est réglementée par des normes strictes pour garantir leur sécurité et leur efficacité. Ces normes sont définies par des organismes tels que l'American Petroleum Institute (API) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO) [23].

2.2 Généralités sur l'essence :

2.2.1 Définition :

L'essence est un produit pétrolier liquide utilisé comme carburant pour les moteurs à combustion interne. Elle est également connue sous le nom de gazoline ou de benzène. L'essence sans plomb est une variante de l'essence qui ne contient pas de plomb tétraéthyle, un additif autrefois couramment utilisé pour améliorer l'indice d'octane et la performance de l'essence.

2.2.2 La différence entre l'essence plombée et l'essence sans plomb :

La principale différence entre l'essence plombée et l'essence sans plomb est donc la présence ou l'absence de plomb tétraéthyle. Les normes environnementales ont conduit à l'abandon de l'utilisation du plomb dans l'essence dans de nombreux pays, car il a été constaté que le plomb pouvait provoquer des problèmes de santé, tels que des troubles neurologiques, chez les personnes exposées à de fortes concentrations de plomb.

En dehors de cela, l'essence plombée et l'essence sans plomb ont des propriétés similaires, telles que leur densité, leur indice d'octane et leur teneur en soufre. Les deux peuvent être utilisées dans les mêmes moteurs à combustion interne, bien que certains

moteurs plus anciens conçus pour l'essence avec plomb puissent nécessiter des ajustements pour fonctionner correctement avec de l'essence sans plomb [24].

2.2.3 Les caractéristiques physico-chimiques de l'essence sans plomb :

L'essence sans plomb a des caractéristiques physico-chimiques différentes de l'essence plombée en raison de l'absence de tétraéthyle de plomb dans sa composition. Selon Speight (2019), les principales différences sont les suivantes :

- **Point d'ébullition** : l'essence sans plomb a un point d'ébullition plus bas que l'essence plombée, ce qui signifie qu'elle s'évapore plus facilement à basse température.
- **Indice d'octane** : l'essence sans plomb a un indice d'octane plus élevé que l'essence plombée, ce qui signifie qu'elle résiste mieux à la combustion spontanée et permet des taux de compression plus élevés.
- **Couleur** : l'essence sans plomb est incolore ou jaune pâle, tandis que l'essence plombée a une couleur rouge ou verte en raison de la présence de colorants.
- **Propriétés antidétonantes** : l'essence sans plomb contient des additifs antidétonants, tels que le MTBE ou l'éthanol, pour améliorer la combustion et réduire les émissions polluantes.
- **Pollution de l'air** : l'essence sans plomb produit moins de plomb et d'autres polluants atmosphériques que l'essence plombée, ce qui en fait un carburant plus respectueux de l'environnement [24].

2.2.4 Les propriétés antidétonantes de l'essence : « L'indice d'octane »

2.2.4.1 Définition de l'indice d'octane :

Les propriétés antidétonantes de l'essence sont mesurées par son indice d'octane, qui est une mesure de la résistance de l'essence à la détonation. Plus l'indice d'octane est élevé, plus l'essence est résistante à la détonation. Cette résistance est importante pour les moteurs à combustion interne, car une détonation prématurée peut causer des dommages au moteur. L'essence sans plomb a généralement un indice d'octane plus élevé que l'essence plombée, ce qui la rend plus adaptée aux moteurs à haute compression. L'indice d'octane est déterminé par des tests en laboratoire selon des normes telles que ASTM D2699 et ASTM D2700 [24].

2.2.4.2 La détermination de l'indice d'octane :

L'indice d'octane est déterminé en comparant la performance d'un carburant à celle d'un mélange de deux hydrocarbures, l'iso-octane et le heptane, qui ont des propriétés antidétonantes connues. L'indice d'octane d'un carburant est alors calculé en fonction de la

proportion de ces deux hydrocarbures dans le mélange qui produit une performance équivalente.

L'indice d'octane est généralement exprimé en deux valeurs : l'indice d'octane de recherche (RON) et l'indice d'octane de moteur (MON). L'indice RON est déterminé à partir d'un moteur à régime modéré, tandis que l'indice MON est déterminé à partir d'un moteur à régime élevé. La plupart des carburants vendus dans le monde entier sont évalués selon l'indice RON [24].

2.2.5 La production de l'essence sans plomb :

La production d'essence sans plomb implique plusieurs étapes de raffinage du pétrole brut. La première étape consiste en la distillation atmosphérique, qui sépare le pétrole brut en fractions légères et lourdes. La fraction légère qui est destinée à la production d'essence est ensuite soumise à un traitement de craquage catalytique, qui la transforme en hydrocarbures plus légers et plus volatils. Ces hydrocarbures sont ensuite soumis à une seconde étape de traitement appelée reformage catalytique, qui transforme les molécules d'hydrocarbures en composés plus complexes et plus stables avec des indices d'octane plus élevés.

Le reformage catalytique est une étape clé dans la production d'essence sans plomb, car il permet d'augmenter l'indice d'octane de l'essence en transformant les molécules d'hydrocarbures en composés plus stables et plus riches en hydrogène. Les hydrocarbures issus du reformage catalytique sont ensuite traités dans une unité de désulfuration pour éliminer les impuretés soufrées, qui peuvent endommager les convertisseurs catalytiques des voitures.

Enfin, l'essence sans plomb est mélangée à des additifs tels que des antioxydants, des stabilisateurs et des agents mouillants pour améliorer ses propriétés physico-chimiques, telles que la résistance à l'oxydation, la stabilité thermique et la lubrification. Ce mélange final est ensuite stocké dans des réservoirs de stockage et distribué aux stations-service pour la vente aux consommateurs [23].

2.2.6 Nouvelles spécifications des essences :

Les spécifications techniques de l'essence incluent des paramètres tels que la densité, la teneur en vapeur de Reid (TVR), la distillation, les résidus, les tests de corrosion, la teneur en plomb, la teneur en soufre et d'autres propriétés. Chaque spécification a des limites

définies et est mesurée à l'aide de méthodes d'essai spécifiques. Ces spécifications garantissent la qualité, la performance et la sécurité de l'essence utilisée dans les véhicules.

Le tableau suivant (Tableau 2.1) représente les spécifications techniques de l'essence publiée par SONATRACH en 24 juin 2021 [1].

Tableau 2.1 Spécifications techniques de l'essence.

Caractéristiques	Unité	Méthode d'essai	Limites
Densité	A 15°C	NA 417	Entre 0,72 et 0,775
TVR Hiver	-	NA 422	0,8 Max
TVR ETE	-	NA 422	0,65 Max
Distillation 10%	°C	NA 1415	70 Max
Distillation 50%	°C	NA 1415	140 Max
Distillation 95%	°C	NA 1415	195 Max
Distillation PF	°C	NA 1415	210 Max
Résidus	% v/v	NA 1415	2 Max
Doctor test	-	NA 8115	Négatif
Corrosion lame de cuivre	-	NA 566	1 Max
Gomme actuelle	MG/100ML	NA 2654	10 Max
Nombre d'Octane Recherche	-	NA 2653	91 Min
Teneur en plomb	G/L	NA 2803	0,020 Max
Teneur en soufre	%	NA 2810	0,1 Max

2.3 Les principales étapes impliquées dans la production des essences sans plomb :

Introduction :

La production de l'essence sans plomb nécessite plusieurs étapes. Tout d'abord, le pétrole brut est fractionné pour isoler l'essence. Ensuite, cette dernière est soumise à un processus de reformage catalytique pour augmenter son indice d'octane. Pour remplacer le plomb tétraéthyle, des additifs sont ajoutés à l'essence avant d'être mélangée pour assurer une distribution homogène. Enfin, l'essence est stockée et distribuée pour être mise à la disposition des consommateurs.

Au sein d'une raffinerie, la transformation du pétrole brut en produits finis nécessite le respect de processus rigoureux, qui comprennent plusieurs opérations :

2.3.1 Unité de distillation atmosphérique «ADU» (U-100) :

L'unité de distillation atmosphérique a pour but de fractionner le pétrole brut en différentes fractions de distillat qui peuvent être employées dans d'autres processus de

raffinage. En permettant la séparation des divers composants du pétrole brut, cette unité est essentielle pour obtenir des produits raffinés conformes aux normes de sécurité et environnementales. Les produits finis obtenus peuvent être utilisés pour des applications variées, comme la production d'énergie pour les transports, l'industrie et les besoins domestiques en chauffage [25].

Dans cette unité de distillation atmosphérique, plusieurs fractions sont produites, notamment :

- Des fractions légères telles que l'effluent gazeux et le GPL, qui sont destinés à être utilisés dans l'unité de gaz-plant (U-300).
- Du naphta total qui est destiné à l'unité d'hydrotraitement du naphta NHT (U-500).
- Du kérosène qui est stocké.
- Du gazole léger qui est également stocké.
- Du gazole lourd et du résidu atmosphérique qui sont destinés à l'unité de craquage catalytique des fluides résiduels (U-530) [25].

Tableau 2.2 Points de fractionnement des produits de distillation atmosphérique.

Produit	Point de fractionnement TBP
Naphta stabilisé	35 – 140 °C
Kérosène I	140 – 165 °C
Kérosène II	165 – 240 °C
Gazole léger	240 – 345 °C
Gazole lourd	345 – 365 °C
Résidu atmosphérique	365 °C et plus

✓ **Description du procédé :**

Le processus de traitement du pétrole brut implique plusieurs étapes essentielles. Tout d'abord, le pétrole brut est chauffé progressivement dans un four, atteignant des températures comprises entre 350 et 400 °C, tout en veillant à éviter le craquage du pétrole. Ce processus est rendu possible grâce à l'utilisation de quatre trains de préchauffage. Ensuite, le pétrole passe par un dessaleur, situé entre le premier et le deuxième train de préchauffage, afin d'éliminer les sels et l'eau présents dans le pétrole. Pour maintenir la température du pétrole à chaque étape de préchauffage, des échangeurs de chaleur sont utilisés. Une fois chauffées, les vapeurs de pétrole sont acheminées vers une colonne de distillation qui contient plusieurs plateaux. Chaque plateau correspond à une fraction de distillation spécifique, appelée coupe

pétrolière. Enfin, des condenseurs sont positionnés à la sortie de chaque plateau pour faciliter la récupération de chaque fraction de distillation.

Ces étapes permettent de séparer le pétrole brut en différentes fractions de distillat, qui peuvent être utilisées dans d'autres unités de traitement pour produire des produits finis de haute qualité [25].

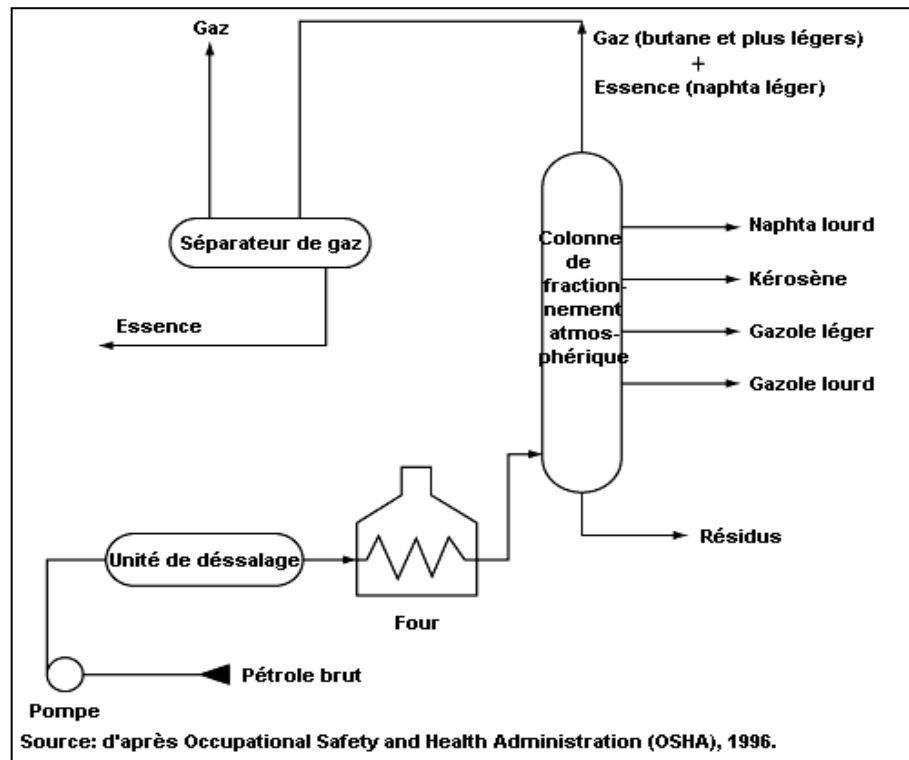


Figure 2.1 Schéma représentant le procédé de distillation atmosphérique.

Avant d'effectuer l'hydrotraitement, il est essentiel de réaliser une analyse du naphta afin de vérifier qu'il satisfait les normes relatives aux métaux, au soufre et à l'eau. La présence de ces éléments en concentration élevée peut entraîner la formation de coke sur le catalyseur, ce qui perturbe le fonctionnement des processus de traitement. Les contaminants peuvent être classés en deux catégories : les poisons temporaires, comme le soufre et l'azote, et les poisons permanents, tels que les métaux. Ces derniers sont éliminés par un prétraitement agissant comme un filtre pour protéger les catalyseurs utilisés dans les processus de reformage et d'isomérisation. L'élimination des métaux se produit par adsorption à la surface

du catalyseur. Pour optimiser le fonctionnement du catalyseur, il est recommandé de retirer la couche supérieure de 30 cm de concentré de contaminants après chaque régénération [1].

2.3.2 Section MS-Block (Motor Sprit Block):

Le naphta total produit à partir de la distillation atmosphérique a un indice d'octane inférieur à 60 de RON, ce qui le rend peu valorisable. Afin d'optimiser sa valeur, une étape d'hydrotraitement est requise pour améliorer son indice d'octane. Cette étape se déroule dans l'unité d'hydrotraitement (NHT) de l'usine, où le naphta est traité et séparé en deux produits distincts selon la figure suivante : un naphta léger et un naphta lourd. Le naphta léger est utilisé pour produire de l'isomérat dans l'unité d'isomérisation (U-510), tandis que le naphta lourd est utilisé pour produire du reformat dans l'unité de reforming catalytique (U-520). Les parties restantes de chaque produit sont stockées pour une utilisation ultérieure.

