

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE
ET POPULAIRE**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

**Faculté de Technologie Département de
Génie des Procédés**



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie Chimique.

Intitulé du mémoire

**Modélisation et optimisation du
procédé de reformage catalytique en
régénération continue CCR 520**

Présenté par :

HAMHOUM Amina

MADACI Takoua

Encadré par :

Pr. D. EL HADI

Mr. A. MAALEG

Année universitaire 2022/2023.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de procédé de reformage catalytique en régénération continue de la raffinerie d'Alger. L'objectif de notre travail est de la modélisation et l'optimisation des paramètres opératoires de procédé afin de maximiser l'indice d'octane de reformat et la pureté d'hydrogène produit. A cet effet, nous avons utilisé une base de données recensées dans la période de 2021-2022. Les paramètres utilisés pour cette étude sont la composition de la charge et l'état du catalyseur. Les résultats obtenus montrent qu'une valeur de **104.9** d'indice d'octane est obtenue avec une teneur de chlore dans le catalyseur cokéfié de **1.033%**, de **0.917%** de chlore dans le catalyseur régénéré, un pourcentage volumique en naphène de **30.83%** et un pourcentage en paraffine de **30.24%**. Une pureté d'hydrogène de **84.16%** avec une teneur en chlore dans le catalyseur cokéfié de **0.863%**, et de **1.004%** de chlore dans le catalyseur régénéré, un pourcentage volumique en naphène et en paraffine respectivement de **30%** et **40%**.

Mot clés : Reformage catalytique, modélisation, optimisation, indice d'octane, pureté d'hydrogène.

Abstract

This work focuses on the study of a catalytic reforming process in the continuous regeneration of the Alger refinery. The objective of our work is the modeling and optimization of process operating parameters in order to maximize the reformat octane number and the purity of the produced hydrogen. For this purpose, we used a database compiled during the period of 2021-2022. The parameters used for this study are the feed composition and the catalyst state. The obtained results show that an octane number of **104.9** is achieved with a chlorine content of **1.033%** in the coked catalyst, **0.917%** chlorine content in the regenerated catalyst, a volumetric percentage of naphthenes of **30.83%**, and a percentage of paraffins of **30.24%**. A hydrogen purity of **84.16%** is achieved with a chlorine content of **0.863%** in the coked catalyst and **1.004%** in the regenerated catalyst, and volumetric percentages of naphthenes and paraffins of **30%** and **40%**, respectively.

Keywords : Catalytic reforming, modeling, optimization, octane number, hydrogen purity.

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة عملية الإصلاح التحفيزي في التجديد المستمر لمصفاة الجزائر العاصمة. الهدف من عملنا هو نمذجة معاملات التشغيل العملية وتحسينها من أجل تعظيم رقم الأوكتان المعدل ونقاوة الهيدروجين المنتج. لهذا الغرض ، استخدمنا قاعدة بيانات محددة في الفترة من 2021-2022. المعلمات المستخدمة في هذه الدراسة هي تكوين الشحنة وحالة المحفز. أوضحت النتائج المتحصل عليها أن قيمة الأوكتان 104.9 يتم الحصول عليها مع محتوى الكلور في المحفز المكلس 1.033% ، 0.917% كلور في المحفز المجدد ، ونسبة حجم النفطين 30.83% ونسبة البارافين 30.24%. نقاوة الهيدروجين 84.16% مع محتوى كلور في المحفز المكوّن 0.863 ، و 1.004% من الكلور في المحفز المجدد ، ونسبة حجمية من النفطين والبارافين على التوالي 30% و 40%.

الكلمات المفتاحية: التحسين المحفز، النمذجة ، التحسين ، رقم الأوكتان ، نقاء الهيدروجين

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous tenons à remercier le Bon Dieu, pour le courage et la patience qu'il nous a offerts, afin de réaliser ce travail HAMDOALLAH.

Nous remercions nos chers parents pour leurs sacrifices et leurs encouragements

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre prometteur Mr. EL-HADI pour son soutien son aide indéfectible et surtout sa patience et sa gentillesse.

Nous adressons nos remerciements le chef de service de l'unité CCR 520 Mr. MAALAG notre encadreur durant notre stage à Alger.

Nous tenons à remercier tous les enseignants de département de génie des procédés pour leurs connaissances et savoir partagés avec nous durant tout notre cursus.

Et enfin notre gratitude à toute personne qui a contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

DÉDICACE

Je tiens à dédier ce travail à :

Ma chère mère ; Quoi que je fasse ou je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide, ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles : ma vie maman Salima

Mon cher père ; Tu as toujours été à mes coté pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection : ma force papa Taher

Je tiens de dédie ma grand-mère pour sa présence et son encouragement j'ai de la chance d'avoir une merveilleuse personne comme toi dans ma vie.

A moi-même merci.

Mais chers frères ; Qui m'a soutenu et épaulé pour que je puisse atteindre mes objectifs
Brahim, Haithem, mon petit Ayham.

Mais chères sœur Boutheina et Kouki

Mes chères amies : Houda, Lamia, Maroua, Linda, Maroua et Lamia. Merci pour tous les moments qui sont devenus inoubliables grâce à vous

Je remercie très fort mon binôme mimi qui a été à mes côtés toutes ces dernières années.

jolie Takwa

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A mon très cher père, Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection. Ma précieuse offre du Dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Yacine.

A ma très chère mère Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. À la femme qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : ma cher mère Fatiha.

A mon frère et mon bras droit Yasser qui n'a pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études.

A mes amies, mes proches pour leur soutien permanent dans les pénibles moments tout le long de mes études.

A l'homme le plus cher pour moi, celui qui m'a toujours motivé. Ma vie ne serait pas aussi magique sans ta présence.

Je remercie également mon binôme et ma copine Takoua et je vous souhaite bonne chance dans votre vie.

Merveilleuse Amina

Table des matières

Résumé

Remerciement

Dédicace

Table de matières

Liste des figures

Listes des tableaux

Listes abrégations

Introduction générale.....	1
Chapitre I : généralités et présentation de l'entreprise.	
I.1 Raffinage.....	3
I.1.1 Les principales Operations de raffinage.....	3
I.2.1 Les procédés de séparation.....	3
I.2.2 Les procédés de conversion.....	5
I.2.3 Les procédés d'amélioration.....	5
I.3 Présentation de la raffinerie d'Alger.....	6
I.3.1 Capacité de production.....	7
I.3.2 Principales installations de la raffinerie RA1G.....	8
I.3.2.1 Unité de distillation atmosphérique topping 100.....	8
I.3.2.2 Unité de séparation des gaz liquéfiés gaz-plant 300.....	8
I.3.2.3 Unité d'hydrotraitement des naphtas : NHT 500.....	8
I.3.2.4 Unité d'isomérisation des naphtas : ISOM 510.....	9
I.3.2.5 Unité de reformage catalytique CCR 520.....	10

I.3.2.6 Unité de craquage catalytique RFCC 530.....	10
I.3.2.7 Section Sulfure BLOC.....	10
I.3.2.8 Les utilités	10
I.3.2.9 Parc de stockage.....	10
I.3.2.10 Laboratoire.....	11

Chapitre II : le procédé de reformage catalytique à Régénération continue

II.1 Le reformage catalytique.....	12
II.2 Variables influent le procédé	13
a) Pression.....	13
b) Température.....	13
c) Vitesse Spatiale.....	14
d) Rapport H ₂ /HC et pression partielle de H ₂	14
e) Qualité de l'alimentation.....	14
f) Etat de catalyseur	15
II.3 Le principe du procédé de reformage catalytique.....	15
II.3.1 Section de réaction-régénération.....	15
II.3.2 Section d'absorption.....	16
II.3.3 Section de stabilisation	17

Chapitre III : modélisation et l'optimisation du procédé de Reformage catalytique

Introduction.....	18
III.1 Caractéristiques du procédé CCR.....	18
III.1.1 Principales caractéristiques de la charge (naphta lourd).....	18
III.1.2 Caractéristiques du catalyseur.....	20

III.1.3 Principales caractéristiques de reformat	21
III.2. Effet des paramètres de process sur la qualité de reformat.....	22
III.2.1 Evolutions de l'indice d'octane de reformat en fonction de la quantité de chlore en catalyseur cokéfié.....	22
III.2.2 Evolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la quantité de chlore en catalyseur régénéré.....	23
III.2.3 Effet de la composition de charge sur l'indice d'octane.....	24
III.2.3.1 Effet de composés de %P présents dans la charge sur l'indice d'octane.....	24
III.2.3.2 L'effet de la composition de charge en naphènes sur l'indice d'octane.....	25
III.3 La modélisation.....	25
III.3.1 Modélisation de l'indice d'octane.....	27
III.3.2 La modélisation de la pureté d'hydrogène (H ₂ %).....	31
III.3.3 La différence entre les valeurs des coefficients de corrélation et les erreurs relatives moyennes des différents modèles.....	36
III.4 La représentation graphique des modèles obtenus.....	37
III.4.1 Les modèles de l'indice d'octane.....	37
III.4.2 Les modèles de la pureté d'hydrogène.....	38
III.5 L'optimisation.....	40
III.6 Effet de la composition de reformat sur l'indice d'octane.....	41
III.7 L'efficacité de reformat.....	44
Conclusion générale	45

Références bibliographiques

ANNEXES

Listes des figures

Chapitre I : Généralités et présentation de la raffinerie d'Alger

Figure I.1: Schéma représentant le procédé de la distillation atmosphérique.....	4
Figure I.2 : Schéma représentant le procédé de distillation sous vide.....	5
Figure I.3 : Situation géographique de la raffinerie d'Alger RA1G.....	6
Figure I.4 : Schéma simplifié de la raffinerie d'Alger RA1G.....	9

Chapitre II : Procédé de reformage catalytique en régénération continue.

Figure II.1 : Illustration du catalyseur cokéfié et après régénération.....	13
Figure II.2 : Section réaction-régénération.....	16
Figure II.3 : Section d'absorption.....	16
Figure II.4 : Section de stabilisation.....	17

Chapitre III : modélisation et l'optimisation du procédé de Reformage catalytique.

Figure III.1: Evolution de l'indice d'octane en fonction de la quantité de Cl en catalyseur noir.....	22
Figure III.2 : Evolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la quantité de chlore en catalyseur régénéré.....	23
Figure III.3 : Evolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la composition de paraffines présentes dans la charge.....	24
Figure III.4 : Evolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la composition de naphènes présentes dans la charge.....	25
Figure III.5 : Comparaison entre les valeurs de l'indice d'octane réels et expérimentales formulés par le modèle du premier degré.....	37
Figure III.6 : Comparaison entre les valeurs de l'indice d'octane réel et expérimentales formulés par le modèle du premier degré.....	38

Figure III.7 : Comparaison entre les valeurs de l'H₂% réelles et expérimentales formulés par le modèle linéaire.....39

Figure III.8 : Comparaison entre les valeurs de l'H₂% réelles et expérimentales de modèle de second degré.....39

Listes des tableaux

Chapitre III : modélisation et l'optimisation du procédé de Reformage catalytique.

Tableau II.1 : Les différentes propriétés du catalyseur CR401.....	13
Tableau III.1 : Composition de la charge utilisés.....	19
Tableau III.2 : Caractéristique de catalyseur utilisé dans le procédé CCR.....	20
Tableau III.3 : Principales caractéristiques de reformat.....	21
Tableau III.4 : Données utilisées pour la modélisation de l'indice d'octane.....	27
Tableau III.5 : Comparaison entre les valeurs réels et estimés de modèle du premier degré de NO.....	29
Tableau III.6 : Comparaison entre les valeurs réels et estimés de modèle de second degré de NO.....	31
Tableau III.7 : Données utilisées pour la modélisation de la pureté d'H ₂ %.....	32
Tableau III.8 : Comparaison entre les valeurs réels et estimés de modèle du premier degré de H ₂ %.....	33
Tableau III.9 : Comparaison entre les valeurs réels et estimés de modèle de second degré de H ₂ %.....	35
Tableau III.10 : Valeurs des coefficients de corrélation et les erreurs relatives moyennes des différents modèles.....	36
Tableau III.11 : Données utilisées pour la modélisation de l'indice d'octane dans le reformat.....	41
Tableau III.12 : Comparaison entre les valeurs réels et estimés de modèle de second degré de H ₂ %.....	43

Liste des abréviations

SONATRACH : Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures.

OPEC: Organization of the Petroleum Exporting Countries.

RA1G: Raffinerie d'Alger.

CCR: Continuous Catalytic Reforming.

NHT: Naphta hydrotreating.

RFCC: Residual Fluid Catalytic Cracking.

RON: Research Octane Number.

NH₃: Ammoniac.

H₂S : Sulfure d'hydrogène.

HCl : Acide chlorhydrique.

BTX : Benzène, Toluène, Xylène.

H₂/HC : Rapport molaire de l'hydrogène pur à la charge d'hydrocarbure.

GPL : Gaz de Pétrole liquéfié.

CR401 : Catalyseur de l'unité de reformage catalytique.

TVR : Tension de vapeur Reid.

NO : L'indice d'octane.

%P : Composition volumique de paraffine.

%N : Composition volumique volumique naphtène.

ppm : Partie par million.

PI : Point initial.

PF: Point final.

%Err : Erreur relative

Introduction générale

Le pétrole a joué un rôle crucial en tant qu'énergie emblématique du XX^e siècle, symbolisant l'industrialisation, l'amélioration du confort de vie et la démocratisation des moyens de transport, notamment les automobiles.

Cette nouvelle source d'énergie, plus concentrée, maniable et flexible que le charbon, a révolutionné le processus de mécanisation mondial de manière irréversible.

L'Algérie, comme tout autre pays producteur de pétrole (OPEC : Organization of the Petroleum Exporting Countries), cherche à développer sa politique pétrolière à travers l'augmentation de ses capacités de production et la consolidation de l'investissement étranger dans le domaine des hydrocarbures. Au fait, elle dispose de plus de 8 champs de forage de pétrole, assurent le traitement et la transformation du pétrole brut en produits pétroliers finis via trois étapes principales. La première étape consiste à séparer les molécules du brut par distillation atmosphérique tandis que la deuxième vient subvenir aux besoins du marché en produits à haute valeur commerciale, en effectuant des transformations moléculaires par les procédés de conversion qui se reposent sur le craquage et le reformage catalytique. La dernière étape repose sur les procédés d'amélioration d'épuration qui visent à débarrasser les produits traités, ainsi que les effluents liquides et gazeux, des composés indésirables qui y sont contenus en faibles proportions.

- Concentré sur ces différents procédés de traitement, de nombreuses études ont été réalisées pour optimiser leur rendement et améliorer leur fonctionnement. Dans cette perspective, nous nous sommes intéressés à faire une étude sur le procédé de reformage catalytique à régénération continue utilisée dans la raffinerie de Sidi Arcine à Alger, au niveau de son unité de reformage catalytique CCR 520, lancée le 24 février 2020 en collaboration avec la société Française Axens. Ainsi, dans ce travail, nous nous sommes fixés pour objectif de modéliser et d'optimiser les conditions opératoires de ce process sur leur rendement de production, tels que l'indice d'octane de reformat et la pureté d'hydrogène dégagé.