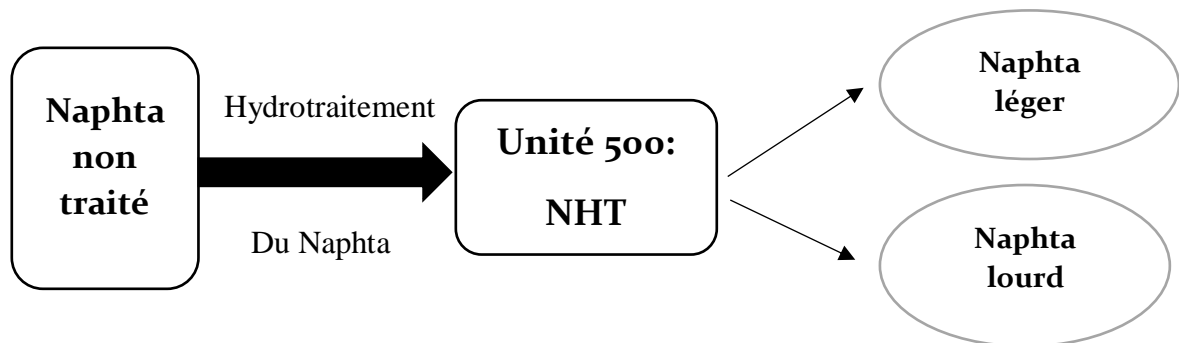


Figure 2.2 Schéma général de procédé d'hydrotraitement du Naphta non traité.

Il y a trois unités distinctes dans la section MS Block :

2.3.2.1 Unité d'hydrotraitement du Naphta NHT (Unité 500) :

Le but de cette unité est d'effectuer l'hydrotraitement du naphta total afin de produire des charges hydrotraitées propres, présentant une faible teneur en contaminants tels que l'eau, le soufre, les métaux et l'azote [5].

✓ Description du procédé :

Le processus d'hydrotraitement du naphta comprend trois étapes clés. Tout d'abord, nous avons la section de réaction où le naphta est introduit dans un réacteur contenant un lit catalytique. Dans cette étape, en présence d'hydrogène, les impuretés soufrées et nitrées présentes dans le naphta sont transformées en composés tels que le H₂S et le NH₃.

Ensuite, nous passons à la section de stripper, où l'objectif principal est d'optimiser la séparation des composés hydrogénés, de l'eau et du naphta traité. Cette étape permet de purifier davantage le naphta en éliminant les substances indésirables.

Enfin, nous arrivons à la section de splitter. Ici, le naphta total traité est soumis à une séparation en deux fractions distinctes : le naphta léger et le naphta lourd. Cette séparation est réalisée en fonction des propriétés physico-chimiques des composés présents dans le naphta, permettant ainsi d'obtenir différentes qualités de produits finaux [5].

2.3.2.2 Unité d'isomérisation de Naphta léger (U-510) :

L'unité d'isomérisation de naphta léger est conçue pour convertir les n-paraffines en iso-paraffines. Les réactions chimiques impliquent principalement des processus d'isomérisation et de craquage, qui se produisent en présence d'un catalyseur solide spécifique à base de platine sur alumine. Le processus permet d'obtenir un produit final d'une qualité supérieure avec un indice d'octane élevé, adapté à une utilisation en carburant dans les moteurs à allumage par étincelle [27,28].

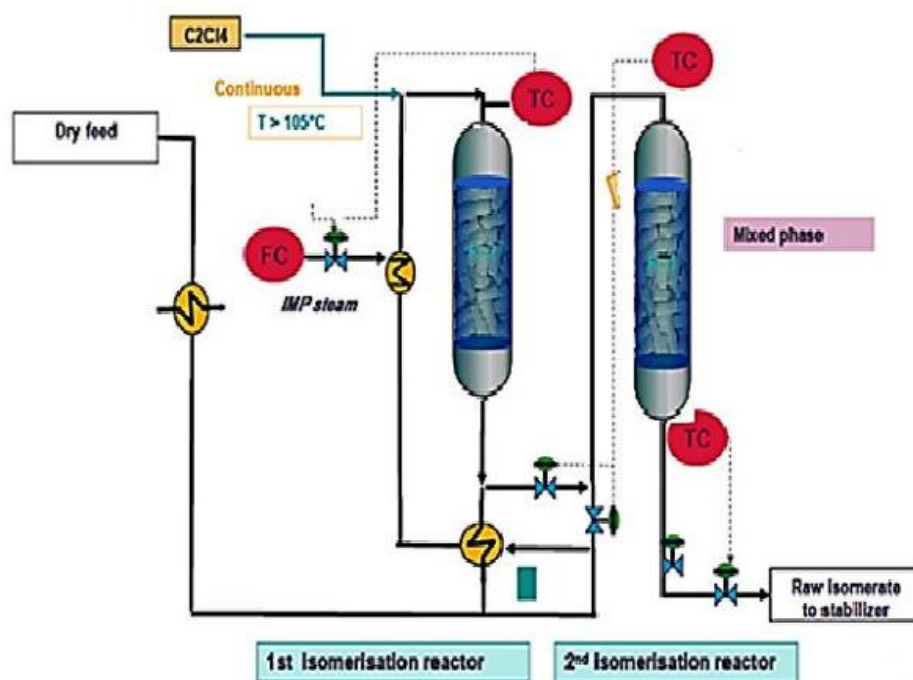


Figure 2.3 Schéma de section réactionnelle du procédé d'isomérisation.

✓ Description du procédé :

Le processus d'isomérisation du naphta léger se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, le naphta léger subit un prétraitement afin d'éliminer les impuretés telles que le

soufre, l'eau et les composés organiques oxygénés. Ce prétraitement est réalisé en utilisant des procédés tels que l'hydrotraitement et la dessiccation.

Une fois prétraité, le naphta est alimenté dans un réacteur d'isomérisation où il entre en contact avec un catalyseur d'isomérisation, généralement à base de platine, de palladium ou de nickel supporté sur alumine.

Au cours de la réaction d'isomérisation, les molécules de naphta subissent un réarrangement afin de former des isomères de meilleure qualité, présentant une plus grande stabilité thermique et un indice d'octane amélioré. Cette réaction est catalysée par le catalyseur et se déroule à des conditions de haute température et de haute pression.

Une fois la réaction terminée, le produit est séparé en utilisant des unités de distillation, qui permettent de séparer les différents composants en fonction de leurs points d'ébullition.

Le catalyseur utilisé dans le réacteur doit être régénéré périodiquement pour maintenir ses performances. Cette régénération implique le retrait du catalyseur usé du réacteur, son nettoyage et son traitement pour éliminer les contaminants. Une fois régénéré, le catalyseur est réintroduit dans le réacteur pour les cycles suivants.

Le gaz produit lors de la réaction est également traité pour éliminer les impuretés telles que le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre et le sulfure d'hydrogène. Une fois purifié, ce gaz peut être utilisé comme combustible ou réinjecté dans le processus de raffinage.

Ces étapes permettent d'obtenir un naphta isomérisé de meilleure qualité et plus adapté aux exigences de l'industrie pétrolière [29, 30].

2.3.2.3 Unité de reformage catalytique continue du Naphta lourd CCR (U-520) :

Cette unité a une capacité de production de 660 000 tonnes par an et utilise un procédé de régénération catalytique en continu avec une consommation de 27 kg de coke par heure et un débit de catalyseur de 450 kg/h. L'objectif principal de cette unité est de produire du « Reformat » à haut indice d'octane (d'environ 100 RON) qui peut être mélangé avec d'autres produits pour produire une essence à fort indice d'octane [31].

✓ Description du Procédé :

a. Section de réaction :

L'unité de reformage CCR est composée de plusieurs sections clés dans sa section de réaction. Tout d'abord, la section de réaction traite le naphta lourd hydrotraité et génère du

gaz recyclé pour les réacteurs. Cette étape vise à convertir les hydrocarbures à bas indice d'octane en composés à haut indice d'octane, tels que les alcanes aromatiques, grâce à une réaction catalytique. Ensuite, la section de compression et d'absorbeur entre en jeu, traitant le gaz de production d'hydrogène. Le gaz est comprimé et ensuite envoyé dans un absorbeur où il est séparé en deux produits distincts : un gaz riche en H₂, utilisé comme matière première dans le processus de reformage, et un liquide séparé. Enfin, les sections de récupération GPL et stabilisateur jouent un rôle important en récupérant le gaz de pétrole liquéfié (GPL) et en traitant le liquide séparé pour son utilisation dans le processus de reformatage. Ces différentes étapes contribuent à la production de produits pétroliers de haute qualité avec un indice d'octane amélioré, répondant ainsi aux exigences de l'industrie [7].

b. Section de régénération :

Cette section a pour objectif de régénérer le catalyseur utilisé en le faisant passer à travers un régénérateur ainsi que plusieurs autres équipements tels qu'un réservoir tampon, un compresseur de boucle de régénération, un dessiccateur d'air et une chambre de réduction [7].



Figure 2.4 Illustration des 4 réacteurs en série de l'unité CCR.

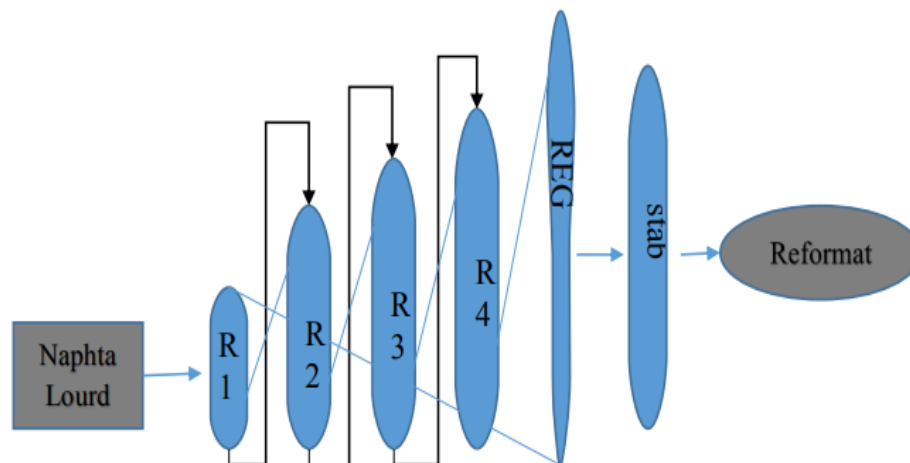


Figure 2.5 Schéma de Section de réaction de reforming catalytique.

2.3.3 Unité de Craquage catalytique Résiduel du fluide RFCC (U-530) :

L'objectif de l'unité est de convertir les fractions de pétrole brut lourd (RCO + HGO) de l'unité 100 en produits hydrocarbonés plus légers et de plus grande valeur et à haute température et à pression moyenne en présence d'un catalyseur à base d'alumine / silice finement divisée.

L'un des avantages importants du craquage catalytique de fluide est la capacité du catalyseur à circuler facilement entre le réacteur et le régénérateur lorsqu'il est fluidisé avec une phase vapeur appropriée.

Les produits obtenus par l'unité RFCC sont :

- Gaz constitué d'hydrocarbures légers (C2), utilisés dans la raffinerie comme gaz fioul après traitement dans l'unité FGATU (U-560) ;
- GPL séparés en propane et butane, après traitement dans l'unité MEROX (U600) afin d'éliminer le H₂S et les mercaptans
- Essence envoyée à la piscine de mélange d'essence ;
- Gazole léger (LGO), envoyé au puits de mélange d'essence ;
- Huile clarifiée (CLO), parfois appelée fond de colonne principale), envoyée au fioul interne ou exportée [4].

✓ **Description du procédé :**

Le procédé RFCC est principalement décrit en trois sections :

a. Section Réacteur–Régénérateur :

Le catalyseur est en contact avec une quantité régulée de charge, où les réactions de craquage se produisent. Pendant cette réaction, un sous-produit carboné appelé "coke" se dépose sur le catalyseur en circulation. Pour éviter l'obstruction des sites actifs et assurer la combustion complète du CO en CO₂, le catalyseur est régénéré dans un régénérateur. Une fois régénéré, il retourne au réacteur [4].

b. Section de la colonne principale :

Les produits sortant du réacteur sont conduits le long d'une ligne de vapeur jusqu'à une colonne principale. Là, ils sont condensés et fractionnés en coproduits gazeux (essence FCC), gazoles de craquage catalytique et produits résiduels lourds. Un mélange de gazoline, GPL et traces de LCO est extrait d'un plateau de la colonne principale et séparé en gaz (GPL) et liquides (LCO, gazoline) dans la section de dégazage. Pour récupérer la gazoline, le mélange de LCO et gazoline est traité dans la section de fractionnement [4].

c. Section concentration des Gaz :

Dans cette section, les produits incondensables provenant du ballon accumulateur en tête de la colonne principale sont traités. Elle permet la récupération du butane et du propane à partir des autres hydrocarbures.

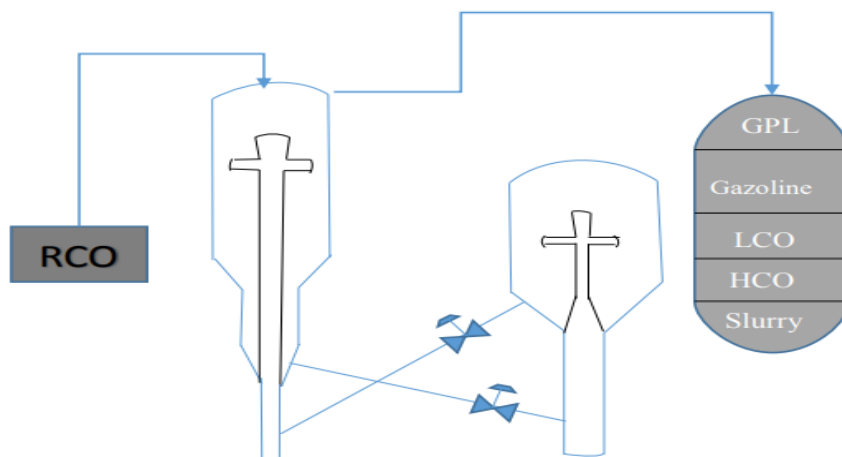


Figure 2.6 Schéma de Section réaction-régénération et fractionnement.