A base de ces objectifs, nous avons structuré l'ensemble de notre travail en trois chapitres :

- Le premier chapitre a consacré une généralité sur le pétrole et le raffinage, ensuite une présentation de la raffinerie d'Alger RA1G ;

- Le deuxième chapitre est consacré à décrire le procédé de reformage catalytique à régénération continue CCR 520 de la raffinerie d'Alger ;
- Le troisième chapitre est réservé à la modélisation et l'optimisation du procédé de reformage catalytique.

Ce travail se termine par une conclusion générale.

REFORNCES

**Chapitre I : Généralité et
présentation de la raffinerie d'Alger
RA1G**

I.1 Raffinage

Le raffinage du pétrole commence par la distillation ou le fractionnement du pétrole brut en vue de le séparer en différents groupes d'hydrocarbures.

Les produits obtenus dépendent directement des caractéristiques du brut traité. Nous transformons ensuite la plupart de ces produits de distillation en produits plus facilement utilisables, en modifiant leurs structures physiques et moléculaires par craquage, reformage et d'autres procédés de conversion.

Par la suite, nous soumettons les produits obtenus à divers procédés de traitement et de séparation telle que l'extraction, l'hydrocraquage et l'adoucissement pour aboutir aux produits finis.

Dans les raffineries les plus simples, nous nous tenons habituellement à la distillation atmosphérique et à la distillation sous vide, alors que, dans les raffineries intégrées, nous procédons au fractionnement, à la conversion, au traitement et au mélange, ainsi qu'à la production de lubrifiants, de fiouls lourds et de bitumes. Ces raffineries peuvent aussi comporter des installations de traitement pétrochimique [1].

I.2 Les principales opérations de raffinage

La présence courante d'eau, de sels inorganiques, de solides en suspension et de traces de métaux solubles dans le pétrole brut nécessite une première étape de raffinage appelée dessalage ou déshydratation. Cette étape vise à éliminer ces contaminants afin de réduire les problèmes tels que la corrosion, le colmatage et l'encrassement des installations de raffinage, tout en prévenant l'empoisonnement des catalyseurs utilisés dans les unités de production [2].

I.2.1 Les procédés de séparation

La première étape du processus de raffinage consiste à fractionner le pétrole brut selon la volatilité de chaque fraction, en utilisant des tours de distillation atmosphérique et sous vide.

La distillation atmosphérique du pétrole brut s'effectue par le procédé de séparation le plus classique. On crée par vaporisation partielle du pétrole brut liquide une phase vapeur et une phase liquide. La phase vapeur, plus légère, est ensuite recueillie par condensation. [3]

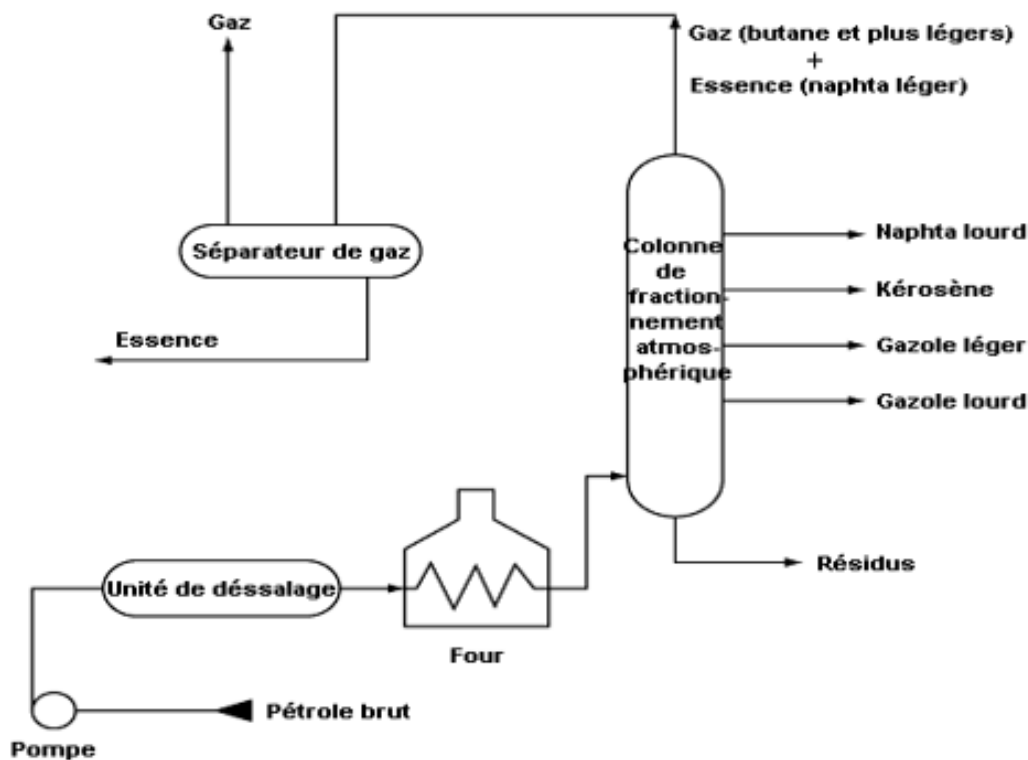


Figure I.1: schéma représentant le procédé de la distillation atmosphérique.

I.2.2 Distillation sous vide (distillation à basse température)

Est un procédé de distillation réalisée sous pression réduite. Comme avec la distillation, cette technique sépare les composés à base de différences de points d'ébullition. Elle implique de mettre la colonne de distillation sous vide ou à une pression atmosphérique nettement inférieure à 760 millimètres de mercure (mmHg).[3]

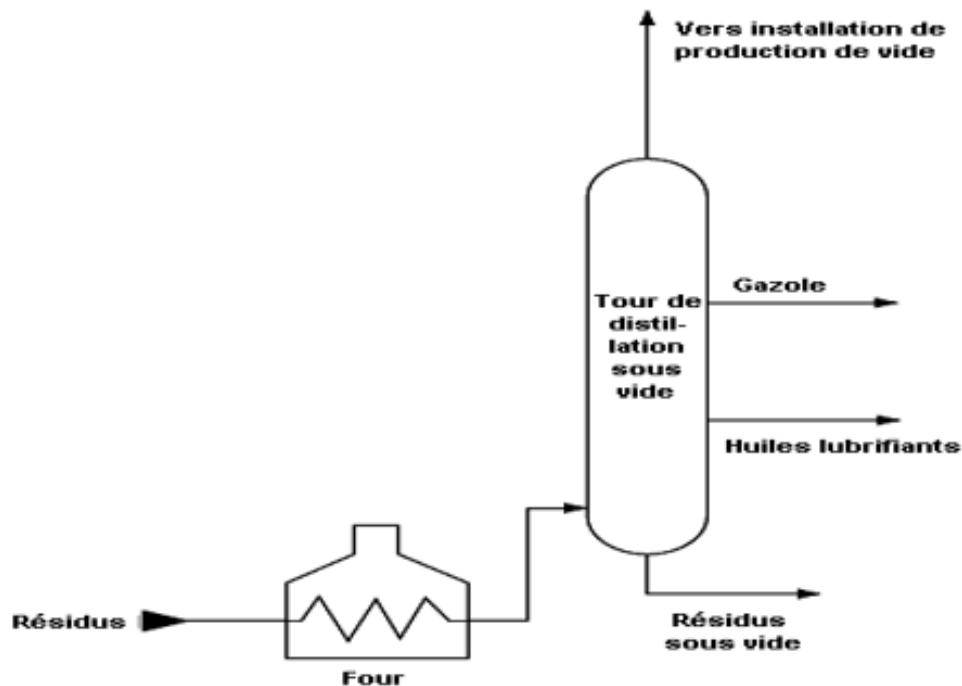


Figure I.2 : schéma représentant le procédé de distillation sous vide

I.2.2 Les procédés de conversion

Une fois les opérations de séparation terminées, il reste encore une proportion d'hydrocarbures lourds qui ne répond pas à la demande de produits plus légers.

Pour remédier à cela, ces molécules lourdes sont soumises à un processus de craquage, qui consiste à les décomposer en deux ou en plusieurs molécules plus légères. Le craquage est l'un des procédés de conversion couramment utilisés dans l'industrie pétrolière pour produire des produits plus précieux aux besoins du marché [2].

I.2.3 Les procédés d'amélioration

Ces procédés permettent de réduire les émissions de polluants et de rendre les émissions plus conformes aux normes environnementales, contribuant ainsi à une meilleure qualité de l'air et à une réduction des impacts négatifs sur la santé humaine et l'environnement [2].

I.3 Présentation de la raffinerie d'Alger

La raffinerie d'Alger, abrégé RA1G, est un complexe de traitement de pétrole brut qui appartient au leader algérien de pétrole et de gaz : SONATRACH. Implantée à Sidi Arcine (Baraki) à une vingtaine de kilomètres à l'est d'Alger et à 5km au sud d'EL Harrach, sur une superficie de 182 hectares, cette raffinerie qui a été mise en service en février 1964 par un groupement de compagnies étrangères traite le pétrole brut provenant de Hassi Messaoud, pour satisfaire la demande, sans cesse, croissante du centre du pays en carburant (Essence, Kérosène et Gasoil) et exporter d'autres produits tels que le naphta et le fuel [4].



Figure I.3 : Situation géographique de la raffinerie d'Alger RA1G [5].

I.3.1 Capacité de production

La principale mission de la raffinerie est de satisfaire les besoins en produits de première nécessité ainsi que les divers produits pour l'industrie pétrolière. Grâce à sa modernisation selon les normes internationales de qualité et de sécurité, la capacité de production de cette usine a été augmentée pour atteindre 3,645 millions de tonnes par an de pétrole brut saharien. La production est conforme à la norme Euro V, une norme antipollution, et permet de répondre à 95% des besoins en carburant de la région Centre en Algérie [6].

La raffinerie propose une gamme variée de produits qui répondent aux normes nationales et internationales, notamment :

- Du butane et propane commercial ;
- Du naphta (30% d'essence SR et 70% de solvant total) ;
- Des essences super ;
- Du jet (kérosène) ;
- Du gasoil ;
- Fuel lourd [7].

I.3.2 Principales installations de la raffinerie RA1G

La raffinerie d'Alger comporte les installations principales suivantes :

- Unité de distillation atmosphérique (unité 100) ;
- Unité de reforming catalytique (unité 200) ;
- Unité de séparation de gaz (unité 300) ;
- Une salle de contrôle ;
- Parc de stockage ;
- Pomperie ;
- Un laboratoire ;
- La centrale thermoélectrique (Les utilités) ;
- L'eau dans la raffinerie ;
- Unité MS BLOCK.

I.3.2.1 Unité de distillation atmosphérique : Topping 100

Le topping 100 est l'unité mère de la raffinerie et elle est destinée à séparer les sous-produits pétroliers du pétrole brut. Elle a été conçue pour traiter soit le brut de Hassi Messaoud seul, ou bien en mélange avec des proportions variables n'excédant pas 28% en poids de condensat provenant de Hassi R'Mel [2, 8].

I.3.2.2 Unité de séparation des gaz liquéfiés : Gaz-plant 300

L'unité de séparation et de traitement des gaz liquéfiés U 300 a été dimensionné pour traiter le produit liquide venant des accumulateurs de tête des débutaniseurs de l'unité de distillation et de l'unité de reformage afin d'obtenir du propane et du butane commerciaux [2, 8].

I.3.2.3 Unité d'hydrotraitement des naphthas : NHT 500

L'unité 500 est une unité d'hydrotraitement des naphthas qui permet d'obtenir différentes coupes de naphtha débarrassées de composés tels que l'eau, les halogènes, les sulfures, le nitrogène, les oléfines et dioléfines, le mercure et l'arsenic qui peuvent altérer l'efficacité des catalyseurs utilisés dans les unités aval d'isomérisation et de reformage CCR [2, 9, 10].

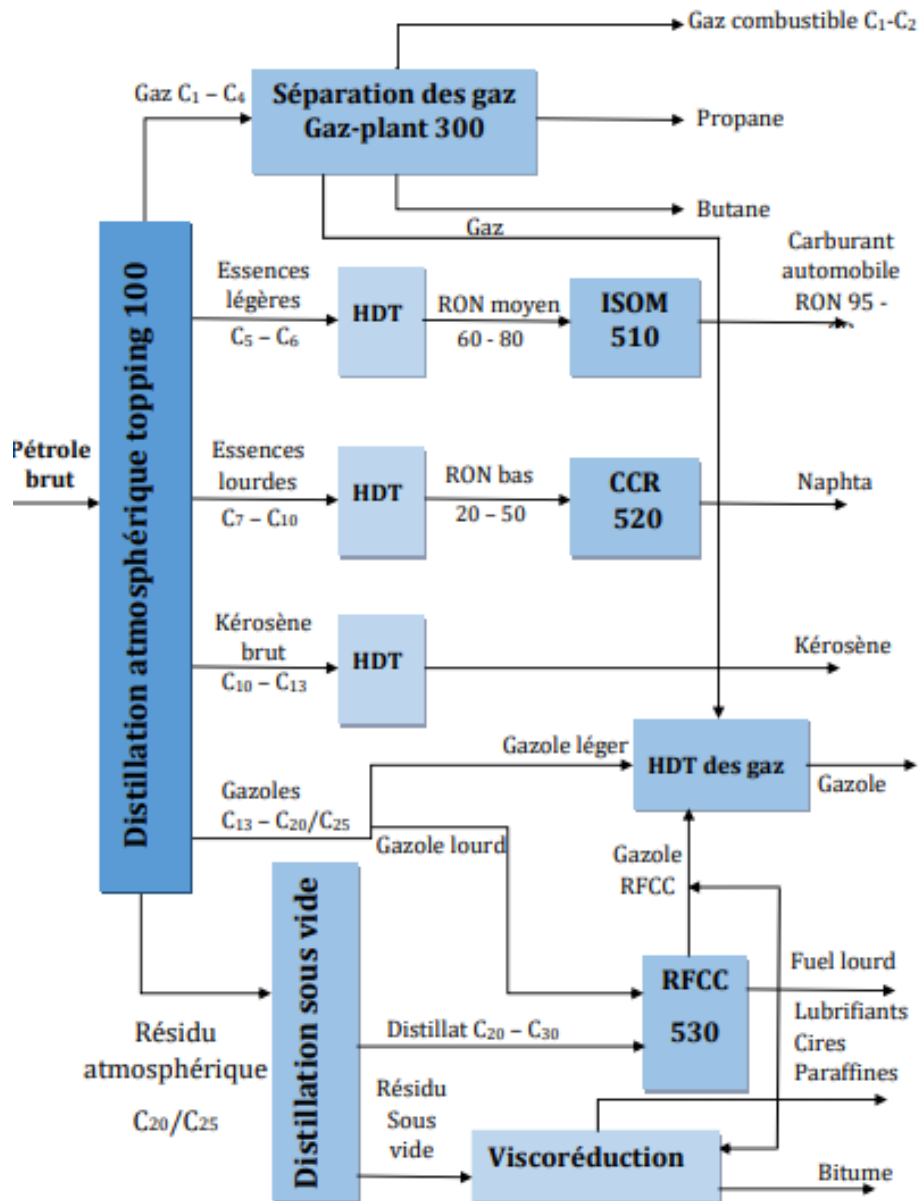


Figure I.4 : Schéma simplifié de la raffinerie d'Alger RA1G [11].

I.3.2.4 Unité d'isomérisation des naphas : ISOM 510

Cette unité permet la transformation des C5 et C6 en leurs isomères, afin d'obtenir un isomérat à haut indice d'octane (84-88) qui sera par la suite utilisé dans les sections de mélanges (blending), en le mélangeant avec le reformat de RON (95-102) dans le but d'obtenir les essences commerciales (normale et super) [2, 9, 12].

I.3.2.5 Unité de reformage catalytique CCR 520

L'unité de reformage CCR est installée en vue de remplacer l'unité de reformage catalytique actuelle qui fonctionne en lit fixe (U200), grâce au catalyseur qui est introduit (lit fluidisé). Cette unité permet d'obtenir un meilleur rendement et un produit à indice d'octane élevé [2, 9, 13].

I.3.2.6 Unité de craquage catalytique RFCC : 530

Cette unité est conçue pour traiter les résidus (fractions lourdes) issus de l'unité de distillation atmosphérique (U100) en utilisant le procédé de craquage catalytique à haute température [2, 14].

I.3.2.7 Section Sulfure BLOC

Cette section est composée de quatre unités qui ont pour but de traiter le gaz issu de l'unité RFCC (U530) et l'eau issue de tous les procédés de la raffinerie qui sont riches en H₂S et en NH₃, en utilisant de l'amine pour le gaz et de la soude pour l'eau [2, 15, 16].

I.3.2.8 Les utilités

La section utilités représente un ensemble d'unités (refroidissement, torche, air comprimé, acide chlorhydrique, soude caustique, traitement des effluents, etc.) qui ont pour rôle d'assurer, en continu, le bon fonctionnement des sections de la raffinerie RA1G [2, 9].

I.3.2.9 Parc de stockage

Composé de 53 réservoirs cylindriques d'une capacité totale de 474 500 m³ pour le stockage des différents produits et 9 réservoirs sphériques d'une capacité de 15 106 m³ pour le stockage du propane et du butane [2, 9].

I.3.2.10 Laboratoire

Comme toute industrie, la raffinerie RA1G est équipée d'un laboratoire qui se charge d'effectuer un certain nombre de tests classiques sur différents produits finis et semi-finis, issus du processus de raffinage, et cela, dans le but de contrôler leurs spécifications selon les normes et détecter ainsi les anomalies de fonctionnement [2, 9].

**Chapitre II : Le procédé de
reformage catalytique en
régénération continue.**

II.1 Le reformage catalytique

Le reformage catalytique est un procédé chimique utilisé dans le raffinage du pétrole pour transformer les hydrocarbures naphthéniques naturels à faible indice d'octane (40 à 60) en molécules cycliques aromatiques à haut indice d'octane (environ 102) appelé reformat.

Ce processus se déroule dans des réacteurs à haute température et basse pression, en présence d'un catalyseur bimétallique. En plus de produire des quantités importantes d'hydrogène gazeux utilisées ultérieurement dans d'autres étapes de raffinage, ce processus génère également du gaz combustible (méthane, éthane), du GPL (propane, butane), ainsi que des composés tels que le toluène, le benzène et le xylène (BTX) [17].

Il existe trois types de fonctionnement de procédé :

- Semi-régénératives (lit fixe) ;
- Les régénératives cycliques ou lit circulant ;
- Les régénératives en continu ou lit mobile.

L'unité de reformage catalytique à régénération continu CCR 520 de la raffinerie RA1G est conçue pour réaliser les objectifs suivants :

- Produire un reformat à haut indice d'octane ;
- Produire un gaz riche en hydrogène ;
- Produire différentes compositions de GPL.

Cette unité est alimentée par le naphta lourd hydrotraité (venant de l'unité de naphta hydrotraité).

Le catalyseur CR 401 utilisé dans le reformage catalytique appelé bimétalliques (étain platine à base d'alumine), ses propriétés physiques sont :

- Il démontre une stabilité, une sélectivité et une régénération élevées, ce qui garantit son efficacité dans le processus de conversion ;
- Il possède une capacité élevée à retenir les chlorures, ce qui contribue à maintenir la pureté des produits finaux [13, 18].

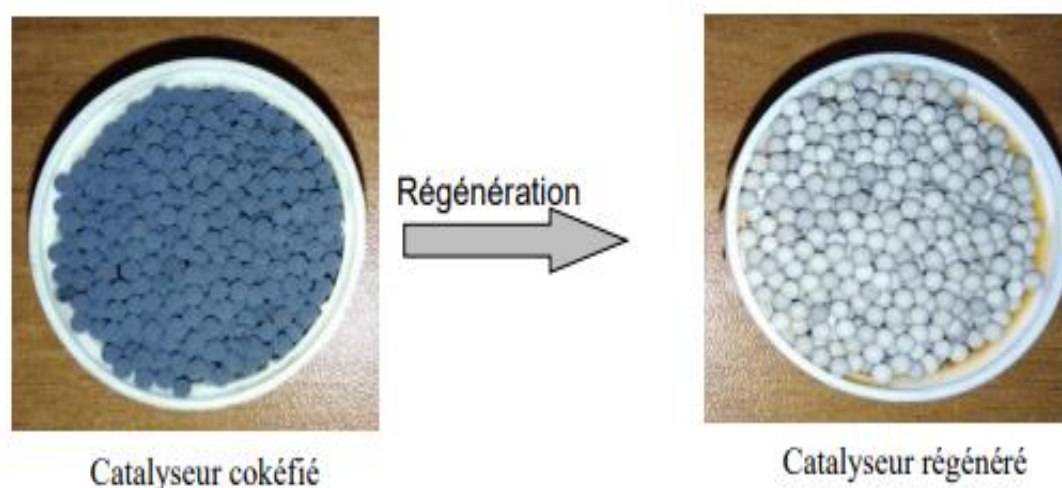


Figure II.1: Illustration du catalyseur cokéfié et après régénération.

Tableau II.1 : Les différentes propriétés du catalyseur CR401

Platine et étain sur les sphères d'alumine de pureté élevée	
Diamètre	1,8mm
Platine	0,3 % en poids
Perte au feu à 900 °c	1% en poids
Air de surface	200 m ² /g
Volume total des pores	0,6 cm ³ /g

II.2 Variables influençant le procédé

Les variables qui influencent le procédé de reformage catalytique de la raffinerie RA1G sont des variables indépendantes [19].

a) Pression

La pression joue un rôle fondamental en influençant les vitesses de réactions. Sa diminution entraîne plusieurs avantages :

- Augmentation de l'indice d'octane ;
- Amélioration du rendement en reformat.

Réduction des fractions légères, ce qui produit une essence plus lourde et un hydrogène plus pur.

Cependant, cette diminution de pression à un inconvénient majeur :

- Une formation accrue de coke qui nécessite des régénérations fréquentes.

b) Température

Dans l'unité de reformage, le niveau de coke sur le catalyseur est maintenu à un faible niveau constant grâce à une régénération continue.

L'augmentation de la température à l'entrée du réacteur entraîne une augmentation de la conversion des composés non aromatiques présents dans l'alimentation, principalement des paraffines. Cependant, étant donné que la réaction d'hydrocraquage est plus favorisée que la cyclisation des paraffines, cela conduit à une augmentation de l'indice d'octane, à une diminution de la production de reformat et à une augmentation du dépôt de coke. Pour compenser cela, la circulation du catalyseur est augmentée afin de maintenir une teneur en coke constante sur le catalyseur.

c) Vitesse Spatiale

La vitesse spatiale est la quantité de charge d'alimentation exprimée en masse (ou volume) qui est traitée par heure, divisée par la quantité de catalyseur dans les réacteurs, exprimée aussi en masse (ou volume).

Au fait, une baisse de la vitesse spatiale signifie une augmentation du temps de séjour qui influence directement la cinétique des réactions de reformage et une sévérité accrue. Par conséquent, le contact entre la charge introduite et le catalyseur est amélioré, ce qui se traduit par une augmentation de l'indice d'octane, une plus faible production de reformat et un important dépôt de coke.

d) Rapport H_2/HC et pression partielle de H_2

Ce rapport représente le débit d'hydrogène pur dans le gaz de recyclage sur le débit d'alimentation.

À vrai dire, l'hydrogène de recyclage est nécessaire à l'opération de reformage pour des raisons de stabilité du catalyseur. Sa présence n'a aucun impact sur la qualité du produit ni sur le rendement de la production, cependant il permet de véhiculer les produits de réaction et les matériaux condensables du catalyseur : les agrégats Pt-Sn (l'alliage des deux métaux).

De ce fait, il est à noter qu'un rapport élevé réduit la formation et l'accumulation de coke.

e) Qualité de l'alimentation

La qualité de la charge d'alimentation dépend principalement de sa gamme de distillation (fractions) et de sa composition chimique. La présence des fractions lourdes (les paraffines et les naphènes) permet d'obtenir un haut indice d'octane de reformat et une formation importante de coke sur le catalyseur, ce qui réduira la pureté d'hydrogène produit.

f) État de catalyseur

Le catalyseur utilisé dans les réactions nécessite d'être régénéré après son passage dans les réacteurs. La confirmation de cette régénération s'effectue par les mesures de la teneur en carbone et la teneur en chlore (qu'il représente la fonction acide du catalyseur).

Les différents échantillons prélevés aux niveaux du dernier réacteur (catalyseur cokéfié), avec un autre échantillon, qui est prélevé à la sortie du régénérateur.

La bonne régénération du catalyseur implique une augmentation de l'indice d'octane de reformat produit, et la pureté d'hydrogène dégagée. D'autre mot, la présence d'acide permet d'avoir les réactions souhaitables, qui transformeront les composants lourds aux aromatiques (qui ont un haut indice d'octane), ainsi que la formation d'H₂% de haute pureté.

II.3 Le principe du procédé de reformage catalytique

L'unité de reformage catalytique CCR 520, qui assure la transformation du naphta lourd en reformat, est composée de trois sections principales [19] :

II.3.1 Section de réaction-régénération

Cette section est divisée en deux zones. Une zone réactionnelle qui se compose de quatre réacteurs à lit mobile installés en série, où toutes les réactions de reformage catalytique ont lieu (tel que la Déshydrogénation des naphtènes se fait au niveau du réacteur R1, déshydrocyclisation des paraffines dans le réacteur R2, isomérisation des naphtènes dans le réacteur R3 et le craquage dans le R4).

Chacun de ces réacteurs est muni d'un four pour porter la charge à la température nécessaire de réaction comme la montre la Figure II.2. Ils sont aussi associés par des pots de lifte au-dessus et en dessous, séparés par des trémies supérieures et des trémies inférieures qui servent au déplacement du catalyseur. Le produit résultant de cette zone est un reformat non stabilisé.

La deuxième zone sert à la régénération du catalyseur. Elle comporte un régénérateur composé de trois zones (combustion, oxychloration et calcination) et une chambre de réduction.

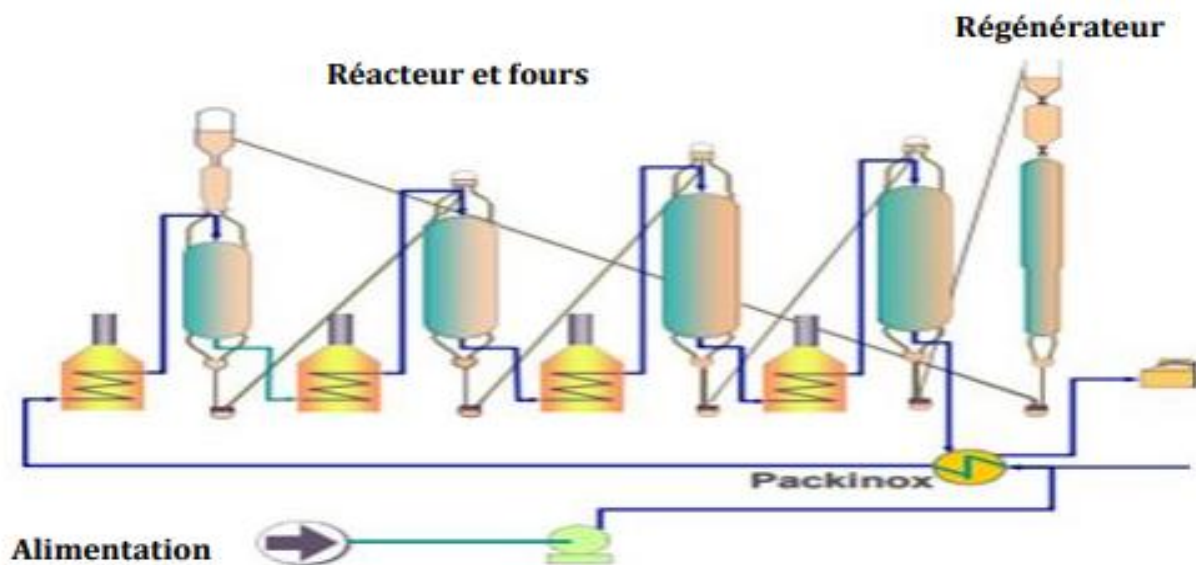


Figure II.2 : Section réaction-régénération [20].

II.3.2 Section d'absorption

La section absorption de la Figure II.3 permet de débarrasser le gaz d'hydrogène produit dans la section réaction des traces de chlorure d'hydrogène (HCl), et des composés lourds à l'aide

d'un absorbeur HP 520 D 006. Ce dernier procure un gaz riche en H₂ qui est utilisé, par la suite, pour alimenter les différentes unités de la raffinerie.

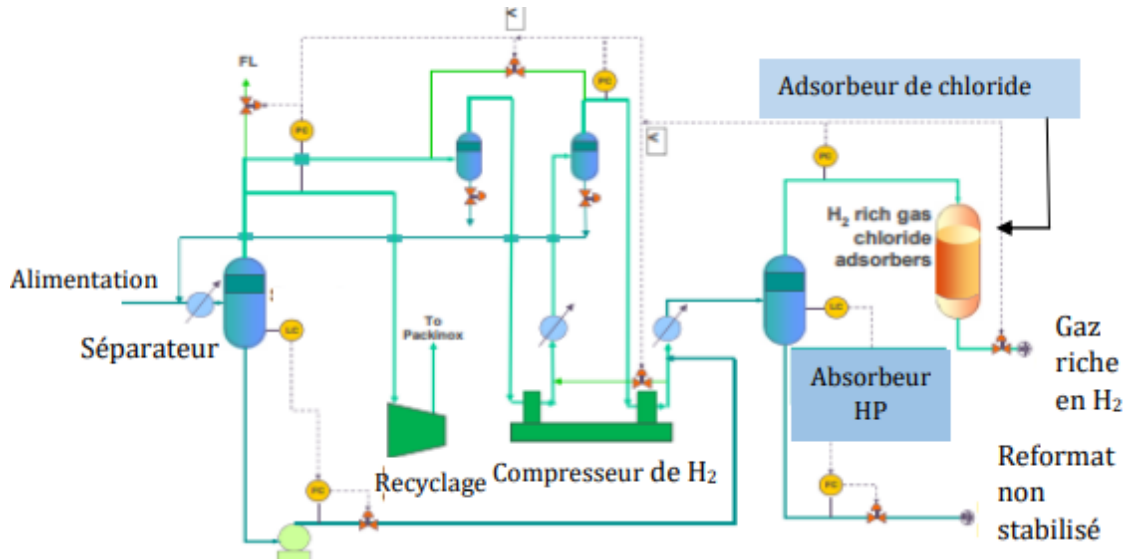


Figure II.3 : Section d'absorption [20].