2.3.4 La station de Blending (Mélange) :

L'essence est mélangée dans une station de mélange en utilisant des pompes qui conduisent les produits de bases à partir de leurs bacs de stockage vers un collecteur pour être mélangés à travers

le mixeur (901-MX-352) puis envoyé vers le stockage. Il est envisagé de mélanger la production d'une journée en 8 heures, pendant l'exploitation normale. Le débit de mélange est de 167000 kg/h. L'objectif de l'opération de mélange est de préparer un lot d'essence conforme aux spécifications [1].

CHAPITRE 3

TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET MATERIAUX

Introduction :

Le processus de formulation, de modélisation et d'optimisation des essences implique des étapes clés. Il commence par la caractérisation des bases de formulation, suivie de l'identification des intervalles de variation des contributions des bases dans le mélange. Un plan d'expérience est élaboré pour guider la formulation des essences, qui sont ensuite caractérisées pour évaluer leurs propriétés. Des modèles sont développés pour prédire les propriétés des essences en fonction de leur composition, et ces modèles sont validés. Enfin, une optimisation des formulations est effectuée pour atteindre les spécifications requises et maximiser les performances des essences.

3.1 Matériels utilisés :

Le matériel utilisé comprend un densimètre, un moteur CFR et Analyseur de vapeur ou réfractomètre à vapeur. Le densimètre (Figure 3.1) a été utilisé pour mesurer la densité de l'essence. L'analyseur de vapeur (Figure 3.2) a été utilisé pour mesurer la tension de vapeur de l'essence. Enfin, Le moteur CFR (Figure 3.3) a été utilisé pour mesurer l'indice d'octane (NO) de l'essence. Les caractéristiques de chaque appareil ont été soigneusement choisies pour garantir la précision et la fiabilité des mesures effectuées. Un tableau récapitulatif des caractéristiques de chaque appareil est présenté ci-dessous (Tableau 3.1) :

Tableau 3.1 Liste des instruments de mesure utilisés.

Désignation	Marque	Caractéristique
Densimètre	Anton Paar DMA4200	Mesure la densité d'essence
Moteur CFR	The Waukesha Motor	Mesure l'indice d'octane
Analyseur de vapeur (réfractomètre à vapeur)	Grabner Instruments	Mesure la tension de vapeur de Reid
Agitateur magnétique	IKA	Pour mélanger le mélange



Figure 3.1 Densimètre.



Figure 3.2 Analyseur de vapeur.



Figure 3.3 Moteur CFR Engine.

3.2 Les produits utilisés :

Les produits utilisés dans cette étude sont le reformat, l'isomérat, le naphta, la gazoline, le MTBE et l'eau distillée pour le nettoyage des verreries. Ces produits sont des composés couramment utilisés dans l'industrie pétrolière pour la production de carburants. Les échantillons de ces produits ont été analysés à l'aide des instruments mentionnés dans la section précédente pour déterminer leurs caractéristiques physico-chimiques, tels que leur indice d'octane (NO), leur densité, leur tension de vapeur de Reid (TVR). Les différents produits utilisés dans l'expérience sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 3.2) :

Tableau 3.2 Les différents produits utilisés dans l'expérience.

Désignation	Type de produit	Utilisation
Reformat	Produit raffiné	Composant principal pour la fabrication de l'essence
Isomérat	Produit raffiné	Composant principal pour la fabrication de l'essence
Gazoline	Produit raffiné	Composant principal pour la fabrication de l'essence
Naphta	Produit raffiné	Composant principal pour la fabrication de l'essence
MTBE	Additif	Additif pour améliorer la performance de l'essence
Eau distillé	Solvant	Nettoyage des verreries et prévention de la contamination croisée

3.3 Le choix des produits de bases pour la formulation d'essences :

La production d'essences repose sur une formulation méticuleuse, où des ingrédients soigneusement sélectionnés sont combinés pour assurer des carburants de haute qualité.

Les composants clés de cette formulation comprennent :

- 1. La coupe reformat :** Cette fraction spécifique de l'essence est obtenue par le processus de reformage catalytique. Elle est riche en hydrocarbures aromatiques et contribue à l'indice d'octane élevé du carburant.
- 2. La coupe isomérat :** Il s'agit d'une fraction produite par le procédé d'isomérisation des alcanes. L'isomérat est utilisé pour améliorer les propriétés d'octane du carburant, favorisant une meilleure combustion dans les moteurs.
- 3. La coupe gazoline :** Cette fraction essentielle est la principale composante des essences et fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement des moteurs.
- 4. La coupe naphta :** Le naphta est utilisé pour ajuster la volatilité du carburant, permettant un démarrage facile du moteur et une meilleure performance à basse température.

5. Le MTBE : Le MTBE (méthyl tert-butyl éther) est un additif oxygéné utilisé pour améliorer l'indice d'octane du carburant et réduire les émissions polluantes. Il est souvent mélangé à l'essence pour améliorer ses propriétés de combustion.

Ces composants, utilisés dans des proportions spécifiques, permettent de formuler des essences répondant aux normes de qualité et aux exigences des moteurs automobiles.

Des analyses de caractérisation ont été réalisées en laboratoire sur ces différentes bases. Les résultats obtenus, exprimés en pourcentage volumique, comprennent le pourcentage des naphthènes (%N), le pourcentage en paraffines (%P) et le pourcentage en aromatiques (%A). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 Caractéristiques des produits de base utilisés dans la formulation.

	%N (vol%)	%P (vol%)	%A (vol%)	Autres (vol%)	NO	Plage de distillation		TVR (gr/cm ²)	Densité à 15°C (kg/L)
						PI (°C)	PF (°C)		
Reformat	14.01	24.01	71.68	00.29	101	50	215	200	0.825
Isomerat	5,56	48,63	-	-	88	25	88	1250	0,665
Gazoline	10,8	38,7	08,4	21.32	90	111	138	560	0,721
Naphta	05,08	93,06	01,86	01,86	50	31	171	500	0,710
MTBE	-	-	-	-	115	-	-	550	0,745

3.4 Méthodes utilisées :

3.4.1 Protocole de préparation :

La méthode de préparation des mélanges d'essences implique une mesure précise des composants, leur ajout dans les ballons en respectant les proportions spécifiques, un mélange homogène à l'aide des agitateurs magnétiques, et enfin, l'analyse des caractéristiques physico-chimiques des mélanges obtenus.

Pour préparer les mélanges d'essences, les composants de base (le reformat, l'isomerat, le naphta, la gazoline et le MTBE) ont été ajoutés aux ballons en respectant les proportions spécifiques définies. Les quantités précises de chaque composant ont été mesurées à l'aide de pipettes et ajoutées aux ballons correspondants. Ensuite, les ballons ont été placés sur des agitateurs magnétiques et agités à une vitesse appropriée pour assurer une distribution homogène des composants. Cette étape d'agitation a permis de mélanger efficacement les composants, garantissant ainsi la formation de mélanges d'essences uniformes. Une fois le

processus d'agitation terminé, les mélanges d'essences obtenus étaient prêts à être utilisés pour les analyses des caractéristiques physico-chimiques (la densité, la tension de vapeur de Reid (TVR) et l'indice d'octane (NO)). Cette méthode rigoureuse de préparation a permis d'obtenir des mélanges d'essences de qualité, essentiels pour les études et les analyses dans l'industrie pétrolière et la production de carburants. La figure ci-dessous (Figure 3.4) illustre un mélange d'essence sans plomb avant son analyse.

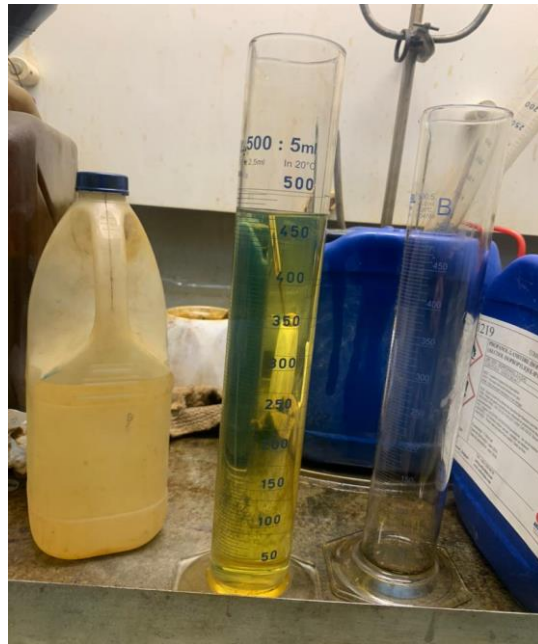


Figure 3.4 Un mélange d'essence sans plomb.

3.4.2 Analyse des caractéristiques physico-chimiques des mélanges :

Les caractéristiques physico-chimiques des mélanges d'essences ont été mesurées à l'aide de différentes méthodes d'analyse. Pour la mesure de la densité, on utilise le densimètre. Les échantillons de mélanges d'essences ont été soigneusement introduits dans le densimètre, qui a ensuite fourni la valeur de densité correspondante.

Quant à la mesure de la tension de vapeur de Reid (TVR), une méthode de distillation contrôlée a été utilisée. Les échantillons de mélanges d'essences ont été placés dans l'analyseur de vapeur, qui permet de mesurer la pression de vapeur des composants volatils présents dans les mélanges.

En ce qui concerne la détermination de l'indice d'octane (NO), une méthode utilisant le moteur CFR (Cooperative Fuel Research) a été employée. Les échantillons de mélanges d'essences ont été soumis à un processus de combustion contrôlé dans la machine d'essai,

qui a mesuré la résistance du mélange à l'auto-allumage et a fourni l'indice d'octane correspondant.

Ces méthodes de mesure ont permis d'évaluer de manière précise et fiable les caractéristiques physico-chimiques des mélanges d'essences, offrant ainsi des informations essentielles pour leur utilisation dans l'industrie pétrolière et la production de carburants.

3.5 Plans d'expérience :

Les plans d'expérience sont une méthode statistique efficace pour tester l'effet de différentes variables sur un résultat donné. Ils permettent de minimiser le nombre d'expériences nécessaires et d'obtenir des résultats plus précis. On peut utiliser ces plans pour étudier les effets de plusieurs variables à la fois ou pour optimiser une réponse à une variable. Pour analyser les données, on utilise généralement l'analyse de variance (ANOVA) pour déterminer si les variables ont un effet significatif sur la réponse [34].

Dans le contexte de la production des essences, l'analyse des propriétés mesurées permet d'établir le plan de mélange nécessaire pour formuler ces carburants. L'utilisation de MODDE6 (Method Of Directional Derivatives Estimation), un logiciel d'analyse des plans d'expérience, est privilégiée pour la planification, la conception, l'analyse et l'optimisation des expériences. MODDE6 est choisi pour sa capacité à générer des plans d'expérience équilibrés et optimisés, ainsi que pour ses outils avancés d'analyse statistique qui permettent une interprétation rigoureuse des résultats expérimentaux. Sa fonctionnalité de simulation et d'optimisation facilite l'exploration de différentes configurations et la recherche des meilleures combinaisons de paramètres afin de maximiser les performances de la production des essences. L'utilisation de MODDE6 garantit ainsi l'obtention de résultats fiables et significatifs dans le cadre de la recherche sur la production des essences [34].

Les essences reformulées obtenues doivent avoir des propriétés définies par les spécifications internationales des essences ci-dessous :

- La densité (d_4^{15}) comprise entre 0.72 et 0.775 kg/m³.
- La pression de vapeur de Reid (TVR) doit être maximum égale à 0.8 bar.
- L'indice d'octane doit être supérieur ou égale à 92.

3.5.1 La variation des concentrations des variables de contrôle dans la formulation :

Pour établir un plan de mélange, il est nécessaire de définir les limites de contribution de chaque base dans le mélange. Ces limites fixent les valeurs maximales et minimales de

chaque ingrédient, garantissant une utilisation appropriée et respectant les spécifications de la formulation. Le tableau (3.4) présente les différents produits de base utilisés dans la formulation des essences, ainsi que les plages de valeurs qui définissent les limites de contribution de chaque produit dans le mélange. Ces limites de contribution des bases dans le mélange sont exprimées en fraction volumique.

Tableau 3.4 Limites de concentration des variables indépendantes dans la formulation.

Nom	Abréviations	Paramètres
Reformat	Ref	0,3 à 0,45
Isomérat	Iso	0,1 à 0,3
Gazoline	Gas	0,2 à 0,4
Naphta	Nap	0,05 à 0,15
MTBE	MTB	0 à 0,05

On remarque que le reformat avec une plage de contribution de 0,3 à 0,45, joue un rôle significatif dans la formulation des essences en apportant des caractéristiques spécifiques au mélange.

L'isomérat, quant à lui, est un composant important avec une plage de contribution de 0,1 à 0,3, influençant les propriétés et les performances du carburant.

La gazoline, ayant une plage de contribution de 0,2 à 0,4, est également un élément essentiel dans le mélange de formulation, pouvant avoir un impact significatif sur les caractéristiques de combustion.

Le naphta, avec une contribution allant de 0,05 à 0,15, est utilisé de manière plus modérée, apportant des propriétés spécifiques au mélange même à des niveaux plus faibles.

Enfin, le MTBE est utilisé en quantité restreinte, variant de 0 à 0,05, suggérant une utilisation spécifique en fonction de certaines exigences particulières.

3.5.2 Plan de mélange :

Pour générer le plan de mélange, nous avons utilisé le logiciel MODDE6. Le tableau (3.5) présente le plan de mélange qui spécifie les concentrations de chaque produit de base dans un mélange donné. Les concentrations de chaque produit sont exprimées en fraction volumique.

Tableau 3.5 Plans de mélange des essences sans plomb reformulées.

Nombre des expériences	Reformat	Isomérat	Gazoline	Naphta	MTBE
1	0,45	0,1	0,4	0,05	0
2	0,3	0,25	0,4	0,05	0
3	0,45	0,1	0,3	0,15	0
4	0,35	0,3	0,2	0,15	0
5	0,3	0,15	0,4	0,15	0
6	0,3	0,1	0,4	0,15	0,05
7	0,45	0,1	0,35	0,05	0,05
8	0,4	0,3	0,2	0,05	0,05
9	0,3	0,2	0,4	0,05	0,05
10	0,45	0,15	0,2	0,15	0,05
11	0,45	0,233333	0,2	0,116667	0
12	0,416667	0,3	0,2	0,0833333	0
13	0,35	0,3	0,3	0,05	0
14	0,3	0,3	0,316667	0,05	0,0333333
15	0,3	0,3	0,233333	0,15	0,0166666
16	0,3	0,3	0,266667	0,0833333	0,05
17	0,3	0,166667	0,333333	0,15	0,0499999
18	0,45	0,1	0,283333	0,116667	0,05
19	0,45	0,283333	0,2	0,05	0,0166667
20	0,45	0,2	0,25	0,05	0,05
21	0,416667	0,1	0,4	0,05	0,0333333
22	0,333333	0,3	0,2	0,116667	0,05
23	0,342857	0,142857	0,4	0,0928571	0,0214286
24	0,37	0,18	0,28	0,15	0,02
25	0,375	0,2	0,3	0,1	0,025
26	0,375	0,2	0,3	0,1	0,025
27	0,375	0,2	0,3	0,1	0,025

Le tableau présente le plan de mélange des essences reformulées, en indiquant les concentrations spécifiques de chaque produit de base pour les 27 expériences. Ces valeurs de concentration ont été générées à l'aide du logiciel MODDE6 et sont cruciales pour déterminer les combinaisons optimales des ingrédients de base. Le plan de mélange permet d'explorer différentes configurations afin d'obtenir les caractéristiques recherchées dans les essences reformulées.

3.5.3 Evaluation de la qualité des modèles prédictifs :

Q^2 et R^2 sont des mesures couramment utilisées pour évaluer la qualité des modèles prédictifs.

Q^2 , également appelé coefficient de prédiction, est une mesure de la capacité prédictive d'un modèle de régression. Il est calculé en utilisant une validation croisée et représente la proportion de la variance dans la variable dépendante qui est prévue par le modèle. Une valeur de Q^2 élevée indique une bonne capacité prédictive du modèle.

R^2 , également appelé coefficient de détermination, est une mesure de la proportion de la variance totale dans la variable dépendante qui est expliquée par le modèle. Il représente la qualité de l'ajustement du modèle aux données. Une valeur élevée de R^2 indique un bon ajustement du modèle aux données.

3.5.4 Etude corrélative :

Une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour étudier l'influence de la contribution de chaque base dans le mélange sur les propriétés des essences.

L'analyse de l'évolution des effets des coefficients des erreurs de régressions linéaires multiples a fourni des informations détaillées et précises sur l'importance des effets principaux et des effets d'interaction dans chaque variable de réponse [35].

À partir d'un plan d'expériences, des modèles sont élaborés sous la forme d'expressions polynomiales de degré maximum égal à 2. La quantité d'intérêt, notée y , correspond à la réponse d'un processus expérimental ayant des coordonnées x_i . Ces modèles permettent de représenter mathématiquement la relation entre les variables d'entrée (x_i) et la variable de réponse (y) dans le processus expérimental.

La relation entre la réponse y et les facteurs x_i est exprimée par la fonction suivante :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i,j=1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (3.1)$$

L'équation (3.1) exprime la relation entre les réponses étudiées et les proportions des composants des mélanges x_i, x_j . Dans notre cas, la valeur y représente la densité à 15°C, le TVR et le NO, qui sont mesurés expérimentalement. Les coefficients a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont des coefficients inconnus calculés à partir des résultats des expériences. Ils représentent les effets et interactions dans le plan de mélange (Tableau 3.5).

3.5.5 Validation des modèles :

3.5.5.1 Analyse des résidus :

L'analyse des résidus est une étape importante pour évaluer la pertinence d'un modèle par rapport aux données expérimentales. Elle consiste à examiner les écarts entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles observées. L'objectif principal est de vérifier si les résidus, c'est-à-dire les différences entre les valeurs prédites et les valeurs observées, présentent une répartition aléatoire autour de zéro.

La répartition des résidus peut être étudiée visuellement à l'aide de graphiques, tels que des graphiques de résidus par rapport aux valeurs prédites ou des graphiques de résidus par rapport aux variables explicatives. Une répartition aléatoire des résidus suggère que le modèle est capable de capturer la variabilité des données de manière adéquate.

3.5.5.2 Mesure de la qualité de la prédiction- Etude du coefficient de détermination :

Le coefficient de détermination est une mesure courante pour évaluer la qualité de la prédiction d'un modèle. Cependant, il est important de compléter cette mesure par une analyse plus détaillée, notamment en examinant la répartition des résidus ou en évaluant d'autres mesures d'erreur telles que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ou l'erreur relative.

3.5.5.3 Détermination du RMSEP et RMSPD :

Le RMSEP (Root Mean Square Error of Prediction) est une mesure de l'erreur moyenne entre les prédictions et les observations réelles (3.2). Il évalue la précision globale du modèle.

Le RMSPD (Root Mean Square Percentage Difference) est une mesure relative de l'erreur moyenne exprimée en pourcentage (3.3). Il évalue la précision relative du modèle.

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{n}}$$

(3.2)

$$RMSPD = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{|y_i - y'_i|}{y_i} \times 100 \right)^2}{n}}$$

(3.3)

Où

y_i : Est la valeur observée ;

y'_i : Est la valeur prédite ;

n : Est le nombre total d'échantillons.

Ces mesures permettent d'évaluer la qualité des modèles de prédiction en termes d'exactitude et de précision [36].

3.5.6 Analyse de variance :

On peut dire qu'un modèle est valide selon la table de l'ANOVA lorsque les composantes de l'analyse présentent les caractéristiques suivantes :

1. Régression significative : La composante de régression doit avoir une valeur de P inférieure à un seuil de significativité préalablement défini (par exemple, $\alpha = 0,05$). Cela indique que les variables indépendantes du modèle ont un effet significatif sur la variable dépendante.
2. Manque d'ajustement non significatif : La composante de manque d'ajustement doit avoir une valeur de P supérieure au seuil de significativité. Cela signifie qu'il n'y a pas de variation statistiquement significative non expliquée par le modèle, ce qui indique que le modèle est suffisamment adapté aux données.
3. Bonne répartition des carrés : La somme des carrés totale doit être répartie de manière significative entre la régression et le résidu, avec une part importante attribuée à la régression et une part relativement faible attribuée au résidu.

Lorsque ces critères sont satisfaits, on peut conclure que le modèle est valide et approprié pour expliquer les variations de la variable dépendante à partir des variables indépendantes.

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction :

Dans cette partie expérimentale, les techniques et les méthodes nécessaires sont mises en œuvre pour analyser les caractéristiques de l'essence sans plomb produite. Les paramètres essentiels tels que la densité, l'indice d'octane et la tension de vapeur de l'essence sans plomb sont évalués. Les résultats obtenus seront discutés et interprétés afin de mieux comprendre les propriétés de ce carburant. Cette partie expérimentale revêt une importance primordiale dans l'évaluation de la performance et de la qualité de l'essence sans plomb produite dans la raffinerie.

4.1 Exploitation des résultats :

4.1.1 Histogrammes de Q^2 et R^2 :

Les histogrammes ci-dessous (Figure 4.1) représentent la distribution des valeurs de Q^2 et R^2 pour les trois modèles étudiés (Densité, TVR, NO).

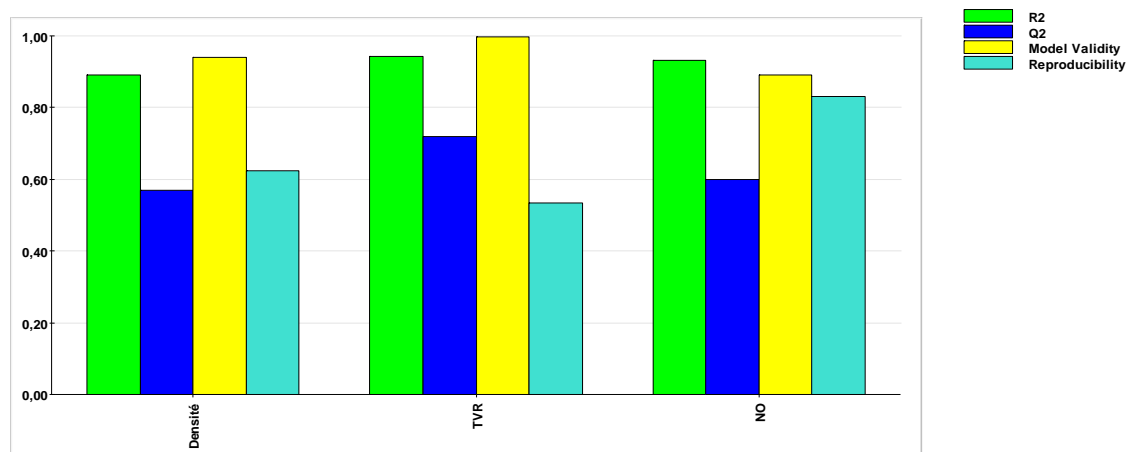


Figure 4.1 Histogrammes de Q^2 et R^2 .

✓ Interprétation des histogrammes de Q^2 et R^2 :

Pour Q^2 , les histogrammes montrent que la majorité des valeurs sont comprises entre 0.57 et 0.7 comme indiqué dans le tableau (4.1) ce qui indique une bonne capacité de prédiction pour les modèles.

Pour R^2 , les histogrammes montrent une distribution plus équilibrée des valeurs pour les trois modèles et que la majorité des valeurs sont proches de 1. Cela suggère que les modèles ont une bonne capacité d'ajustement aux données, mais pas nécessairement une capacité de prédiction.

La similarité des valeurs de validité entre ces trois réponses est un indicateur positif, car elle suggère que le modèle est robuste et stable pour ces variables spécifiques. Cela signifie que le modèle est capable de capturer les variations et les relations entre les paramètres impliqués dans la densité, l'indice d'octane et la tension de vapeur de Reid.

Tableau 4.1 Évaluation de la qualité du modèle pour les variables Densité, TVR et NO.

	R^2	Q^2
Densité	0,892096	0,57008
TVR	0,943431	0,7185
NO	0,930624	0,599733

4.1.2 Les réponses :

Les mesures expérimentales de densité, TVR (Tension de Vapeur de Reid) et NO (l'indice d'octane) des 27 essences obtenues ont été enregistrées et les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous : (Tableau 4.2) (Tableau 4.3) (Tableau 4.4).

✓ Pour la densité :

Tableau 4.2 Densités des essences obtenues.

Nombre des expériences	d_4^{15} (kg/m ³)	Nombre des expériences	d_4^{15} (kg/m ³)
1	0,76055	-	-
2	0,73447	15	0,7348
3	0,75926	16	0,7375
4	0,73687	17	0,7464
5	0,73994	18	0,7657
6	0,74606	19	0,7525
7	0,76312	20	0,7587
8	0,7472	21	0,7648
9	0,75707	22	0,7438
10	0,7614	23	0,7545
11	0,7557	24	0,7542
12	0,7564	25	0,7524
13	0,7424	26	0,7601
14	0,7367	27	0,7482

À travers le tableau (4.2), nous constatons que les densités des 27 essences obtenues, qui sont toutes comprises entre 0.72 et 0.775 (kg/m³), se situent toutes dans l'intervalle de spécifications initialement défini pour l'élaboration du plan de mélange.

✓ **Pour la TVR :**

Tableau 4.3 TVR des essences obtenues.

Nombre des expériences	TVR (bar)	Nombre des expériences	TVR (bar)
1	0,467	-	-
2	0,617	15	0,630333
3	0,459	16	0,616334
4	0,621	17	0,528334
5	0,547	18	0,432667
6	0,487	19	0,571
7	0,438	20	0,5
8	0,581	21	0,460333
9	0,557	22	0,601
10	0,461	23	0,518428
11	0,544333	24	0,5274
12	0,601	25	0,532
13	0,629	26	0,614
14	0,628667	27	0,5442

L'observation du tableau (4.3) révèle que les valeurs de tension de vapeur (TVR) des 27 essences obtenues se situent toutes à l'intérieur de l'intervalle de spécifications initialement défini lors de l'élaboration du plan de mélange.

✓ **Pour le NO :**

Tableau 4.4 NO des essences obtenues.

Nombre des expériences	NO	Nombre des expériences	NO
1	93,2	-	-
2	92	15	92,3
3	92,3	16	93,6
4	91,8	17	93,6
5	91,7	18	95
6	93,2	19	93,9
7	94,8	20	95
8	94	21	94
9	94,1	22	93,4
10	94,3	23	93,2
11	93	24	92,7
12	93	25	93
13	92,4	26	92,4
14	93,3	27	93,1

Les mesures expérimentales de NO pour les différentes essences montrent que la plupart des valeurs se situent dans la plage des spécifications souhaitées. Cependant, quelques essences présentent des valeurs légèrement inférieures à la cible.

4.1.3 Corrélation élaborée :

✓ **Pour la densité :**

Les variables sont notées comme suit : Isomérat (x_1), Reformat (x_2), Gazoline (x_3), Naphta (x_4) et MTBE (x_5).

Les résultats expérimentaux du tableau précédent (Tableau 4.2) ont permis de développer le modèle mathématique suivant :

$$\text{Densité} = y_1 = -0,0202838x_1 + 0,0177198x_2 - 0,00728713x_3 - 0,00560615x_4 + 0,00253737x_5 \quad (4.1)$$

L'équation (4.1) correspond à un modèle linéaire sans interaction pour la corrélation de la densité.

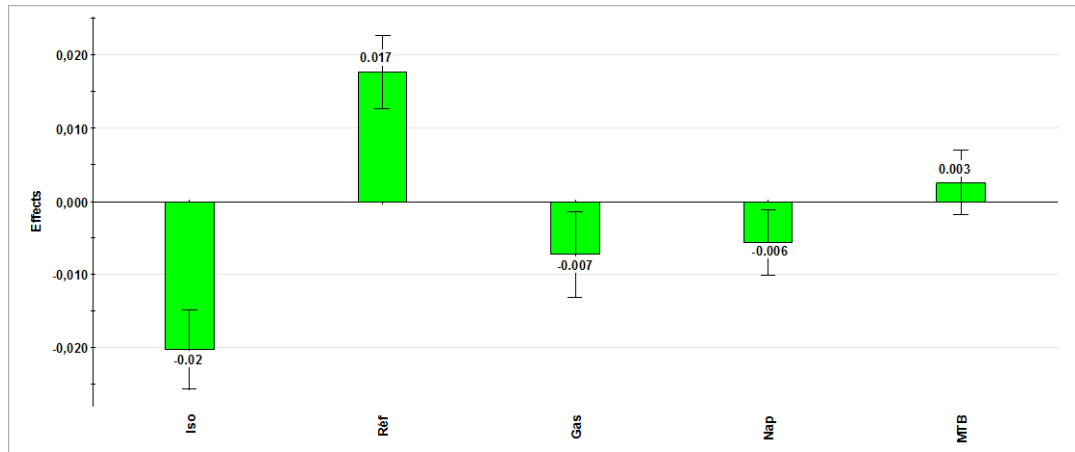


Figure 4.2 Effets et interactions tirés du modèle de densité.