II.3.3 Section de stabilisation

Cette section illustrée sur la Figure II.4 comporte un stabilisateur 520 C 003 dont l'objectif est de récupérer une quantité de reformat stable et une quantité maximale de GPL.

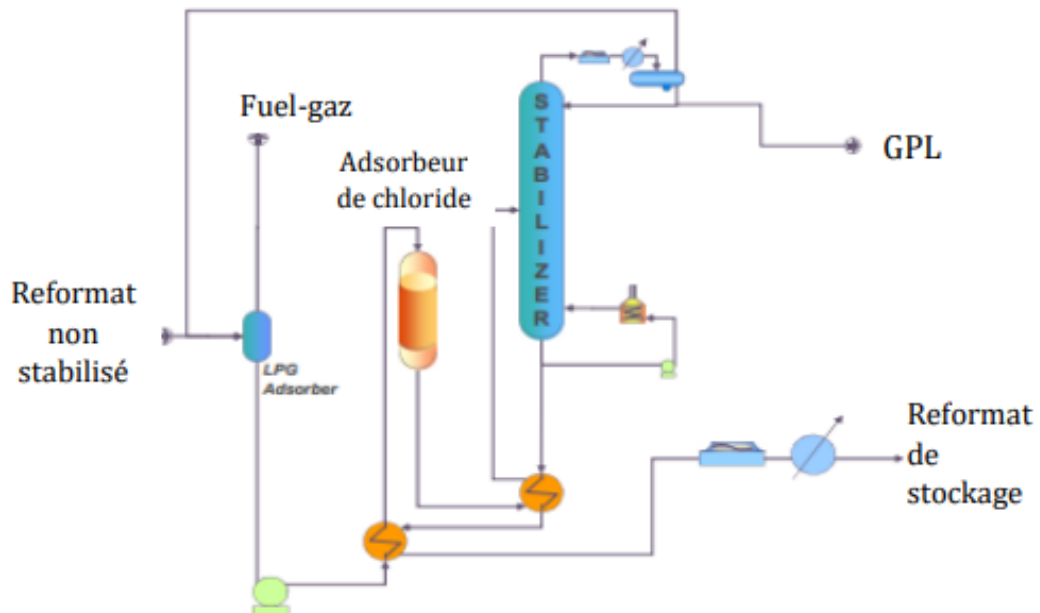


Figure II.4 : Section de stabilisation [20].

**Chapitre III : Modélisation et
optimisation de procédé de reformage
catalytique CCR**

Introduction

Le reformage catalytique en régénération continue est un processus important dans l'industrie de raffinage pour améliorer l'indice d'octane, ou pour qu'il soit utilisé comme source d'hydrogène. Pour obtenir un rendement élevé en composés aromatiques et en H₂ de haute pureté, l'optimisation des conditions opératoires est nécessaire.

Pour cela, il est nécessaire d'étudier l'impact des paramètres opératoires et d'analyses, tel que la composition de la charge et l'état du catalyseur, sur la qualité de reformat et la pureté d'hydrogène.

L'objectif de ce travail est de modéliser et optimiser les conditions de fonctionnement du processus de reformage catalytique à régénération continue.

Il existe plusieurs méthodes pour résoudre ce problème. Dans notre cas, nous avons utilisé logiciel « MATLAB.16 ».

III.1 Caractéristiques du procédé CCR

Les caractéristiques de ce procédé, relevé durant la période de stage (de Février à Avril 2023) sont représentées dans les trois tableaux III.1, III.2 et III.3 ci-dessous : La charge utilisée est le naphta lourd, qui a été traitée par l'unité 510 (NHT).

III.1.1 Principales caractéristiques de la charge (naphta lourd)

Nous présenterons dans le tableau III.1 les principales caractéristiques de la charge (naphta lourd), telles que : la composition chimique en paraffines et en naphènes, plage de distillation (point initial et point final), etc.

Nous constatons que les valeurs de la composition volumique des naphènes %N varient entre 29.2% et 64.89%, et le pourcentage de paraffine compris entre 30.24% et 62.75%. Par contre, nous remarquons que les autres compositions (%A, %oléfine, etc) sont négligeables par rapport au %N et %P.

D'après les valeurs de distillation ASTM, nous observons la présence de fractions lourdes (naphènes et paraffines).

Tableau III.1 : Composition de la charge utilisée

Date des analyses	%N(vol%)	%P(vol%)	%A(vol%)	Autres(vol%)	Plage de distillation	
					PI	PF
02.11.2021	32.93	58.83	8.19	00.05	098	175
16.11.2021	35.71	55.55	8.68	00.06	101	177
23.11.2021	36.91	56.50	6.51	00.07	95	172
09.01.2021	57.42	41.80	0.79	00.00	98	174
10.01.2021	47.44	51.72	0.84	00.00	96	173
15.01.2021	40.54	54.08	5.35	00.03	70	170
18.01.2021	32.23	58.12	2.69	06.98	93	172
09.02.2021	38.44	60.45	0.94	00.18	96	174
07.02.2021	36.73	55.43	5.76	02.08	70	170
16.03.2021	30.06	56.21	6.70	07.03	91	171
14.01.2021	64.89	30.24	4.85	00.01	70	168
08.06.2021	37.68	53.73	8.59	00.00	95	170
01.02.2021	45.04	44.18	0.16	10.61	97	174
02.02.2021	42.48	44.05	6.29	06.83	96	174
16.02.2021	40.09	53.12	6.41	00.38	68	170
04.01.2022	31.53	60.17	8.25	00.05	96	172
11.02.2021	30.83	60.25	7.96	00.99	97	174
21.02.2021	44.09	49.62	5.82	00.47	96	170
11.03.2021	40.38	53.27	6.14	00.21	96	172
01.06.2021	29.20	62.75	8.01	00.04	98	162
08.02.2021	36.30	59.04	4.66	00.00	68	170
12.03.2021	35.53	54.80	5.36	04.30	90	172
13.03.2021	44.83	43.48	5.06	06.63	91	168
05.03.2021	42.29	51.25	6.33	00.13	93	168
06.04.2021	33.29	53.76	4.82	08.15	78	174
28.02.2021	38.17	59.94	8.77	00.14	93	172
03.03.2021	40.11	53.24	6.49	00.16	91	168

III.1.2 Caractéristiques du catalyseur

Nous avons réalisé l'analyse de chlore des échantillons du catalyseur cokéfié (prélevé de la section de réaction du dernier réacteur) et du catalyseur régénéré (prélevé à la sortie du régénérateur).

Ces analyses sont représentées dans le tableau III.2 ci-dessous :

Tableau III.2 : caractéristique du catalyseur utilisé dans le procédé CCR

Date	Quantité du chlore en catalyseur cokéfié (%)	Quantité du chlore en catalyseur régénéré (%)
02.11.2021	0.863	0.917
16.11.2021	0.870	1.004
23.11.2021	0.880	1.005
09.01.2021	0.880	1.015
10.01.2021	0.884	1.037
15.01.2021	0.887	1.042
18.01.2021	0.890	1.043
09.02.2021	0.901	1.046
07.02.2021	0.907	1.075
16.03.2021	0.910	1.075
14.01.2021	0.912	1.080
08.06.2021	0.970	1.080
01.02.2021	0.950	1.081
02.02.2021	0.949	1.081
16.02.2021	0.951	1.099
04.01.2022	0.970	1.108
11.02.2021	0.970	1.117
21.02.2021	0.982	1.140
11 .03.2021	0.993	1.142
01.06.2021	0.994	1.146
08.02.2021	0.997	1.150
12.03.2021	1.008	1.150
13.03.2021	1.013	1.153
05.03.2021	1.015	1.168
06.04.2021	1.020	1.194
28.02.2021	1.030	1.210
03.03.2021	1.032	1.220
23.03.2021	1.033	1.248

À travers le Tableau III.2, nous remarquons que les valeurs de la quantité du Cl présentent dans les échantillons du catalyseur cokéfié varient entre 0.863% et 1.033%, et la quantité du Cl

présente dans les échantillons du catalyseur régénéré sont situés entre l'intervalle de 0.917 et 1.248%.

Ces valeurs appartiennent généralement à l'intervalle dépendant par le processus (0.9 - 1.1%).

III.1.3 Principales caractéristiques de reformat

Nous présentons dans le tableau III.3, les principales caractéristiques de reformat, qui sont : l'indice d'octane, la composition chimique en paraffines naphènes, etc.

Tableau III.3 : Principales caractéristiques de reformat.

Date des analyses	%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)		
02.11.2021	10.32	14.51	75.16	00.00	099.1	-	-	210	0.824
16.11.2021	14.01	24.01	71.68	00.29	100.0	50	215	190	0.825
23.11.2021	32.31	10.83	57.02	00.28	100.1	55	202	190	0.826
09.01.2021	16.87	07.78	73.60	01.75	100.3	49	210	170	0.833
10.01.2021	06.75	20.15	73.11	00.00	100.4	-	-	230	0.832
15.01.2021	07.25	18.73	74.02	00.00	100.4	45	206	170	0.833
18.01.2021	07.50	19.47	73.03	00.00	100.4	-	-	230	0.830
09.02.2021	14.34	24.86	70.19	00.61	100.5	48	204	190	0.832
07.02.2021	21.32	06.49	71.46	00.72	100.5	45	206	170	0.832
16.03.2021	19.19	18.70	59.50	02.61	100.5	-	-	200	0.825
14.01.2021	06.53	21.88	71.59	00.00	100.6	48	205	160	0.834
08.06.2021	15.24	16.15	68.52	00.09	100.8	48	201	206	0.824
01.02.2021	21.23	09.44	66.57	02.76	101.0	50	208	170	0.832
02.02.2021	14.30	22.45	56.02	07.24	101.0	49	208	180	0.832
16.02.2021	19.17	05.53	57.15	00.15	101.0	50	206	200	0.832
04.01.2022	00.81	23.98	74.83	00.37	101.0	47	203	200	0.832
11.02.2021	21.56	05.96	72.17	00.31	101.1	-	-	190	0.831
21.02.2021	15.39	11.13	73.33	00.16	101.3	46	203	200	0.830
11.03.2021	19.98	05.91	74.07	00.05	101.4	54	208	180	0.829
01.06.2021	01.18	26.74	71.85	00.23	101.4	47	205	220	0.826
08.02.2021	10.75	18.81	69.73	00.71	101.6	45	205	210	0.832
12.03.2021	19.85	12.44	65.91	01.80	101.6	49	199	190	0.829
13.03.2021	07.81	25.19	65.02	01.99	101.8	52	201	170	0.830
05.03.2021	15.22	13.62	71.12	00.03	102.0	47	200	180	0.830
06.04.2021	13.00	18.47	59.31	09.24	102.2	48	208	190	0.827
28.02.2021	07.09	20.38	72.50	00.03	102.2	-	-	190	0.830
03.03.2021	09.68	19.31	70.96	00.05	102.3	48	200	180	0.829

D'après le tableau précédent, nous remarquons que les pourcentages de naphènes (%N) et de paraffines (%P) diminuent par rapport à ceux de la charge initiale. En revanche, nous avons

constaté une augmentation du pourcentage d'aromatiques (%A) par rapport à la charge. Nous pouvons également observer une relation proportionnelle entre l'indice d'octane et le pourcentage d'aromatique.

La densité à 15°C reste presque constante. En ce qui concerne les valeurs de TVR, nous constatons qu'elles varient entre 160 et 230 gr/cm².

III.2 Effet des paramètres du processus sur la qualité de reformat

Le reformat obtenu est principalement utilisé dans la fabrication des carburants essences. La principale caractéristique de qualité est l'indice d'octane de reformat.

Nous utilisons les données représentées dans le tableau III.3, pour étudier l'évolution de l'indice d'octane en fonction des différents paramètres du processus.

III.2.1 Evolutions de l'indice d'octane de reformat en fonction de la teneur en chlore dans le catalyseur cokéfié

La figure III.1 ci-dessous représente l'influence de la quantité du chlore dans le catalyseur cokéfié sur l'indice d'octane.

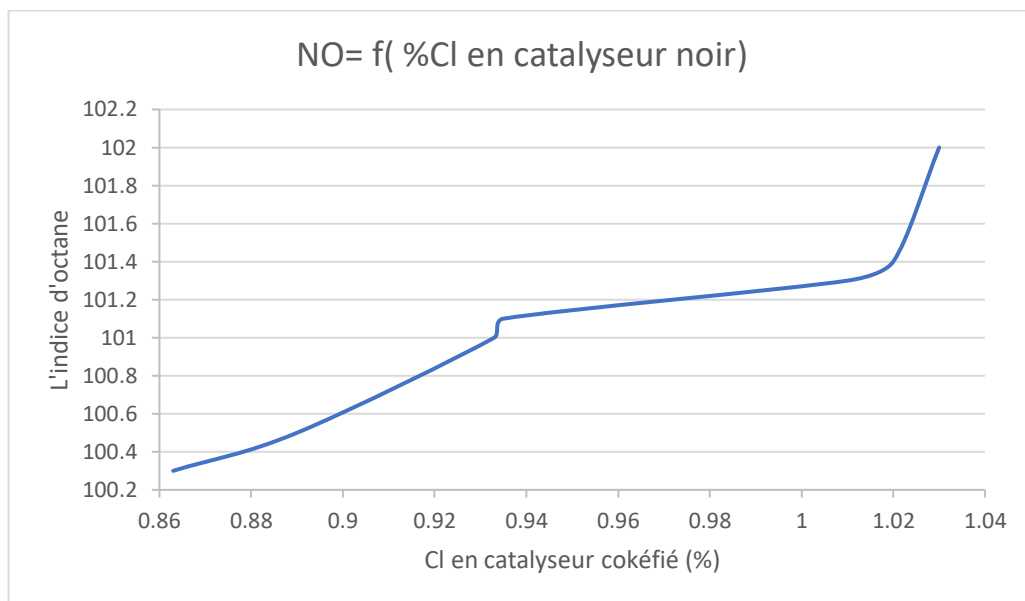


Figure III.1 : Évolution de l'indice d'octane en fonction de la teneur en Cl dans le catalyseur noir.

En observant le graphique, nous remarquons une corrélation positive entre l'indice d'octane et la teneur en chlore dans le catalyseur cokéfié.

Nous constatons que lorsque la teneur en chlore augmente, l'indice d'octane augmente également.

Les valeurs de l'indice d'octane varient entre 100.3 et 102, tandis que les valeurs de la teneur en chlore dans le catalyseur cokéfié varient entre 0.863 et 1.03. La présence de Cl dans le catalyseur introduit une bonne régénération.

III.2.2 Évolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la quantité de chlore dans le catalyseur régénéré

Le graphe III.2 ci-dessous représente l'évolution de l'indice d'octane en fonction de la teneur en Cl dans le catalyseur régénéré.

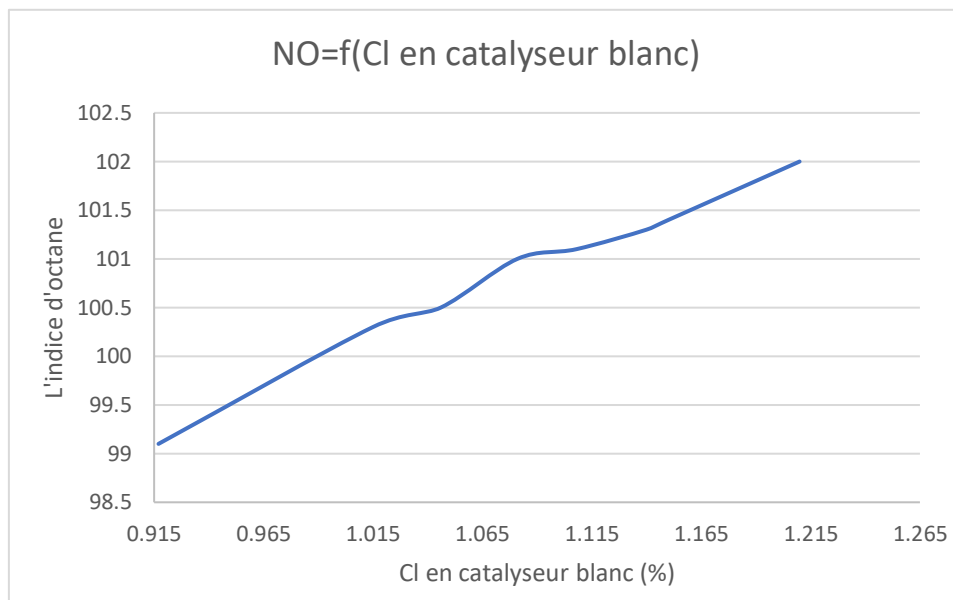


Figure III.2 : Évolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la teneur en chlore dans le catalyseur régénéré.

Nous remarquons une corrélation positive entre l'indice d'octane et la teneur en chlore dans le catalyseur régénéré.

Nous constatons que lorsque la teneur en chlore augmente, l'indice d'octane a tendance à augmenter également. Les valeurs de l'indice d'octane varient entre 99.1 et 102, tandis que les valeurs de la teneur en chlore dans le catalyseur régénéré varient entre 0.917 et 1.21%.

La présence de Cl en catalyseur introduit une bonne régénération.

III.2.3 Effet de la composition de charge sur l'indice d'octane

Les deux principales compositions de charge sont les paraffines %P et les naphènes %N, car elles ont un impact sur l'indice d'octane.

Ces composés peuvent être convertis en composés aromatiques, qui ont un indice d'octane élevé.

III.2.3.1 Effet de composés de %P présents dans la charge sur l'indice d'octane

La figure ci-dessous représente l'influence de la composition de paraffines présentes dans la charge sur l'indice d'octane.

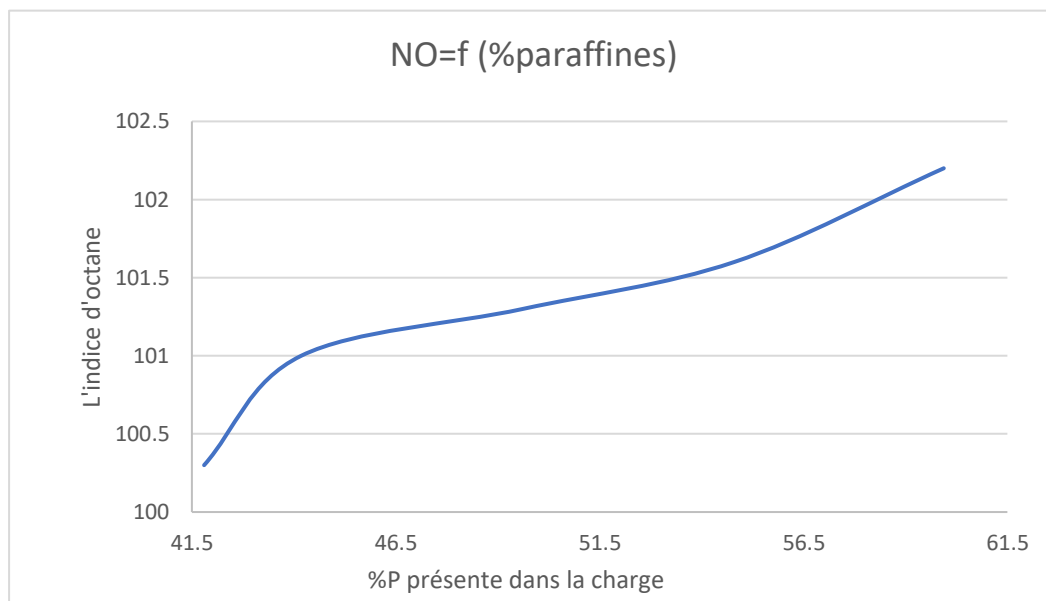


Figure III.3 : Évolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la composition de paraffine présente dans la charge.

En observant les valeurs fournies, nous pouvons constater une corrélation positive entre l'indice d'octane et la composition de paraffine (%P).

Les valeurs de l'indice d'octane varient entre 100.3 et 102.2, tandis que les valeurs de la composition de paraffine varient entre 41.8 et 59.94 (%P).

Suite à cela, nous pouvons conclure qu'une augmentation de la composition de paraffine est associée à une augmentation de l'indice d'octane.

III.2.3.2 L'effet de la composition de charge en naphènes sur l'indice d'octane

Le graphe ci-dessous représente l'indice d'octane en fonction de la composition de naphènes présente dans la charge. La diminution des naphènes introduit une augmentation des paraffines (augmentation d'indice d'octane).

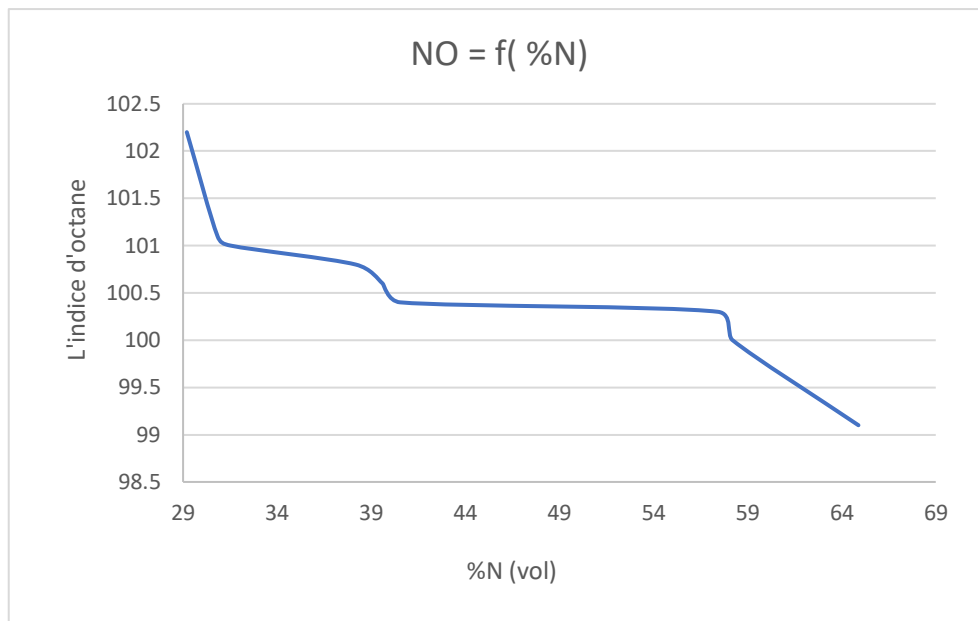


Figure III.4 : Évolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la composition de naphènes présente dans la charge.

Nous pouvons remarquer, selon le graphique, que lorsque le pourcentage de naphènes (%N) diminue, l'indice d'octane (NO) augmente. Cette relation inverse suggère que moins de naphènes dans le carburant conduit à une amélioration de l'indice d'octane. Les valeurs de l'indice d'octane (NO) varient entre 99,1 et 102,2, tandis que les valeurs du pourcentage de naphènes (%N) se situent entre 29,2 et 64,89.

III.3 La modélisation

La modélisation est une opération mathématique qui exprime la variation d'une réponse en fonction de plusieurs variables (x_1 , x_2 , etc.).

Dans notre cas, l'indice d'octane (NO) et la pureté d'hydrogène ($H_2\%$) représentent les réponses y_1 et y_2 .

Il est recommandé de définir les variables utilisées pour établir l'équation de modèle mathématique, qui relie ces paramètres avec la réponse étudiée.

Les différents modèles utilisés sont représentés par les équations suivantes :

Modèle du premier degré :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 \quad (1)$$

Modèle du second degré :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{14} x_1 x_4 + a_{23} x_2 x_3 + a_{24} x_2 x_4 + a_{34} x_3 x_4 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{44} x_4^2 \quad (2)$$

Tels que : a_0 est le coefficient de l'intercept x_0 qui représente la valeur de y_1 , lorsque les paramètres sont nuls.

a_1, a_2, a_3 et a_4 sont des coefficients des paramètres présentés respectivement : x_1, x_2, x_3 et x_4 .

Les coefficients des termes d'interactions ($a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{23}, a_{24}, a_{34}$) sont des coefficients représentés respectivement ($x_1 x_2, x_1 x_3, x_1 x_4, x_2 x_3, x_2 x_4, x_3 x_4$).

Les coefficients des termes quadratiques a_{11}, a_{22}, a_{33} et a_{44} sont des coefficients représentés respectivement ($x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_4^2$).

La validation des modèles établis est réalisée par le calcul de coefficient de corrélation R^2 et de l'erreur relative moyenne définis par les équations suivantes :

$$\text{Erreur relative moyenne} = \frac{\sum \text{erreurs}\%}{N} \quad (3)$$

Avec : N : nombre d'essai

$$\sum \text{Erreurs} (\%) = \sum \frac{|y - \hat{y}|}{y} \cdot 100\% \quad (4)$$

Avec : y : réponse mesurée. et : \hat{y} : réponse estimée.

$$\text{Formule de coefficient de corrélation : } R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum (y - \bar{y})^2} \sqrt{\sum (\hat{y} - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (5)$$

III.3.1 Modélisation de l'indice d'octane

Les valeurs des paramètres qui influent sur l'indice d'octane sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Données utilisées pour la modélisation de l'indice d'octane.

Nombre d'essai	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1
1	0.910	1.099	56.50	36.91	100.1
2	0.863	1.015	41.80	57.42	100.3
3	0.884	1.046	51.72	47.44	100.4
4	0.993	1.042	54.08	40.54	100.4
5	1.008	1.168	58.12	32.23	100.4
6	0.890	1.037	60.45	38.44	100.5
7	0.970	1.150	55.43	36.73	100.5
8	0.884	1.046	51.72	47.44	100.4
9	0.970	1.080	53.73	37.68	100.8
10	0.951	1.081	44.18	45.04	101.0
11	0.933	1.043	44.05	42.48	101.0
12	0.880	1.075	53.12	40.09	101.0
13	0.901	1.108	60.17	31.53	101.0
14	0.935	1.153	60.25	30.83	101.1
15	1.030	1.210	53.27	40.38	101.4
16	1.015	1.150	54.80	35.53	101.6
17	1.033	1.220	43.48	44.83	101.8
18	0.907	1.004	51.25	42.29	102.0
19	0.880	0.917	53.76	33.29	102.2
20	1.013	1.080	51.04	40.03	103.0

Les variables x_1 , x_2 , x_3 et x_4 représentent respectivement : la teneur en chlore dans le catalyseur cokéfié, la teneur en chlore dans le catalyseur régénéré, %P paraffine (présente dans la charge et %N naphtène (%vol)).

Nous proposons deux types de modèles différents, du premier degré et du second degré, pour trouver une meilleure corrélation entre les paramètres et l'indice d'octane (y_1).

Nous avons utilisé le logiciel MATLAB.16 pour la modélisation.

a) Le modèle du premier degré

La modélisation par ce type de modèle a abouti à l'équation suivante :

$$y_1 = 107.6352 + 6.3012x_1 - 4.8418x_2 - 0.0775x_3 - 0.0792x_4 \quad (6)$$

Le coefficient de l'intercept x_0 représente la valeur attendue de la variable dépendante lorsque toutes les variables indépendantes sont nulles.

Dans ce cas, si toutes les autres variables sont nulles, on s'attend à ce que y_1 ait une valeur de 107.6352.

Le coefficient de x_1 est positif, ce qui signifie qu'une augmentation d'une unité de x_1 est associée à une augmentation de 6.3012 dans la valeur attendue de y_1 .

Le coefficient de x_2 est négatif, ce qui signifie qu'une augmentation d'une unité de x_2 est associée à une diminution de 4.8418 dans la valeur attendue de y_1 .

Le coefficient de x_3 est négatif, ce qui signifie qu'une augmentation d'une unité de x_3 est associée à une diminution de 0.0775 dans la valeur attendue de y_1 .

Le coefficient de x_4 est négatif, ce qui signifie qu'une augmentation d'une unité de x_4 est associée à une diminution de 0.0792 dans la valeur attendue de y_1 .

Les résultats obtenus du modèle sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs estimées du modèle du premier degré de NO.

Essai	y_1	\hat{y}_i	Err %
1	100.1	100.7132	0.6126
2	100.3	100.3991	0.0988
3	100.4	100.3688	0.0311
4	100.4	101.4226	1.0185
5	100.4	101.2309	0.8276
6	100.5	100.4559	0.0439
7	100.5	100.9430	0.4408
8	100.4	100.3688	0.0311
9	100.6	100.6728	0.0724
10	100.8	101.3430	0.5387
11	101.0	101.4047	0.4007
12	101.0	101.6839	0.6771
13	101.0	100.6617	0.3349
14	101.0	100.7390	0.2584
15	101.1	100.7833	0.3133
16	101.4	100.9189	0.4745
17	101.6	101.3694	0.2269
18	101.8	101.3201	0.4714
19	102.0	101.1533	0.8301
20	102.2	101.9028	0.2908

Le modèle du second degré

La modélisation par ce type de modèle a abouti à l'équation suivante :

$$y_1 = -272.0234 + 353.6741x_1 - 427.8344x_2 + 8.6197x_3 + 10.2041x_4 + 69.3568x_1x_2 - 3.8789x_1x_3 - 8.6490x_1x_4 + 1.8062x_2x_3 + 4.9255x_2x_4 - 0.0767x_3x_4 + 102.3795x_1^2 + 8.4357x_2^2 - 0.036x_3^2 - 0.0417x_4^2 \quad (7)$$

Le coefficient de x_1 indique l'effet prévu sur y_1 lorsque la variable x_1 augmente d'une unité, en tenant compte des autres variables dans le modèle.

Le coefficient de x_2 indique l'effet prévu sur y_1 lorsque la variable x_2 augmente d'une unité.

Les coefficients de x_3 et x_4 indiquent les effets prévus sur y_1 lorsque les variables x_3 et x_4 augmentent d'une unité respectivement.