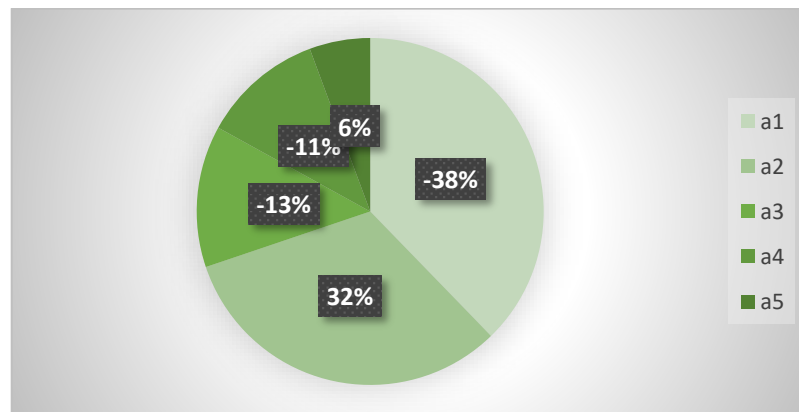


Figure 4.3 Visualisation graphique des coefficients du modèle de densité.

Avec : $Q^2 = 0,754$

$R^2 = 0,822$

Selon les figures (4.2) et (4.3), Les effets correspondants (a_1 , a_3 , a_4) liés respectivement à l'Isomérat, à la Gazoline et au Naphta sont antagonistes. L'effet du Reformat (a_2) est significatif sur la densité. En revanche, l'effet du MTBE (a_5) est faible.

✓ **Pour la TVR :**

Les variables sont notées comme suit : Isomérat (x_1), Reformat (x_2), MTBE (x_3), Naphta (x_4) et Gazoline (x_5).

L'équation suivante représente le modèle de la TVR :

$$\text{TVR} = y_2 = 0,161311x_1 - 0,0811481x_2 - 0,0212309x_3 + 0,0135047x_4 - 0,00386543x_5 \quad (4.2)$$

Le modèle représenté par l'équation (4.2) pour la corrélation de la TVR est un modèle linéaire sans interaction. Afin d'évaluer les effets et les interactions de chaque composant dans ce modèle, des graphiques des coefficients correspondants ont été générés et sont présentés dans la figure (4.4) ci-dessous :

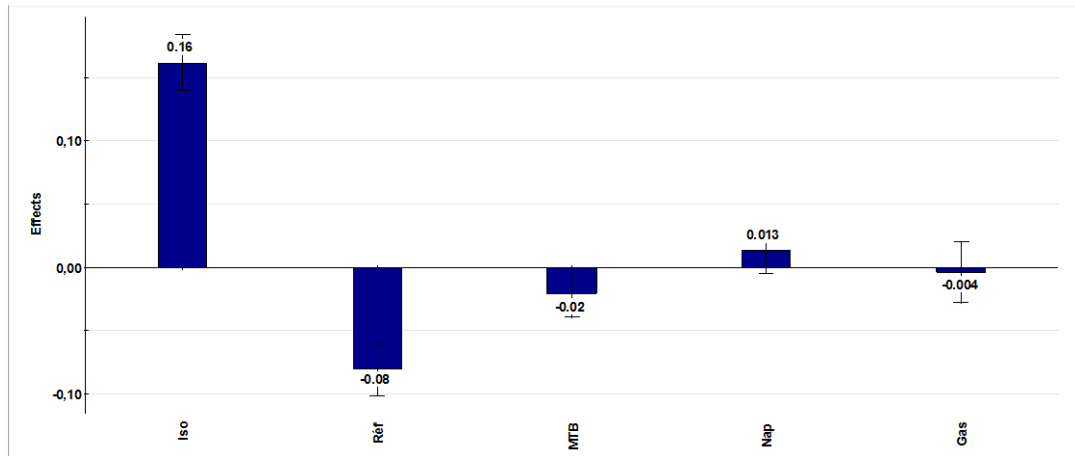


Figure 4.4 Effets et interactions tirés du modèle de la TVR.

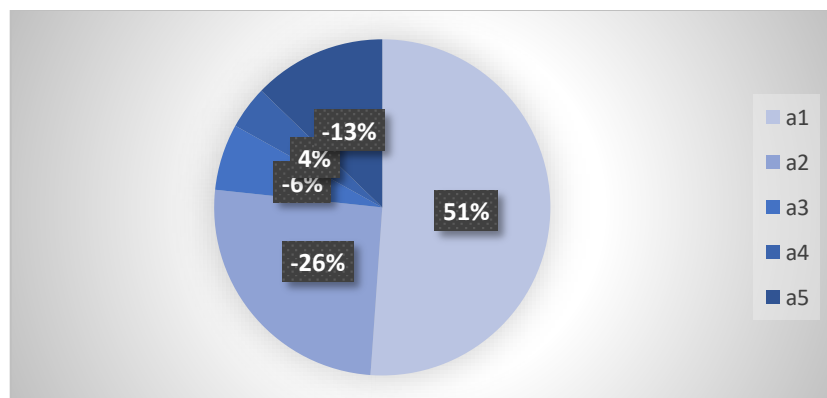


Figure 4.5 Visualisation graphique des coefficients du modèle de la TVR.

Avec : $Q^2 = 0,924$

$R^2 = 0,931$

Selon les figures (4.4) et (4.5), l'effet de l'Isomérat (a_1) est significatif, indiquant son impact significatif sur la TVR. Par contre, l'effet du Reformat (a_2) est antagoniste, ce qui signifie qu'il exerce une influence opposée sur la TVR. Les effets du MTBE (a_3), du Naphta (a_4) et de la Gazoline (a_5) sont quant à eux considérés comme faibles, ce qui suggère qu'ils ont une influence limitée sur la TVR.

✓ **Pour le NO :**

Les variables sont notées comme suit : Reformat (x_1), Isomérat (x_2), Gazoline (x_3), Naphta (x_4) et MTBE (x_5).

L'équation suivante représente le modèle pour prédire le NO :

$$\begin{aligned} \text{NO} = y_3 = & 93,181 + 0,306919 x_1 - 0,132357 x_2 - 0,111899 x_3 - 0,293378 x_4 + 0,591131 x_5 + \\ & 0,279654 x_1 x_1 + 0,0494896 x_2 x_2 - 0,0368469 x_3 x_3 - 0,155512 x_4 x_4 - 0,0565695 x_5 x_5 - \\ & 0,0458438 x_1 x_2 - 0,0506658 x_1 x_3 - 0,0367621 x_1 x_4 + 0,0494341 x_1 x_5 + 0,0370323 x_2 x_3 + \\ & 0,00910638 x_2 x_4 - 0,0772066 x_2 x_5 + 0,0495413 x_3 x_4 + 0,0267504 x_3 x_5 + 0,0263745 x_4 x_5 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Le modèle pour la corrélation du NO est de nature quadratique avec des interactions. Il met en évidence les interactions linéaires entre les constituants du mélange, ce qui indique que l'effet de chaque constituant dépend de la présence des autres constituants.

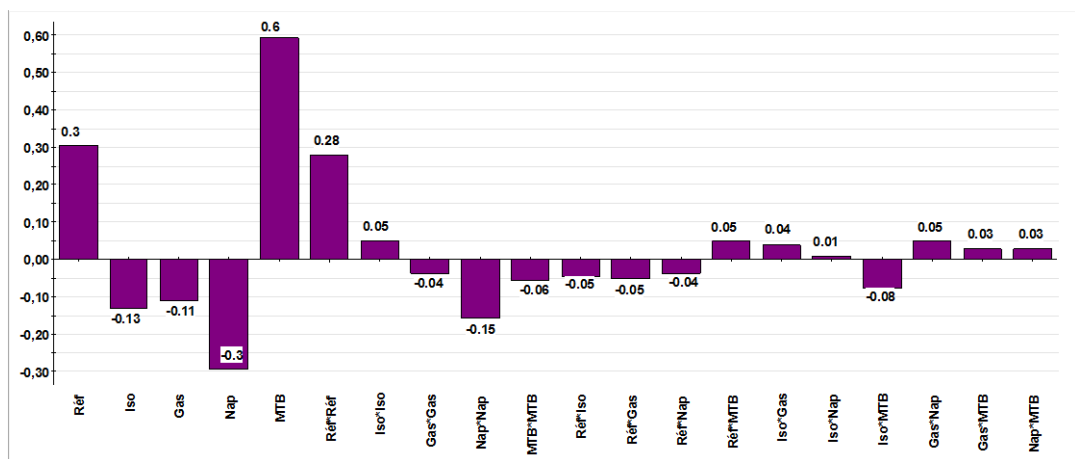


Figure 4.6 Effets et interactions tirés du modèle de NO.

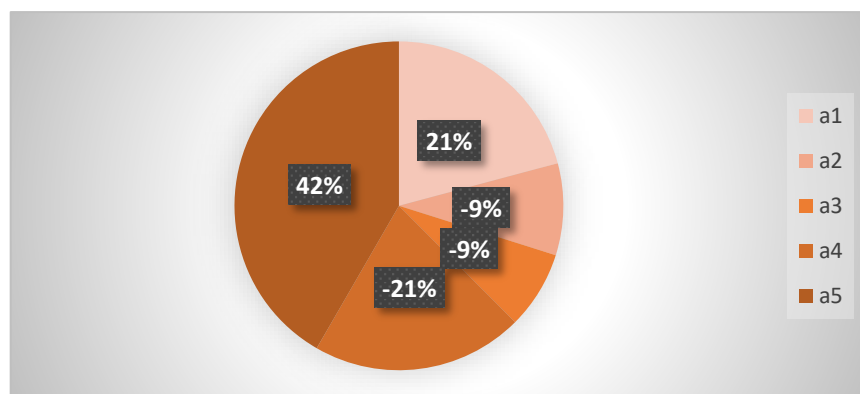


Figure 4.7 Visualisation graphique des coefficients du modèle NO.

Avec : $Q^2= 0,600$

$R^2= 0,931$

Selon les figures (4.6) et (4.7), nous constatons que les variables Reformat et MTBE ont des coefficients positifs, ce qui suggère une relation positive avec l'indice d'octane. Cela signifie que l'augmentation de la quantité de Reformat et de MTBE dans le mélange de carburant est associée à une augmentation de l'indice d'octane prédit.

En revanche, les variables Isomérat, Gazoline et Naphta ont des coefficients négatifs, indiquant une relation inverse avec l'indice d'octane. Cela implique que l'augmentation de ces variables est liée à une diminution de l'indice d'octane prédit.

De plus, les termes d'interaction entre certaines variables, tels que X_1X_1 , X_1X_2 , X_1X_3 , X_1X_4 , X_1X_5 , X_2X_2 , X_3X_3 , X_4X_4 et X_5X_5 , peuvent également influencer l'indice d'octane prédit. Cependant, sans connaître les valeurs spécifiques des variables, il est difficile de tirer des conclusions précises sur l'effet de ces interactions.

4.1.4 Analyse et validation des modèles :

4.1.4.1 Pour la densité :

✓ Etude des résidus :

Afin d'évaluer la pertinence du modèle de densité élaboré dans l'équation (4.1) par rapport aux données expérimentales, une analyse des résidus a été réalisée. La Figure (4.4) met en évidence la répartition des résidus en fonction des valeurs prédites de la densité générées par le modèle développé. Cette visualisation permet de vérifier si les résidus présentent une répartition aléatoire autour de zéro, ce qui indiquerait une bonne adéquation entre le modèle et les données expérimentales.

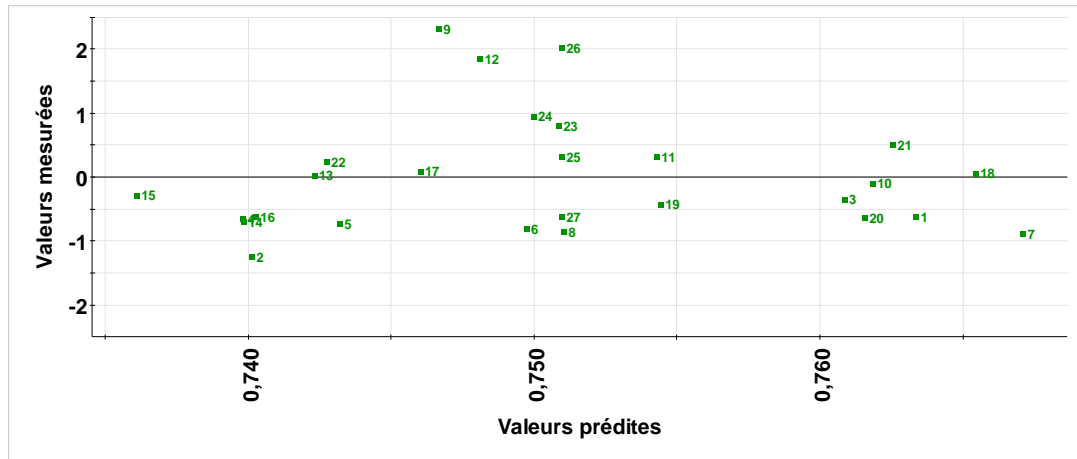


Figure 4.8 Répartition des résidus en fonction de la densité prévue par le modèle.

La dispersion des résidus ne présente pas de tendance particulière, les points sont répartis de manière aléatoire. La plupart des points se rapprochent de zéro, ce qui indique que l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle (4.1) n'est pas significatif. Donc, le modèle de densité choisi est adéquat.

✓ **Mesure de la qualité de la prédiction- Etude du coefficient de détermination :**

Dans la Figure (4.9), les valeurs estimées par le modèle sont comparées aux mesures expérimentales de la densité. Cette représentation graphique met en évidence la relation entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles observées de la densité.