Les coefficients des termes d'interactions ($x_1x_2, x_1x_3, x_1x_4, x_2x_3, x_2x_4, x_3x_4$) indiquent la façon dont les interactions entre les variables influencent y_1 . Les coefficients positifs indiquent une augmentation de y_1 due à ces interactions,

Les coefficients des termes quadratiques ($x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_4^2$) représentent les effets prévus sur y_1 en raison des termes quadratiques de chaque variable. Le coefficient positif indique une relation courbée vers le haut, tandis que le coefficient négatif indique une relation courbée vers le bas.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.6 : Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs estimées du modèle du second degré de NO

y_1	\hat{y}_i	Err %
100.1	100.7132	0.6126
100.3	100.4088	0.1085
100.4	100.3699	0.0300
100.4	100.5123	0.1119
100.4	100.6059	0.2051
100.5	100.4284	0.0713
100.5	100.3293	0.1699
100.4	100.3699	0.0300
100.6	100.5415	0.0582
100.8	100.8943	0.0936
101	101.2013	0.1993
101	100.8760	0.1228
101	100.6526	0.3440
101	101.2553	0.2528
101.1	100.7393	0.3568
101.4	101.4754	0.0744
101.6	101.2535	0.3410
101.8	101.9196	0.1175
102	101.7535	0.2417
102.2	102.2623	0.0609

III.3.2 La modélisation de la pureté d'hydrogène (H₂%)

Nous proposons deux types de modèles différents, linéaires et polynomiaux, pour trouver une meilleure combinaison entre les paramètres et la pureté du H₂ % (y_2).

Nous avons utilisé le logiciel MATLAB.16 pour calculer les valeurs des \hat{y}_i estimés avec les erreurs relatives et le coefficient de corrélation.

Les paramètres qui influent sur la pureté d'hydrogène sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.7 : Données utilisées pour la modélisation de la pureté du H₂%.

Nombre d'essai	x_1	x_2	x_3	x_4	y_2
1	0.910	1.099	56.5	36.91	88.64
2	0.863	1.015	41.8	57.42	88.31
3	0.884	1.046	51.72	47.44	86.12
4	0.993	1.042	54.08	40.54	89.00
5	1.008	1.168	58.12	32.23	94.62
6	0.890	1.037	60.45	38.44	88.00
7	0.970	1.150	55.43	36.73	89.24
8	0.884	1.046	51.72	47.44	86.12
9	1.032	1.248	30.24	64.89	86.00
10	0.970	1.080	53.73	37.68	87.87
11	0.951	1.081	44.18	45.04	87.94
12	0.933	1.043	44.05	42.48	87.30
13	0.901	1.108	60.17	31.53	87.71
14	0.935	1.153	60.25	30.83	88.05
15	1.030	1.210	53.27	40.38	88.93
16	1.015	1.150	54.8	35.53	85.00
17	1.033	1.220	43.48	44.83	89.24
18	0.907	1.004	51.25	42.29	89.08
29	0.880	0.917	53.76	33.29	89.60
20	1.013	1.080	51.04	40.03	86.29

Les variables x_1 , x_2 , x_3 et x_4 représentent respectivement : la quantité du chlore dans le catalyseur cokéfié, la quantité du chlore dans le catalyseur régénéré, %P paraffine(%P) présente dans la charge et %N naphène (%vol).

Nous proposons deux types de modèles différents, du premier degré et du second degré, pour trouver une meilleure corrélation entre les paramètres et la pureté d'hydrogène (H₂%) (y_2).

Nous avons utilisé le logiciel MATLAB.16 pour la modélisation.

a) Le modèle du premier degré

La modélisation par ce type de modèle a abouti à l'équation suivante :

$$y_2 = 56.8812 + 43.0001x_1 - 18.1458x_2 + 0.0505x_3 + 0.1447x_4 \quad (8)$$

Tableau III.8 : comparaison entre les valeurs réelles et estimées du modèle du premier degré de H₂%

y_2	\hat{y}_i	Err %
88.64	86.1090	2.8554
88.31	84.5207	4.2909
86.12	85.7927	0.3800
89.00	90.5454	1.7364
94.62	89.0690	5.8666
88.00	87.0229	1.1103
89.24	87.5996	1.8381
86.12	85.7927	0.3800
86.00	86.2641	0.3071
87.87	88.6718	0.9125
87.94	86.8263	1.2664
87.30	86.5938	0.8089
70.00	84.9260	21.3228
87.71	85.8181	2.1570
88.05	86.4398	1.8288
88.93	88.9626	0.0367
85.00	89.3829	5.1563
89.24	87.7182	1.7053
89.08	87.2158	2.0960
89.60	87.5422	2.2966

Le coefficient constant représente la valeur de départ de y_2 lorsque toutes les variables indépendantes sont nulles.

Le coefficient de x_1 a un signe positif, ce qui indique qu'une augmentation d'une unité de x_1 entraîne une augmentation de 43.0001 dans la valeur prédite de y_2 .

Le coefficient de x_2 a un signe négatif, ce qui indique qu'une augmentation d'une unité de x_2 entraîne une diminution de 18.1458 dans la valeur prédite de y_2 .

Le coefficient de x_3 a un signe positif, ce qui indique qu'une augmentation d'une unité de x_3 entraîne une augmentation de 0.0505 dans la valeur prédite de y_2 .

Le coefficient de x_4 a un signe positif, ce qui indique qu'une augmentation d'une unité de x_4 entraîne une augmentation de 0.1447 dans la valeur prédite de y_2 .

En résumé, dans ce modèle, x_1 a un effet positif sur y_2 , et x_2 a un effet négatif sur y_2 . Tandis que x_3 et x_4 ont tous les deux un effet positif sur y_2 .

Il est important de noter que la quantité exacte de l'effet dépend des valeurs spécifiques des variables et des autres coefficients du modèle.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

b) Le modèle du second degré

La modélisation par ce type de modèle a abouti à l'équation suivante :

$$y_2 = -0.4361 + 1.3645x_1 - 0.5572x_2 + 0.0027x_3 + 0.0012x_4 + 0.0594x_1x_2 - 0.005x_1x_3 - 0.0057x_1x_4 + 0.0014x_2x_3 + 0.0028x_2x_4 - 0.4772x_1^2 + 0.1328x_2^2 \quad (9)$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.9 : comparaison entre les valeurs réelles et estimées du modèle du second degré de H₂%

y_2	\hat{y}_i	Err %
88.310	88.3100	0.3009
86.120	86.1200	0.0429
89.000	89.0000	0.0719
88.000	88.0000	0.0565
89.240	89.2400	0.0494
86.120	86.1200	0.0429
86.000	86.0000	0.2512
87.870	87.8700	0.0501
87.940	87.9400	0.1325
87.300	87.3000	0.0342
88.930	88.9300	0.0208
85.000	85.0000	0.0702
89.240	89.2400	0.0366
89.083	89.0830	0.0319
89.600	89.6000	0.0016
86.291	86.2910	0.0066

Le coefficient constant représente la valeur de départ de y_2 lorsque toutes les autres variables sont nulles. Dans ce cas, il est négatif.

Le coefficient de x_1 est positif, ce qui signifie qu'une augmentation d'une unité de x_1 est associée à une augmentation de y_2 .

Le coefficient de x_2 est négatif, ce qui signifie qu'une augmentation d'une unité de x_2 est associée à une diminution de y_2 .

Les coefficients de x_3 et x_4 sont positifs, ce qui signifie qu'une augmentation d'une unité de x_3 ou x_4 est associée à une augmentation de y_2 . Les quantités exactes de ces augmentations dépendront des valeurs de x_3 , x_4 et des autres variables.

Les coefficients des termes d'interactions ($x_1x_2, x_1x_3, x_1x_4, x_2x_3, x_2x_4, x_3x_4$) indiquent comment les interactions entre les variables influencent y_2 . Les coefficients positifs indiquent une augmentation de y_2 due à ces interactions, tandis que les coefficients négatifs indiquent une diminution de y_2 .

Les coefficients des termes quadratiques (x_1^2, x_2^2) indiquent comment les carrés des variables influencent y_2 . Le coefficient négatif de x_1^2 indique que la relation entre x_1 et y_2 est courbée vers le bas, tandis que le coefficient positif de x_2^2 indique une relation courbée vers le haut.

III.3.3 La différence entre les valeurs des coefficients de corrélation et les erreurs relatives moyennes des différents modèles

Nous comparons l'erreur moyenne des deux modèles différents, ainsi que le coefficient de corrélation entre les valeurs des y_i et \hat{y}_i . Nous concluons que le modèle de second degré est le meilleur pour exprimer l'indice d'octane en fonction des paramètres utilisés, ainsi que la pureté de H₂% en fonction des paramètres.

Le tableau suivant représenté cette comparaison.

Tableau III.10 : Valeurs des coefficients de corrélation et les erreurs relatives moyennes des différents modèles.

	L'indice d'octane		La pureté d'H ₂ %	
	Régression du premier degré	Régression du second degré	Régression du premier degré	Régression du second degré
Erreur moyenne (%)	0.39695	0.146775	2.79503	0.0766
Coefficient de corrélation R ²	0.6274	0,9502	0.3783	1

III.4 La représentation graphique des modèles obtenus

III.4.1 Les modèles de l'indice d'octane

La figure ci-dessous représente la comparaison entre les valeurs de l'indice d'octane réelles et théoriques, formulées par le modèle linéaire. Nous remarquons que ce modèle n'est pas représentatif, car il existe une grande différence entre les valeurs réelles et expérimentales.

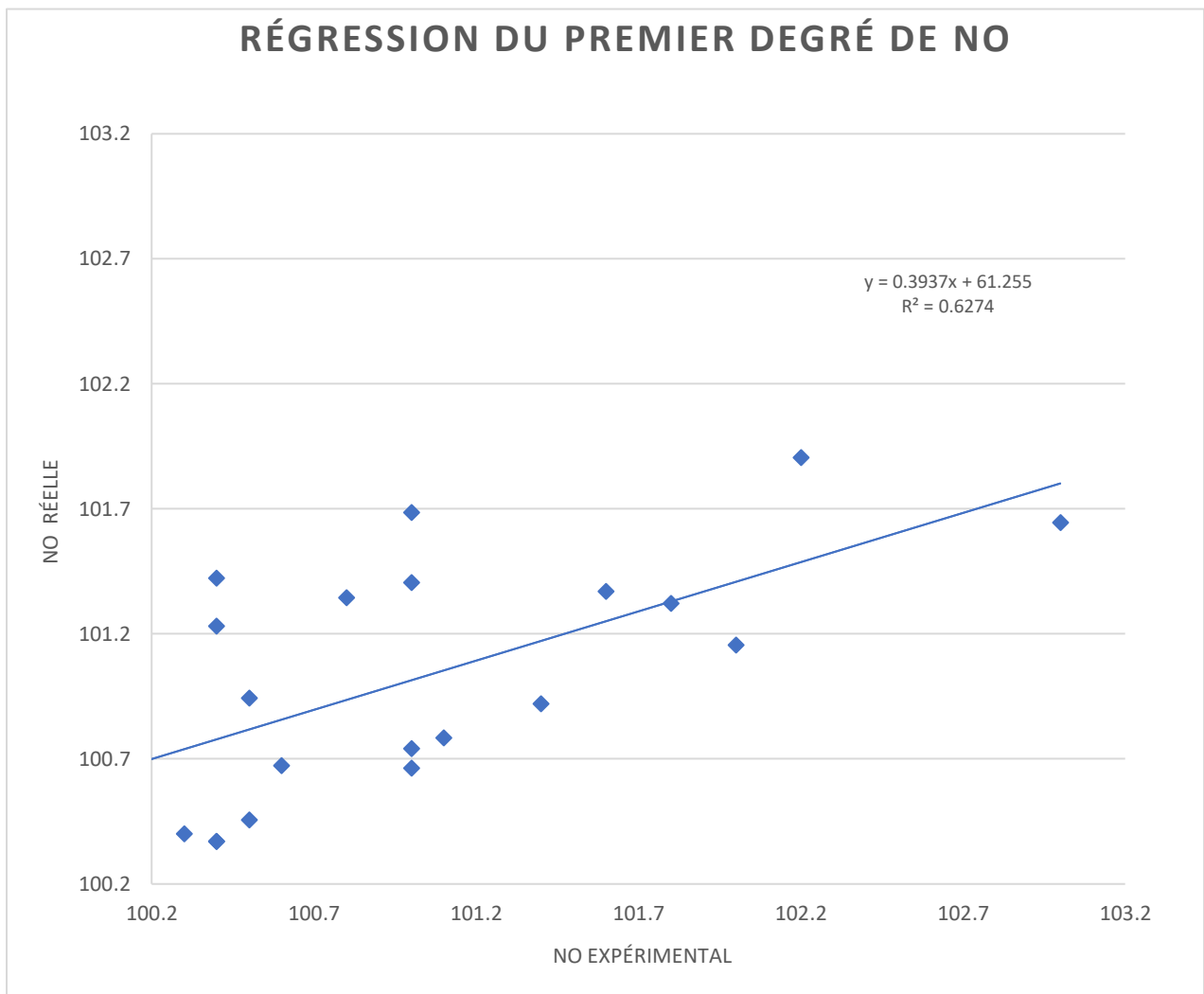


Figure III.5 : Comparaison entre les valeurs de l'indice d'octane réelles et expérimentales formulées par le modèle du premier degré.

La figure ci-dessous représente la comparaison entre les valeurs de l'indice d'octane réelles et théoriques formulées par le modèle du second degré. Nous observons que les valeurs estimées sont très proches des valeurs réelles, car il n'existe pas une grande différence entre les valeurs réelles et expérimentales.

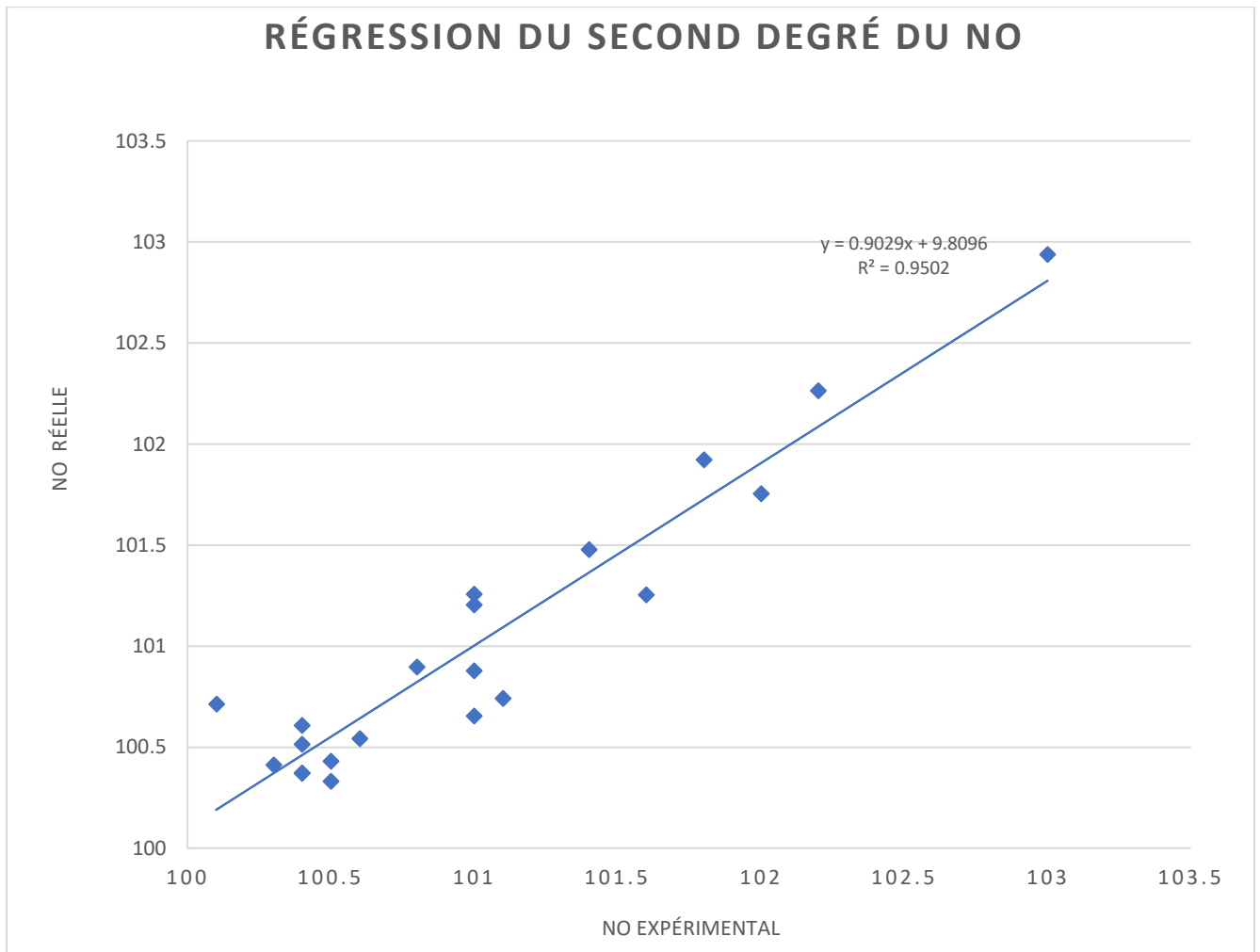


Figure III.6 : Comparaison entre les valeurs de l'indice d'octane réelles et expérimentales formulées par le modèle du premier degré.

III.4.2 Les modèles de la pureté d'H₂%

La figure III.7 ci-dessous représente la comparaison entre les valeurs de la pureté d'H₂% réelles et théoriques formulées par le modèle linéaire. Nous remarquons que ce modèle n'est pas représentatif, car il existe une grande différence entre les valeurs réelles et expérimentales.

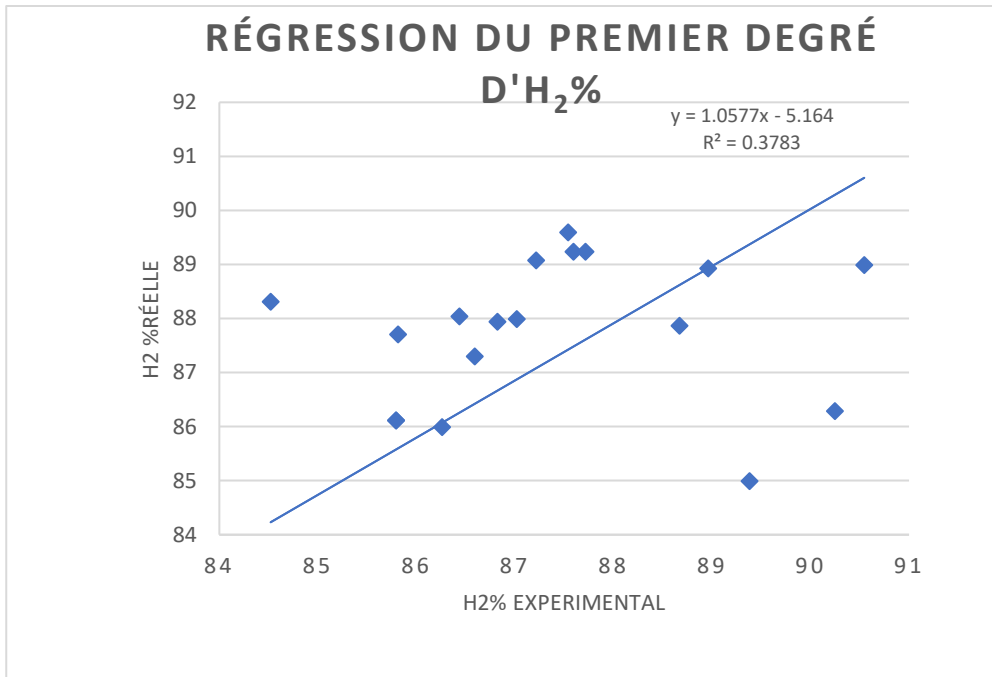


Figure III.7 : Comparaison entre les valeurs de l'H₂% réelles et expérimentales formulées par le modèle linéaire.

La figure III.8 ci-dessous représente la comparaison entre les valeurs de la pureté d'H₂% réelles et théoriques formulées par le modèle quadratique. Nous observons que les valeurs estimées sont très proches des valeurs réelles. Nous concluons donc que ce modèle est le plus représentatif par rapport à la pureté d'H₂%.

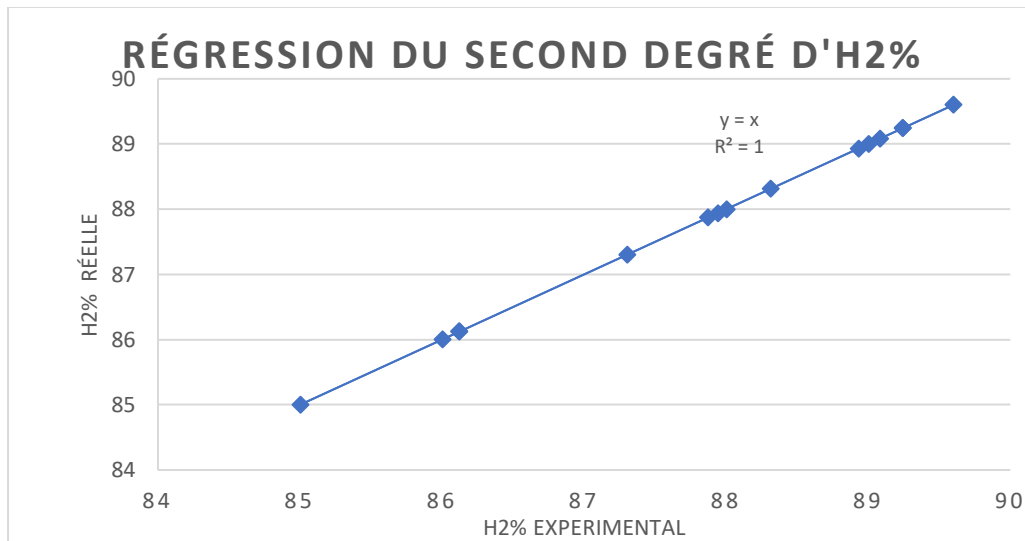


Figure III.8 : Comparaison entre les valeurs de l'H₂% réelles et expérimentales du modèle du second degré

III.5 L'optimisation

L'objectif de l'optimisation est de trouver les meilleurs paramètres pour maximiser l'indice d'octane de reformat ainsi que la pureté de H₂%.

Nous utilisons les modèles établis précédemment avec les conditions suivantes :

Nous commençons d'abord par la variation de l'indice d'octane en fonction des paramètres choisis

La fonction objective :

$$y_1 = -272.0234 + 353.6741x_1 - 427.8344x_2 + 8.6197x_3 + 10.2041x_4 + 69.3568x_1x_2 - 3.8789x_1x_3 - 8.6490x_1x_4 + 1.8062x_2x_3 + 4.9255x_2x_4 - 0.0767x_3x_4 + 102.3795x_1^2 + 8.4357x_2^2 - 0.036x_3^2 - 0.0417x_4^2 \quad (7)$$

Les valeurs de x_1 sont comprises entre 0.86 et 1.033, x_2 entre 1.044 et 1.153, x_3 entre 32% et 50%, et x_4 entre 30% et 60%.

Suite à l'optimisation réalisée sur le logiciel MATLAB.16, nous obtenons une valeur de **104.9** de l'indice d'octane, une quantité de chlore dans le catalyseur cokéfié d'une valeur de **1.033%**. Pour le catalyseur régénéré, nous avons obtenu une valeur **0.9170%** de chlore, ainsi qu'un pourcentage volumique de naphène et paraffine de **30.83** et **30.24%**, respectivement.

Ensuite, nous avons optimisé la variation de la pureté de H₂% en fonction des paramètres choisis

La fonction objective :

$$y_2 = -0.4361 + 1.3645x_1 - 0.5572x_2 + 0.0027x_3 + 0.0012x_4 + 0.0594x_1x_2 - 0.005x_1x_3 - 0.0057x_1x_4 + 0.0014x_2x_3 + 0.0028x_2x_4 - 0.4772x_1^2 + 0.1328x_2^2 \quad (9)$$

Les valeurs de x_1 sont comprises entre 0.86 et 1.033, x_2 entre 1.044 et 1.153, x_3 sont généralement comprises entre 32% et 50% et x_4 entre 30% et 60%.

D'après l'optimisation réalisée sur le logiciel MATLAB.16, nous obtenons une valeur de **84.16%** de pureté de H₂%, avec une quantité de chlore dans le catalyseur cokéfié de **0.863%**. Nous avons aussi obtenu une valeur de **1.004%** de chlore dans le catalyseur régénéré, et un pourcentage volumique de naphène et paraffine respectif de **30** et **40%**.

III.6 Effet de la composition de reformat sur l'indice d'octane

Pour étudier l'effet de la composition de reformat sur l'indice d'octane, nous avons construit un modèle de second degré qui relie entre eux.

Les valeurs des paramètres qui influencent l'indice d'octane sont représentées dans le tableau suivant : sachant que x'_1 , x'_2 et x'_3 sont N%, %P et %A.

Le tableau suivant représente la matrice des données utilisées :

Tableau III.11 : Données utilisées pour la modélisation de l'indice d'octane dans le reformat

Nombre d'essai	y_3	x'_1	x'_2	x'_3
1	99.1	10.32	14.51	75.16
2	100.0	14.01	24.01	71.68
3	100.3	16.87	07.78	73.60
4	100.4	06.75	20.15	73.11
5	100.4	07.25	18.73	74.02
6	100.4	07.50	19.47	73.03
7	100.5	14.34	24.86	70.19
8	100.5	21.32	6.49	71.46
9	100.6	06.53	21.88	71.59
10	101.0	00.81	23.98	74.83
11	101.1	21.56	5.96	72.17
12	101.3	15.39	11.13	73.33
13	101.3	06.34	21.07	73.4
14	101.4	19.98	5.91	74.07
15	101.4	02.66	32.17	65.09
16	101.4	01.18	26.74	71.85
17	101.6	10.75	18.81	69.73
18	102.0	15.22	13.62	71.12
19	102.2	7.09	20.38	72.50
20	102.3	9.68	19.31	70.96

La modélisation par ce type de modèle a abouti à l'équation suivante :

$$y_3 = -268.5834 + 1.5637x'_1 + 5.9009x'_2 + 8.8152x'_3 - 0.0298x'_1x'_2 - 0.0164x'_1x'_3 - 0.058x'_2x'_3 + 0.0102x'^2_1 - 0.0385x'^2_2 - 0.0546x'^2_3 \quad (10)$$

Le coefficient constant de la valeur de départ de y_3 lorsque toutes les variables indépendantes sont nulles, est négatif.

Le coefficient de x'_1 a un signe positif, ce qui indique qu'une augmentation d'une unité de x'_1 entraîne une augmentation de la valeur prédite de y_3 .

Le coefficient de x'_2 a un signe positif, ce qui indique qu'une augmentation d'une unité de x'_2 entraîne une augmentation de la valeur prédite de y_3 .

Le coefficient de x'_3 a un signe négatif, ce qui indique qu'une augmentation d'une unité de x'_3 entraîne une diminution dans la valeur prédite de y_3 .

Le coefficient de l'interaction $x'_1x'_2$ a un signe négatif, ce qui suggère que l'interaction entre x'_1 et x'_2 a un effet inverse sur y_3 . Cela signifie que lorsque les deux variables augmentent ensemble, la valeur prédite de y_3 diminue.

Le coefficient de l'interaction $x'_1x'_3$ a un signe négatif, ce qui suggère que l'interaction entre x'_1 et x'_3 a un effet inverse sur y_3 . Cela signifie que lorsque les deux variables augmentent ensemble, la valeur prédite de y_3 diminue.

Les coefficients des termes quadratiques (x'^2_1, x'^2_2, x'^2_3) ont tous un signe négatif, ce qui indique une relation inverse entre les termes quadratiques et y_3 . Cela signifie que lorsque les variables sont élevées au carré, la valeur prédite de y_3 diminue.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.12 : comparaison entre les valeurs réelles et estimées du modèle du second degré de H₂%

Essais	y_3	\hat{y}_i	%Err
1	99.10	100.0250	0.9334
2	100.0	99.9372	0.0628
3	100.3	99.9695	0.3295
4	100.4	101.0072	0.6048
4	100.4	100.5944	0.1936
5	100.4	101.0405	0.6379
6	100.5	100.5803	0.0799
7	100.5	101.0690	0.5661
8	100.6	101.5210	0.9155
9	101.0	100.3768	0.6170
10	101.1	101.3363	0.2337
11	101.3	100.9881	0.3079
12	101.3	100.6587	0.6331
13	101.4	100.9406	0.4531
14	101.4	101.3730	0.0267
15	101.4	101.7181	0.3137
16	101.6	101.6329	0.0324
17	102.0	101.5755	0.4162
18	102.2	101.2448	0.9347
19	102.3	101.6113	0.6733

Avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.7180$

III.7 L'efficacité de reformat

Nous pouvons vérifier l'efficacité de procédé de reformage par le calcul de rapport défini par l'équation suivante :

$$\mu = \frac{C}{D} \quad (11)$$

Où : C représente le rapport de pourcentage en aromatiques sur le pourcentage en paraffines dans le reformat ($C = \frac{\sum \%A}{\sum \%P}$), et D représente le rapport de pourcentage en aromatiques sur le pourcentage en paraffines dans la charge ($D = \frac{\sum \%A}{\sum \%P}$).

D'après les valeurs mentionnées dans le tableau III.3, la valeur de C est égale 4.21 ;

D'après les valeurs mentionnées dans le tableau III.1, la valeur de D est égale à 0.1 ;

Donc : $\mu = 42\%$.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de notre stage de fin d'étude nous avons étudié le procédé de reformage catalytique a régénération en continue. Dans ce travail, nous avons modéliser et optimiser l'indice d'octane et la pureté d'hydrogène avec différents paramètres tels que la composition en paraffines et en naphènes présentes dans la charge, et la teneur en chlore dans le catalyseur cokéfié et regénéré du procédé de reformage.

Cette étude a permis de trouver les modèles exprimant l'indice d'octane et la pureté d'hydrogène en fonction des différents paramètres. Le test de plusieurs modèles a montré que le modèle de second degré est le meilleur pour exprimer l'indice d'octane NO et la pureté d'hydrogène H₂ en fonction des paramètres utilisés.

Pour un nombre expérimental de 20èmes points, les modèles établis sont caractérisés par un coefficient de corrélation de **0,95** pour l'indice d'octane NO et de **1** pour la pureté d'hydrogène H₂. L'erreur relative moyenne est de **0,15** pour l'indice d'octane NO et de **0,07** pour la pureté d'hydrogène. L'optimisation des paramètres a abouti aux résultats suivants on a obtenu une valeur de **104.9** de l'indice d'octane avec une quantité de chlore dans le catalyseur cokéfié de **1.033%**, et de **0.917%** de chlore dans le catalyseur régénéré, de pourcentage volumique de naphène **30.83** et de paraffine **30.24%** et nous obéissons une valeur de **84.16%** de pureté d'H₂% avec une quantité de chlore dans le catalyseur cokéfié de **0.863%**, et de **1.004%** de chlore dans le catalyseur régénéré, de pourcentage volumique de naphène et paraffine sont présentés respectivement : **30%, 40%**.