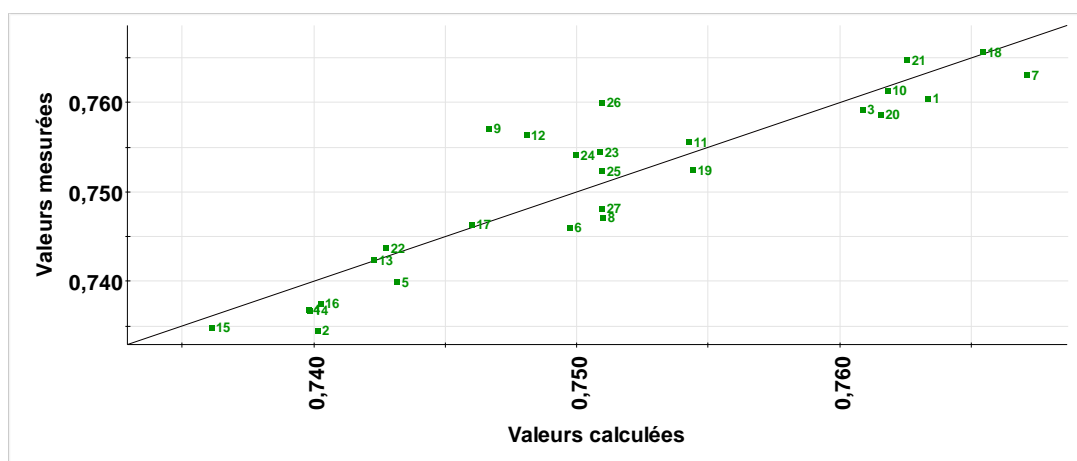


Figure 4.9 Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la densité.

Le coefficient de détermination R^2 qui exprime la dispersion entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées (Figure 4.9) est de 0,822.

Les résultats obtenus pour le RMSEP et le RMSPD sont de $0,0045 \text{ kg/m}^3$ et $0,083\%$, respectivement.

Un RMSEP de $0,0045 \text{ kg/m}^3$ pour la densité est conforme à la norme ASTM D4052 [37], ce résultat suggère une bonne concordance entre les prédictions et les mesures expérimentales.

4.1.4.2 Pour la TVR :

✓ Etude des résidus :

Pour évaluer la conformité du modèle de la TVR élaboré dans l'équation (4.2) avec les données expérimentales, une vérification a été effectuée en analysant les résidus. La Figure (4.10) présente la répartition des résidus en fonction de la TVR prédite par le modèle développé, permettant ainsi d'évaluer l'adéquation du modèle aux données observées.

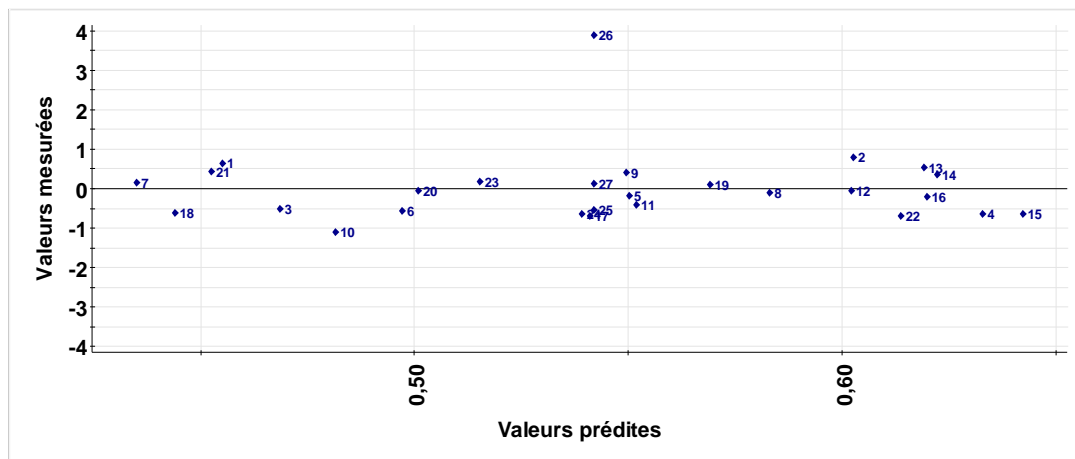


Figure 4.10 Répartition des résidus en fonction de la TVR prévue par le modèle.

La distribution des résidus ne montre pas de tendance spécifique, les points sont dispersés de manière aléatoire. La majorité des points se rapprochent de zéro, ce qui suggère que les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle (4.2) sont proches et concordantes. Par conséquent, le modèle de la TVR choisi est considéré comme adéquat.

✓ **Mesure de la qualité de la prédiction- Etude du coefficient de détermination :**

La Figure (4.11) illustre la comparaison entre les valeurs calculées par le modèle et les mesures expérimentales de la TVR. Cette représentation graphique met en évidence la concordance entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles observées de la TVR.

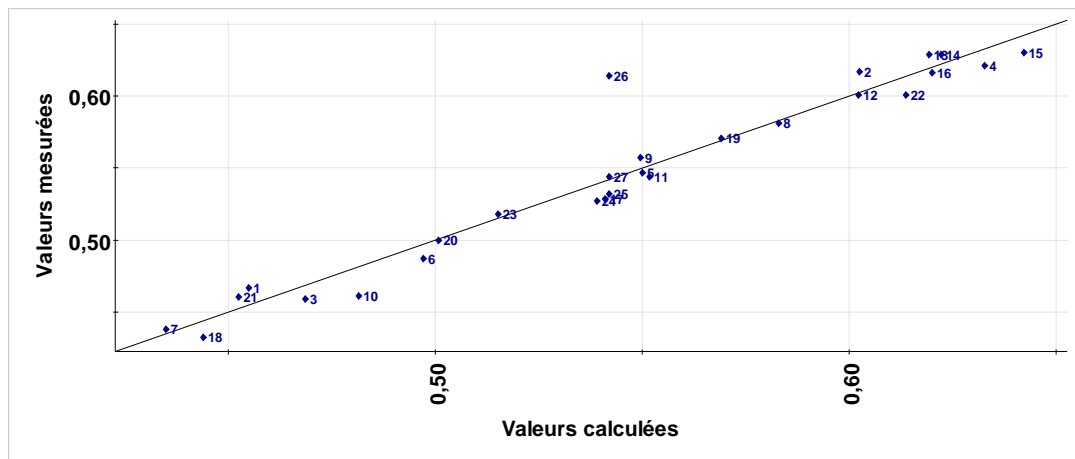


Figure 4.11 Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la TVR.

Le coefficient de détermination R^2 est de 0,931. Le RMSEP et le RMSPD calculées sont de 0.0185 bar et 0,39%, respectivement.

Un RMSEP de 0.0185 bar pour la TVR est inférieur à la limite acceptée définie par la norme ASTM D5191 [38], qui est de 0.046 bar. Cela indique une bonne concordance entre les prédictions du modèle et les mesures expérimentales, ce qui satisfait les exigences de la norme ASTM D5191 pour la TVR.

4.1.4.3 Pour le NO :

✓ **Etude des résidus :**

La Figure 4.12 illustre la distribution des résidus en fonction des valeurs prévues du NO par le modèle. Elle permet de visualiser l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites, ainsi que la dispersion des résidus autour de zéro.

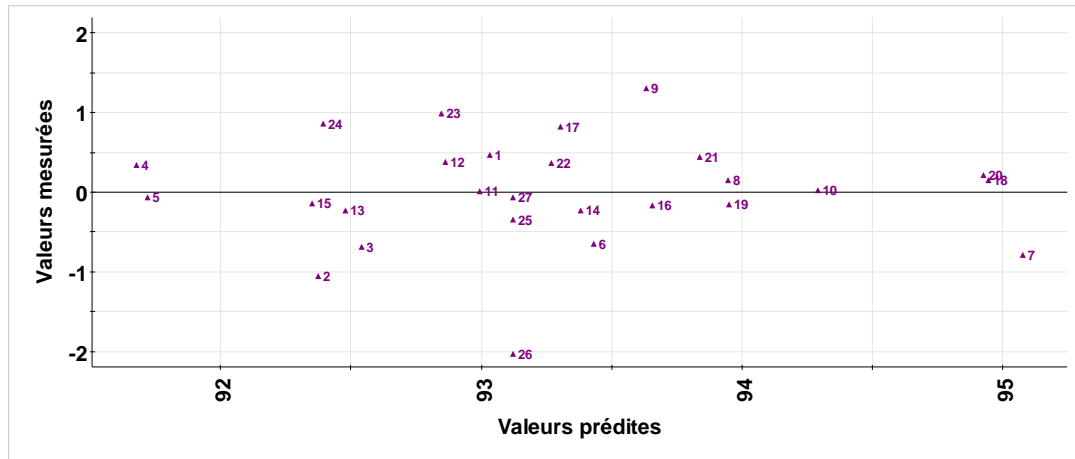


Figure 4.12 Répartition des résidus en fonction du NO prévue par le modèle.

La répartition des résidus ne présente pas de tendance particulière, les points étant dispersés de manière aléatoire. La plupart des résidus se rapprochent de zéro, indiquant une bonne concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle (4.3). Ainsi, le modèle du NO est considéré comme adéquat et capable de fournir des prédictions fiables.

✓ **Mesure de la qualité de la prédiction- Etude du coefficient de détermination :**

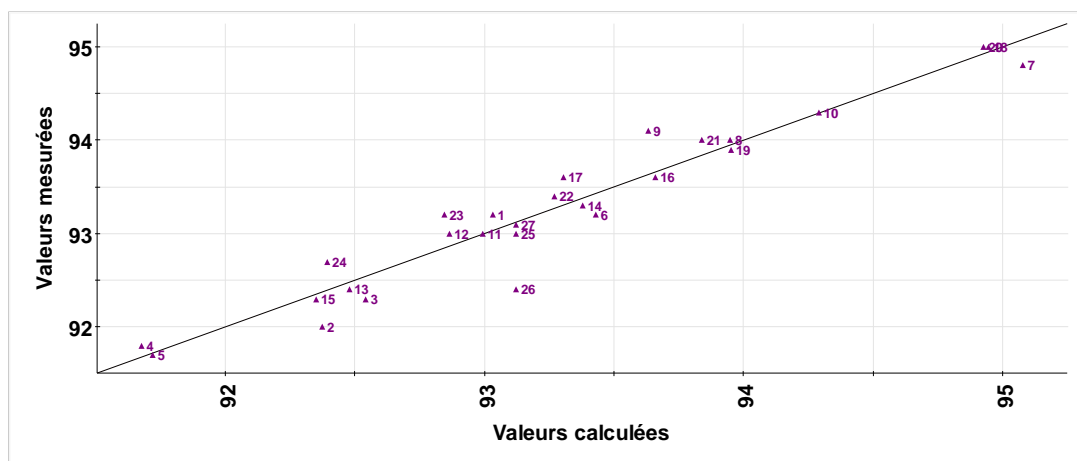


Figure 4.13 Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées du NO.

Le coefficient de détermination R^2 est de 0,931. Le RMSEP et le RMSPD calculées sont de 0.3566 et 0,036%, respectivement.

Un RMSEP de 0.3566 pour le NO est inférieur à la limite acceptée définie par la norme ASTM D2699 [39], qui est de 0,4012 Cela indique une bonne concordance entre les

prédictions du modèle et les mesures expérimentales, ce qui satisfait les exigences de la norme ASTM D2699 pour le NO.

4.1.5 Analyse de variances :

✓ Pour la densité :

L'analyse de variance (ANOVA) permet d'extraire davantage d'informations sur les paramètres étudiés après la modélisation, en évaluant la qualité du modèle postulé et en vérifiant sa pertinence. Elle permet d'identifier les sources de variation significatives et d'évaluer l'importance relative de chaque paramètre dans l'explication des variations observées. L'ANOVA fournit une base statistique solide pour évaluer la pertinence du modèle et confirmer si les paramètres étudiés contribuent de manière significative à l'explication des données expérimentales. Le tableau (4.5) suivant représente l'analyse des variances pour la densité :

Tableau 4.5 L'analyse des variances pour la densité.

Densité	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Fisher (F)	Valeur de P
Régression	4	0,00206924	0,00051731	25,486	0,000
Résidus	22	0,000446552	2,02978e-005		
Manque d'ajustement	20	0,000373705	1,86853e-005	0,513002	0,832

La régression est considérée comme significative car la valeur de P associée à la composante de régression est égale à 0,000, ce qui est inférieur à un seuil de significativité communément utilisé tel que $\alpha = 0,05$, ce qui signifie que les variables indépendantes ont un effet significatif sur la variable dépendante "Densité".

La composante de manque d'ajustement a une valeur de P de 0,832. Cela indique que cette composante n'est pas statistiquement significative.

La somme des carrés pour la régression (0,00206924) est plus élevée que celle des résidus (0,000446552), ce qui suggère une répartition favorable des carrés. De plus, le carré moyen pour la régression (0,00051731) est également plus élevé que celui des résidus (2,02978e-005).

La répartition des carrés indique une bonne adéquation du modèle de régression, avec une part importante attribuée à la régression et une part relativement faible aux résidus. Cela indique que le modèle explique de manière significative la variation des données.

✓ **Pour la TVR :**

L'ANOVA dans ce cas permet d'évaluer la qualité et la pertinence du modèle pour la TVR en identifiant les sources de variation significatives et en quantifiant l'importance relative de chaque paramètre dans les variations observées. Le tableau suivant (Tableau 4.6) présente l'analyse des variances pour la TVR.

Tableau 4.6 L'analyse des variances pour la TVR.

TVR	Degré de liberté	Somme des carrés	Caré moyen	Fisher (F)	Valeur de P
Régression	4	0,101674	0,0254186	74,6514	0,000
Résidus	22	0,00749093	0,000340497		
Manque d'ajustement	20	0,00357597	0,000178799	0,0913411	0,999

La régression est significative avec une valeur de P de 0,000, indiquant que les variables indépendantes ont un effet significatif sur la variable dépendante.

Le manque d'ajustement n'est pas statistiquement significatif avec une valeur de P de 0,999.

La répartition des carrés montre une prédominance de la régression par rapport aux résidus, indiquant une bonne adéquation du modèle et une explication significative de la variation des données.

✓ **Pour le NO :**

L'analyse de variance (ANOVA) fournie par le tableau (4.7) permet d'évaluer la qualité et la pertinence du modèle pour la variable NO.

Tableau 4.7 L'analyse des variances pour NO.

NO	Degré de liberté	La somme des carres	Carre moyen	Fisher (F)	Valeur de P
Régression	14	20,4584	1,46131	11,4911	0,000
Résidus	12	1,52602	0,127168		
Manque d'ajustement	10	1,23936	0,123936	0,864674	0,647

La régression est significative ($P=0,000$), indiquant que les variables indépendantes ont un effet significatif sur la variable dépendante. La composante de manque d'ajustement n'est pas significative ($P=0,647$). La répartition des carrés montre une bonne adéquation du modèle, avec une part importante attribuée à la régression et une part relativement faible aux résidus. Ainsi, le modèle explique de manière significative la variation des données.

4.1.6 Les isoréponses :

Les figures 4.14, 4.15 et 4.16 présentent des diagrammes ternaires qui illustrent l'impact des bases Reformat, Isomérat et Naphta sur les propriétés de densité, TVR et NO. Dans ces diagrammes, les valeurs des bases gazoline et MTBE sont fixées à des niveaux élevés, respectivement 0,4 et 0,05. Ces représentations graphiques permettent d'observer clairement la contribution relative de chaque base aux variations observées dans ces propriétés.

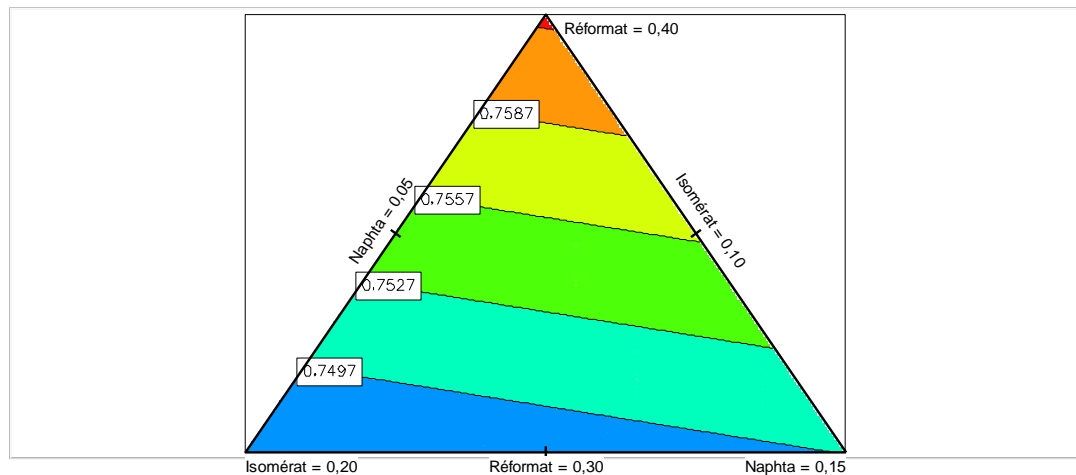


Figure 4.14 Densité.

La densité est positivement corrélée à la concentration de Reformat et négativement corrélée à la concentration de Naphta et d'Isomérat.

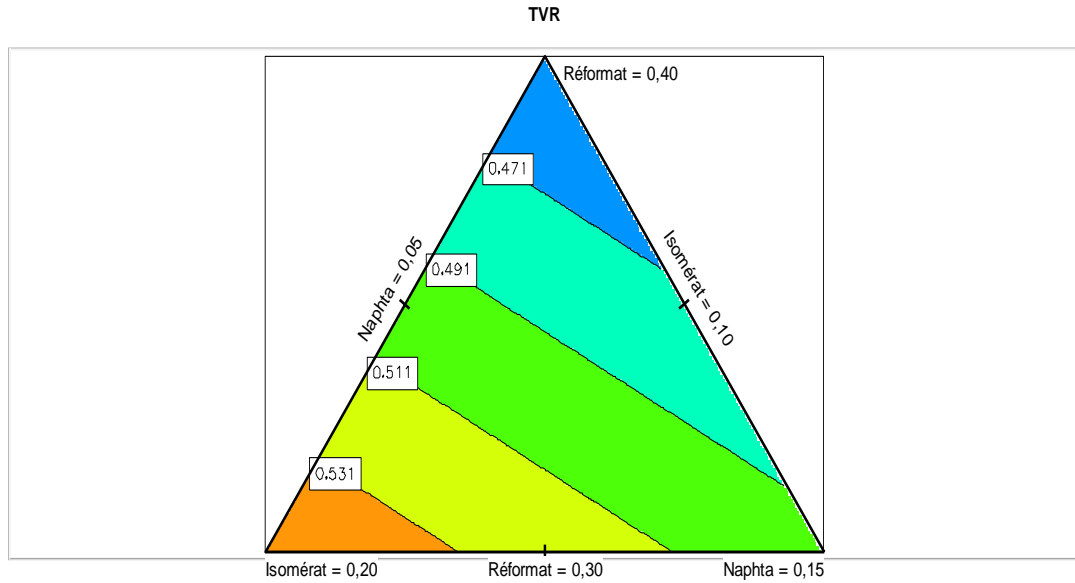


Figure 4.15 Tension de vapeur de Reid.

La TVR est inversement proportionnelle à la concentration en Naphta et le Réformat, tandis qu'elle est directement proportionnelle à la concentration en Isomérat.

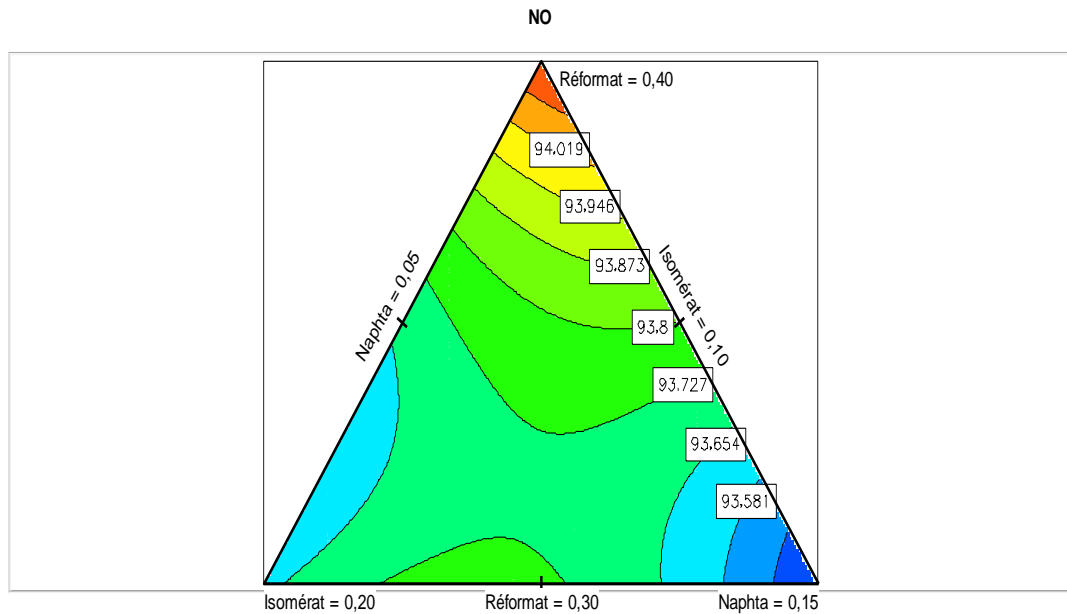


Figure 4.16 Indice d'octane.

La variation du reformat est directement proportionnelle à l'augmentation du nombre d'octane, tandis que l'isomérat et le naphta présentent une relation inverse avec celui-ci.

Lorsque le nombre d'octane atteint sa valeur minimale du côté droit, le naphta présente une augmentation tandis que l'isomérat et le reformat connaissent une diminution.

D'autre part, lorsque le nombre d'octane est à sa plus petite valeur du côté gauche, on observe une diminution du reformat et du naphta, tandis que l'isomérat augmente.

L'analyse des courbes d'isoreponses révèle la présence d'un domaine de compositions relativement étendu où la densité, la TVR et le NO se situent dans les spécifications requises pour l'essence. Les zones rouges des diagrammes indiquent les valeurs les plus élevées, tandis que les zones bleues représentent les valeurs les plus basses.

4.2 Optimisation de la formulation :

Dans le contexte de l'optimisation de la formulation de l'essence, l'objectif est de maximiser la contribution de chaque base dans le mélange tout en préservant certaines propriétés clés. Ces propriétés comprennent la maximisation des nombres d'octane (NO) dans l'intervalle spécifié de 95-96, la minimisation de la tension de vapeur de Reid (TVR) dans l'intervalle de 0,42027-0,439862, et la maximisation de la densité dans l'intervalle de 0,72-0,732.

Dans le cadre de cette étude, une composition spécifique a été optimisée, comprenant 45% de reformat, 10% d'isomerat, 35% de gazoline, 5% de naphta et 5% de MTBE. Cette formule a été minutieusement conçue pour répondre aux exigences de performance et de qualité de l'essence.

Le reformat, riche en hydrocarbures aromatiques, contribue à améliorer l'indice d'octane, tandis que l'isomerat permet d'ajuster les caractéristiques de volatilité. La gazoline, en tant que composant principal, fournit la puissance nécessaire, tandis que le naphta et le MTBE ajoutent des propriétés de volatilité et d'efficacité de combustion.

Cette formule équilibrée démontre l'engagement envers la performance du moteur et le respect de l'environnement, en respectant les réglementations en vigueur. En conclusion, cette formule optimale pour l'essence offre une combinaison judicieuse de composants qui répond aux normes de qualité et de durabilité, tout en offrant une expérience de conduite optimale.

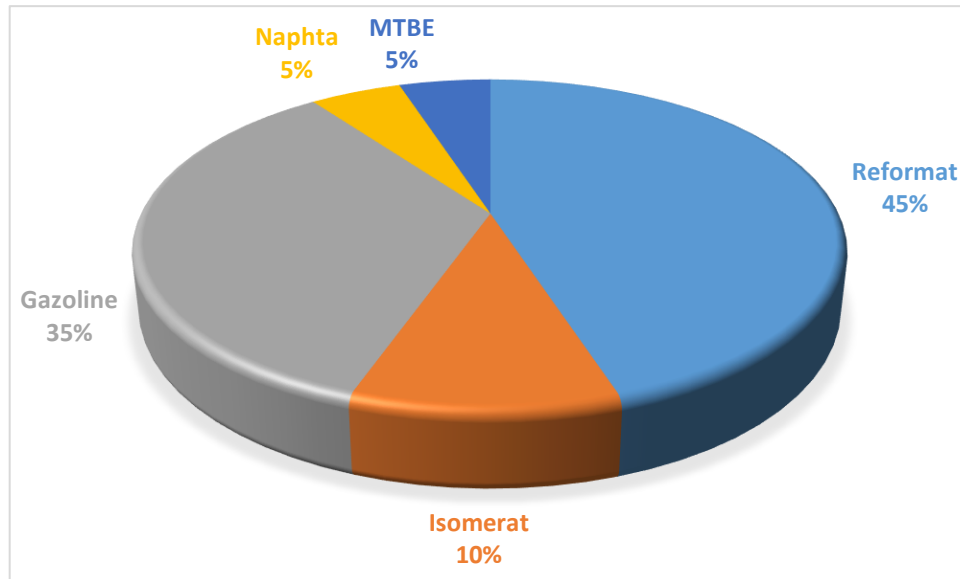


Figure 4.17 Formule optimale pour l'essence avec performances cibles.

La formule optimale, (Figure 4.17), a été testée expérimentalement avec succès. Les résultats des tests confirment que cette formule répond aux critères de performance fixés et est réalisable techniquement. Cela souligne son potentiel à fournir les niveaux d'octane, la tension de vapeur de Reid et la densité souhaitée.

La qualité de l'essence obtenue a considérablement surpassé celle de l'essence de référence en termes de valeur du NO.

Toutes les caractéristiques de l'essence optimisée respectent les spécifications et sont répertoriées dans le tableau (4.8).

Tableau 4.8 Comparaison entre les prédictions logicielles et les résultats expérimentaux des caractéristiques de l'essence optimisée.

Caractéristiques	Prédiction logicielle	Résultat expérimental	Conformité aux spécifications
Densité (Kg/m ³)	0.7656	0.7715	Oui
TVR (bar)	0.4328	0.722	Oui
NO	95.0734	95	Oui

Le tableau (4.8) met en évidence la comparaison entre les prédictions logicielles et les résultats expérimentaux pour différentes caractéristiques de l'essence optimisée. Dans l'ensemble, les résultats expérimentaux se sont avérés conformes aux prédictions du logiciel. La densité et la tension de vapeur de Reid se situent dans les plages spécifiées, ce qui indique

que les objectifs de conception ont été atteints. De plus, les niveaux d'octane obtenus correspondent également à la prédiction du logiciel. Ces résultats démontrent l'efficacité de l'approche d'optimisation utilisée et la qualité de l'essence obtenue par rapport aux spécifications requises.

CONCLUSION GENERALE

Cette recherche démontre l'importance des plans d'expérience et de l'analyse statistique, réalisés à l'aide du logiciel MODDE6, dans le processus de formulation des essences. Les résultats obtenus confirment le rôle significatif des composants indépendants : le reformat, l'isomérat, la gazoline, le naphta et le MTBE sur les caractéristiques et les performances des essences.

Les modèles développés présentent une bonne capacité de prédiction, avec des coefficients de détermination élevés. Pour le modèle de densité, le coefficient de détermination (R^2) est de **0,822**. Pour le modèle de tension de vapeur de Reid (TVR), le coefficient de détermination est de **0,931**. En ce qui concerne le modèle de l'indice d'octane (NO), le coefficient de détermination est également de **0,931**.

De plus, les valeurs de RMSEP et RMSPD obtenues pour chaque modèle sont conformes aux normes ASTM. Pour le modèle de densité, le RMSEP est de **0,0045 kg/m³** et le RMSPD est de **0,083%**. Pour le modèle de TVR, le RMSEP est de **0,0185 bar** et le RMSPD est de **0,39%**. Quant au modèle de l'indice d'octane, le RMSEP est de **0,3566** et le RMSPD est de **0,036%**.

L'analyse de régression met en évidence une relation significative entre les variables indépendantes et les variables dépendantes étudiées, renforçant ainsi la validité des modèles utilisés.

Dans le cadre de l'optimisation de la formulation, il a été observé que l'isomérat, la gazoline et le naphta ont un effet antagoniste sur les propriétés recherchées. En maximisant la proportion de reformat et de MTBE, en minimisant la proportion d'isomérat et de naphta, et en choisissant une valeur intermédiaire pour la proportion de gazoline, une essence optimisée a été formulée avec succès. Cette approche a permis de maximiser les nombres d'octane tout en respectant les plages spécifiées pour la tension de vapeur de Reid et la densité, répondant ainsi aux exigences de performance et de qualité.

En résumé, cette étude démontre l'efficacité des méthodes statistiques et des outils logiciels dans la formulation des essences reformulées, et met en avant une approche

stratégique permettant d'obtenir des mélanges optimisés répondant aux normes de qualité et de performance recherchées.

Pour améliorer le modèle actuel, plusieurs mesures peuvent être prises. Tout d'abord, il est recommandé d'éliminer progressivement l'utilisation du naphta, un produit pétrolier traditionnellement utilisé dans la formulation des essences (produit pauvre en composés d'indice d'octane élevé). Ensuite, il est possible d'explorer l'utilisation d'autres additifs efficaces tels que l'éthyl tert-butyl éther (ETBE) en remplacement du méthyl tert-butyl éther (MTBE). Cette substitution est encouragée en raison des inquiétudes environnementales liées au MTBE, qui peut contaminer les sources d'eau souterraines en cas de fuite. L'ETBE présente des avantages en termes de performances de combustion et de faible impact environnemental. De plus, l'utilisation d'isomérat de qualité peut être envisagée. L'isomérat est un produit raffiné utilisé dans la formulation des essences et peut offrir une meilleure qualité de carburant en termes de pouvoir calorifique et d'efficacité de combustion. En explorant ces alternatives, il est possible de promouvoir des carburants plus propres et plus performants, répondant aux exigences environnementales et améliorant l'expérience de conduite des véhicules.

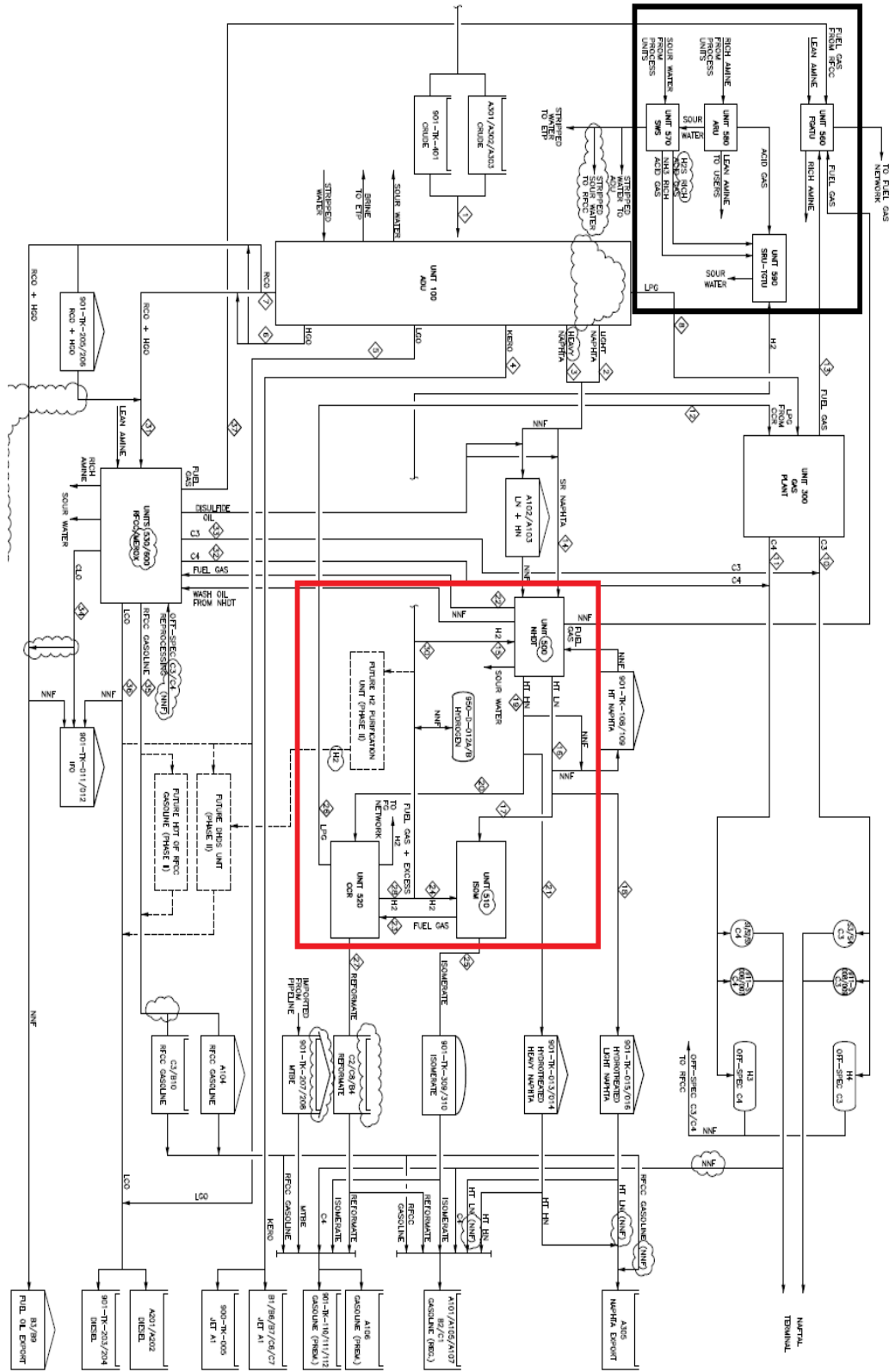
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

1. Manuel opératoire de la raffinerie d'Alger.
2. Manuel opératoire « Atmospheric distillation unit & gas plant unit ».
3. Manuel opératoire « Stockage ».
4. Manuel opératoire « Residual fluid catalytic cracking unit U530 ».
5. Manuel opératoire « Naphta hydrotreating unit U500 ».
6. Manuel opératoire « Light naphta isomerisation unit U510 ».
7. Manuel opératoire « Heavy naphta catalytic reforming unit CCR U520 ».
8. Manuel opératoire « Sulfure block unit ».
9. Manuel d'exploitation « Unité de l'eau brute U701 ».
10. Manuel d'exploitation « Réseaux d'eau de refroidissement U710 &U711 ».
11. Manuel d'exploitation « Unité d'eau déminéralisée U720 ».
12. Manuel d'exploitation « Unité U751 ».
13. Manuel opératoire « Unité de production d'air U781 ».
14. Manuel opératoire « Unité de production d'azote U810 ».
15. Manuel opératoire « Unité de polissage des condensats (unité 830)».
16. Manuel opératoire « Unité de soude caustique et acide chlorhydrique U840».
17. Manuel d'exploitation « Unité de traitement des effluents U850 ».
18. Manuel opératoire de laboratoire.
19. Chambost, G. (2008). Le raffinage du pétrole. Éditions Technip.
20. Perrin, G. (2019, 25 octobre). Raffinage du pétrole : principes et procédés. Futura Sciences.
21. Oil & Gas Journal. (2022). Refining. [31]; Roberts, P. (2012). The History of Oil. Lucent Books.
22. U.S. Energy Information Administration. (2021, March). The Economic Significance of the Petroleum Refining Industry.
23. Wilkes, J. (2018). Oil refining: Products and applications (1st ed.). Elsevier.
24. Speight, J. G. (2019). The chemistry and technology of petroleum (5th ed.). CRC Press.
25. "Atmospheric Distillation Unit (ADU) in Oil Refining - A Comprehensive Guide" publié sur le site web de la société Oil & Gas IQ.

26. Gary, J.H. et Handwerk, G.E. (2018). Petroleum Refining Processes, 4ème édition. Boca Raton, FL : CRC Press.
27. Farag, H., Soliman, A., Badr, M., & El-Shazly, A. (2014). Light Naphtha Isomerization Technology for High Octane Gasoline Production. Energy Procedia, 50, 945-952. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.116>.
28. Singh, A., Sahu, A. K., & Sharma, M. P. (2017). Light Naphtha Isomerization for High Octane Gasoline Production: A Review. Energy & Fuels, 31(10), 10393-10410.
29. Farag, H., El-Gendy, N., Hamed, M. M., & Mekhemer, G. A. (2014). Light naphtha isomerization technology for high octane gasoline production. Energy Procedia, 50, 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.031>.
30. Singh, A., Ghosh, A., & Verma, R. (2017). Light Naphtha Isomerization for High Octane Gasoline Production: A Review. Energy & Fuels, 31(9), 8959-8976. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00994>
31. M. o. «. H. n. c. r. u. C. U520, «Manuel opératoire « Heavy naphta catalytic reforming unit CCR U520».
32. P. E. (. S. U. William Reusch, Virtual Textbook of Organic Chemistry.
33. M. G. a. F. Ramoa, Les zéolithes :un nanomonde au service de la catalyse ,Chapitre14 : cgmie fine /synthèse organique par catalyse acide et par catalyse bifonctionnelle, 2021, pp. 231-242.
34. Montgomery, Douglas C. Design and Analysis of Experiments. 9th ed., John Wiley & Sons, 2017.
35. Teixeira LSG, Guimaraes PRB, Pontes LAM, Almeida SQ, Assis. JCR, Viana RF. Studies on the effects of solvents on the physicochemical properties of automotive gasoline. Soc Petrol Eng (2001) 1-6.
36. Groupy J, Creighton L. Introduction to design of experiment with JMPEexamples. 3rd ed. Editions SAS Institute Inc.;2008.
37. Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of liquids by Digital Density Meter (2008) ASTM D4052.
38. Standard Test Method for Vapor Pressure of petroleum product (Reid method) (200) ASTM D5191.
39. Standard Test Method for research Octane Number of Sparck-Ignition Engine Fuel ASTM D2699.

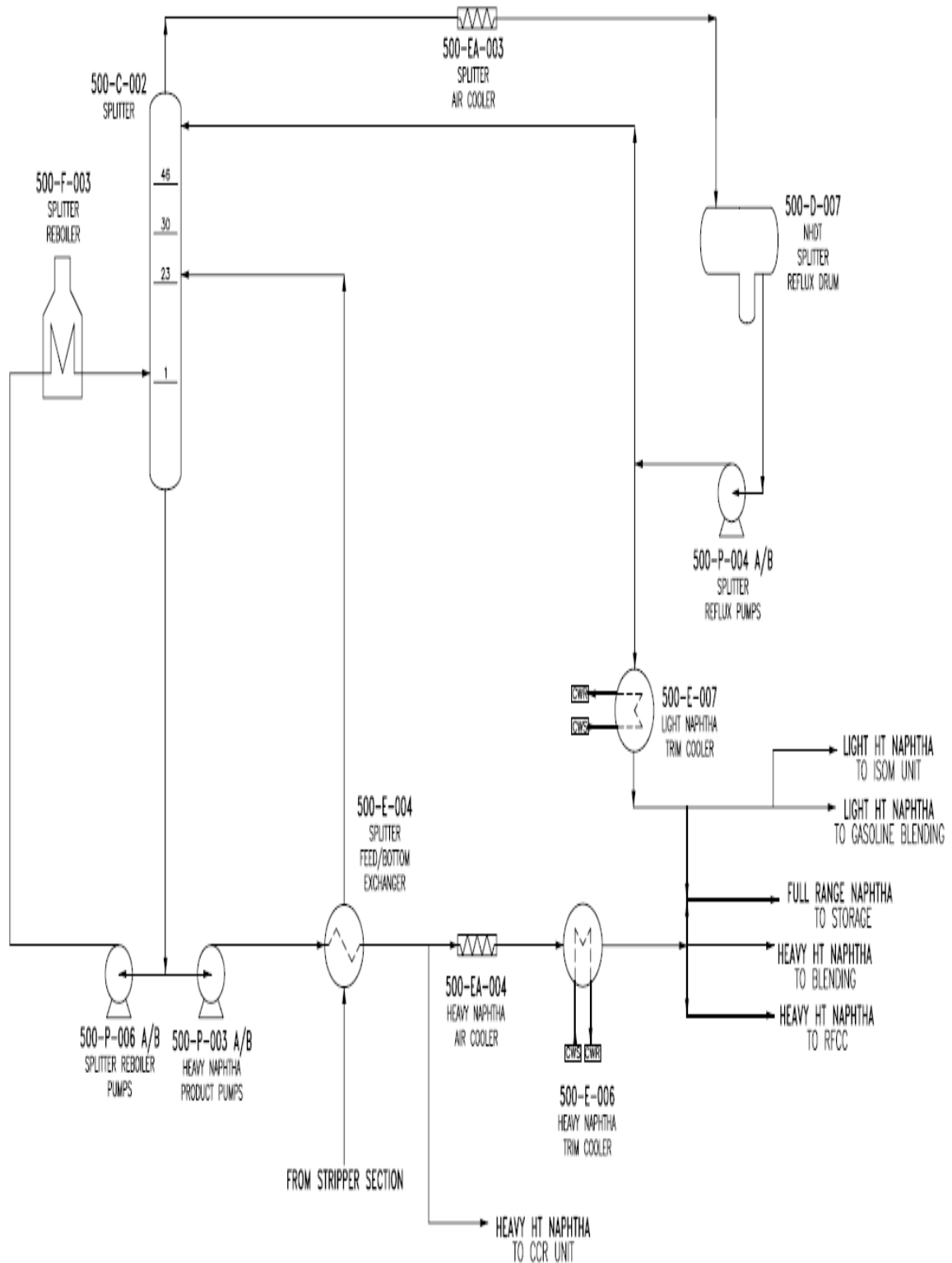
ANNEXE A

SCHEMA SYNOPTIQUE DE LA RAFFINERIE D'ALGER



ANNEXE B

SCHEMA DE FLUX DE PROCESSUS DE LA SECTION DE FRACTIONNEMENT DE L'UNITE NHT.



ANNEXE C

SCHEMA DE LA SECTION BLENDING