Cette étude se termine par l'étude de l'influence de la composition de reformat sur l'indice d'octane qui aboutit un coefficient de corrélation de **R²=0,71**. Et l'efficacité de reformat sur la charge.

Références

-
-
- [1] Richard S.Krauss , le Raffinage du pétrole partie industrielles chimiques et parachmiques , chapitre 78 collection encyclopédie du BIT.
- [2] Ministère du travail, de l'emploi et de l'insertion, Industrie pétrochimique, prétraitement du pétrole, dessalage, publié le 21 mars 2011.
- [3] René DAUDIN, Encyclopædia Universalis [en ligne], « PÉTROLE - Le raffinage », les procédés de séparation, la distillation atmosphérique.
- [4] Plan de construction de la raffinerie d'Alger RA1G, Fooster Wheeler, 1964.
- [5] Rapport manuel, SONATRACH ,2017.
- [6] Raffinerie d'Alger, caractéristiques techniques « capacité de production ».
- [7] Raffinerie d'Alger : augmentation des capacités à 3,6 millions de tonnes/an [enligne] «2 juin 2021»
- [8] P. Paul, T. Barrachin, and B. Zekiri. Opération manuel, Atmosphérique distillation unit & Gas plant unit, Edition : TECHNIP, France, 2015.
- [9] Rapport annuel, Projet de réhabilité de la raffinerie d'Alger RA1G, SONATRACH, 2019.
- [10] P. Paul, T. Barrachin, B. Zekiri. Opération manuel, U 500 - Naphta hydrotreating NHT Unit, Edition : TECHNIP, France, 2014.
- [11] Documentation de la raffinerie d'Alger, Manuel d'exploitation, 1964
- [12] P. Paul, T. Barrachin, B. Zekiri. Opération manul, U510 - Light naphta isomérisation ISOM Unit, Edition : TECHNIP, France, 2015.
- [13] P. Paul, T. Barrachin, B. Zekiri. Opération manuel, U 530 – Résiduel fluide catalytique cracking RFCC Unit, Edition : TECHNIP, France, 2015.
- [14] P. Paul, T. Barrachin, B. Zekiri. Opération manuel, Sulfure block unit, Edition : TECHNIP, France, 2015.
- [15] Profil d'installation, La direction des autorisations, Irving Oil Refining G.P, Raffinerie de Saint John, Nouveau-Brunswick, Décembre 2019.
- [16] G. Martino, J.P. Frank, Deactivation and Regeneration of Catalytic-Reforming Catalysts, Edition : TECHNIP, Paris, 1978.

- [17] P. Paul, T. Barrachin, and B. Zekiri. Opération manuel, U 520-Naphtha reforming CCR unit, Edition : TECHNIP, France, 2015.
- [18] A Orczysa, Caractérisation de catalyseur métalliques supportés par spectroscopie XANES, Apports de calcul quantique dans l'interprétation des spectres expérimentaux, Université de Grenoble, France, 2014.
- [19] Manuel d'exploitation de l'unité de reformage catalytique en régénération en continue CCR 520. De la raffinerie d'Alger.
- [20] NDHT-Octanizing Training Sonatrach Algiers Refinery, Edition : Axens solution, 2019.

Annexes

Annexe A

I. Les principaux équipements du procédé CCR :

a) ÉCHANGEUR CHARGE/EFFLUENT DU RÉACTEUR (520-E-001) – PACKINOX :

L'échangeur de chaleur PACKINOX est un très grand échangeur de chaleur à plaques soudées composé essentiellement d'un faisceau de transfert de chaleur et d'une cuve sous pression. Il s'agit d'un véritable échangeur à contre-courant, conçu pour une chute de pression minimale et pour une récupération de chaleur maximale par rapport à l'effluent du réacteur et il s'installe

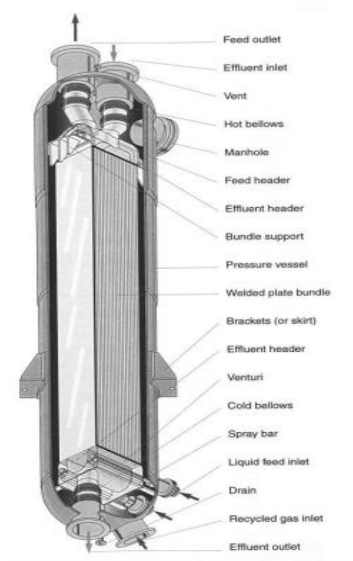


Figure A-1 : Schéma représentatif d'un échangeur charge/effluent PACKINOX.

b) Réacteurs

Les réacteurs utilisés ont une configuration de réacteur à flux radial avec des composants internes amovibles en acier inoxydable et des composants internes fixes en acier allié. Les quatre réacteurs de différentes dimensions sont disposés côte à côte, ce qui présente plusieurs avantages par rapport à des réacteurs empilés.

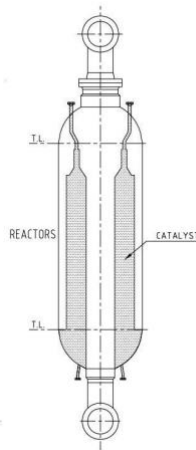


Figure A-2: Schéma illustrant le réacteur d'unité CCR



Figure A-3: illustration des 4 réacteurs en série de l'unité CCR

c) Régénérateur de catalyseur

Le régénérateur est composé de plusieurs zones dans lesquelles s'effectuent diverses opérations. Le gaz de régénération utilisé est un gaz non inflammable composé en majorité de CO₂ et de N₂ récupéré du ballon de lavage 520-D-056. Les gaz de régénération usés provenant du régénérateur y sont lavés à l'eau et à la soude caustique, donnant un gaz de régénération propre qui est ensuite séché, filtré, comprimé et envoyé dans les différentes zones de régénération du catalyseur.

• Stockage du catalyseur

Le catalyseur usé issu de la trémie de stockage 520-D-052 est envoyé au sommet du régénérateur dans lequel il est échauffé à l'aide de gaz de régénération préalablement chauffé à l'aide du four 520-F-052. Cela permet de préparer le catalyseur à son passage dans la section de brulage du coke. A noter qu'en cas de besoin, un appoint en catalyseur peut se faire dans la trémie 520-D-052.

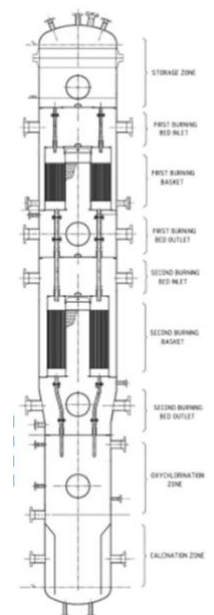


Figure A-4 : schéma représentatif du régénérateur de CCR 520

- **Brulage du coke**

Dans cette zone, le catalyseur circule dans deux lits parallèles chauffés à très haute température par le gaz de régénération combiné à de l'air comprimé. Cela assure la réaction de brulage du coke ayant pollué le catalyseur lors des réactions de reforming catalytique. Le catalyseur arrive ainsi débarrassé de son coke en pied des lits de la zone de brulage.

- **Calcination et Oxychlorination**

Le catalyseur débarrassé de son coke subit en pied du régénérateur une réaction d'oxychlorination puis une réaction de calcination à l'aide du gaz de régénération, préparé auparavant pour être utilisé comme gaz d'oxychlorination.

Le gaz de régénération utilisé pour la réaction d'oxychlorination est mélangé à de l'eau d'oxychlorination puis chauffé par le four électrique 520-E-063. On lui injecte ensuite une petite dose d'agent chlorurant permettant d'assurer la réaction.

L'air comprimé est quant à lui chauffé dans le four électrique 520-E-064 avant son entrée en pied du régénérateur.

- **Réduction du catalyseur**

La trémie 520-D-053 permet la collecte des différents courants de catalyseur provenant du régénérateur. Elle est sous pression de nitrogène afin d'éviter l'entrée d'oxygène dans le circuit de réaction. Le catalyseur est ensuite envoyé dans la chambre de réduction 520-D-061 dans laquelle la réduction va s'effectuer à l'aide d'un gaz riche en hydrogène préalablement purifié dans le block 520-M-053 et préchauffé dans le four électrique 520-E-061.

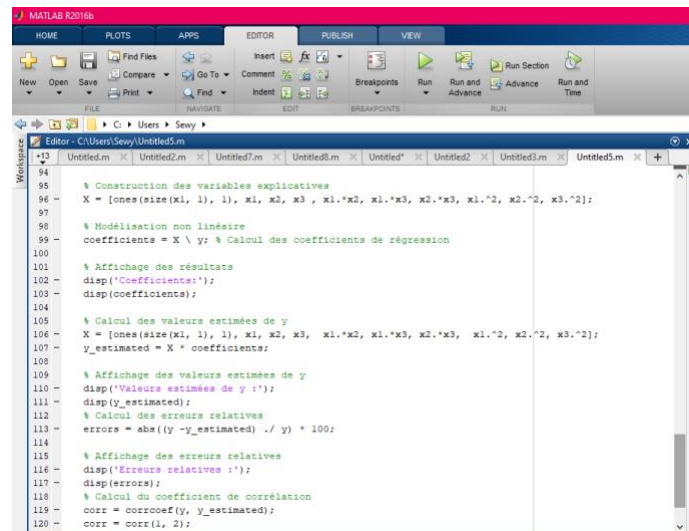
L'hydrogène, provenant du ballon 520-D-004 de la section de réaction, sort en deux courants après avoir réduit le catalyseur. Les deux courants servent parallèlement à préchauffer l'hydrogène de réduction et l'hydrogène de transport utilisé entre chaque réacteur pour porter le catalyseur du pied d'un réacteur vers le sommet du réacteur suivant.

Le catalyseur issu de la chambre de réduction entre dans le premier réacteur catalytique 520-R-001.

Annexe B

La modélisation

Réalisation du modèle :



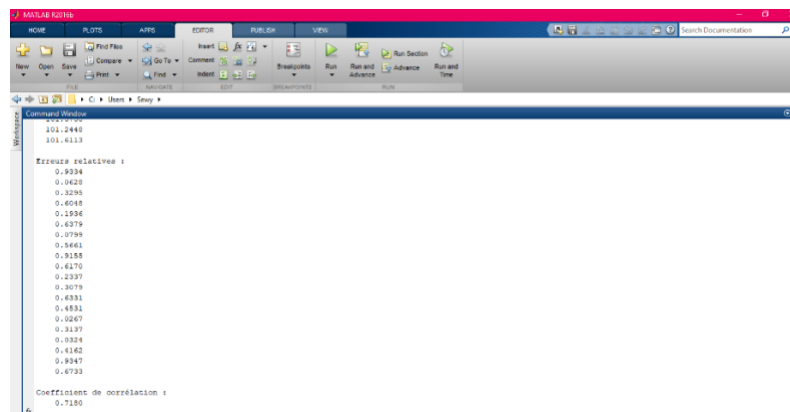
```

94
95 % Construction des variables explicatives
96 X = [ones(size(x1, 1), 1), x1, x2, x3, x1.*x2, x1.*x3, x2.*x3, x1.^2, x2.^2, x3.^2];
97
98 % Modélisation non linéaire
99 coefficients = X \ y; % Calcul des coefficients de régression
100
101 % Affichage des résultats
102 disp('Coefficients:');
103 disp(coefficients);
104
105 % Calcul des valeurs estimées de y
106 X_hat = [ones(size(x1, 1), 1), x1, x2, x3, x1.*x2, x1.*x3, x2.*x3, x1.^2, x2.^2, x3.^2];
107 y_estimated = X_hat * coefficients;
108
109 % Affichage des valeurs estimées de y
110 disp('Valeurs estimées de y :');
111 disp(y_estimated);
112 % Calcul des erreurs relatives
113 errors = abs((y - y_estimated) ./ y) * 100;
114
115 % Affichage des erreurs relatives
116 disp('Erreurs relatives :');
117 disp(errors);
118 % Calcul du coefficient de corrélation
119 corr = corrcorr(y, y_estimated);
120 corr = corr(1, 2);

```

Figure C-1: Le fonctionnement de la modélisation sur MATLAB.16.

Les résultats quel était donner par logiciel MATLAB.16 :



```

204.7440
201.2440
101.4113

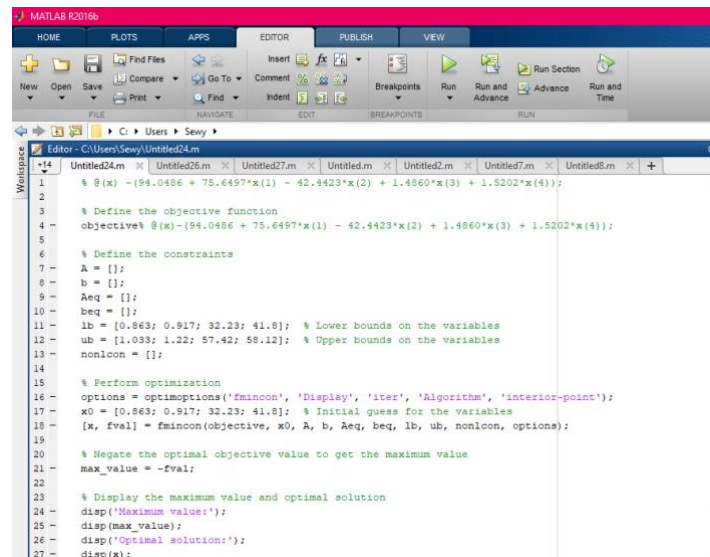
Erreurs relatives :
0.9334
0.1420
0.3295
0.4048
0.1396
0.4375
0.4795
0.3480
0.5155
0.4170
0.1337
0.3078
0.4331
0.4531
0.0267
0.1137
0.3324
0.4162
0.4347
0.4733

Coefficient de corrélation :
0.7190

```

Figure B-2 : Résultat obtenue par le MATLAB.

L'optimisation s'effectue de cette forme :



```
1 % @(x) -(94.0486 + 75.6497*x(1) - 42.4423*x(2) + 1.4860*x(3) + 1.5202*x(4));
2
3
4 % Define the objective function
5 objective @(x)-(94.0486 + 75.6497*x(1) - 42.4423*x(2) + 1.4860*x(3) + 1.5202*x(4));
6
7 % Define the constraints
8 A = [];
9 b = [];
10 Aeq = [];
11 beq = [];
12 lb = [0.863; 0.917; 32.23; 41.8]; % Lower bounds on the variables
13 ub = [1.033; 1.22; 57.42; 58.12]; % Upper bounds on the variables
14 nonlcon = [];
15
16 % Perform optimization
17 options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'iter', 'Algorithm', 'interior-point');
18 x0 = [0.863; 0.917; 32.23; 41.8]; % Initial guess for the variables
19 [x, fval] = fmincon(objective, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options);
20
21 % Negate the optimal objective value to get the maximum value
22 max_value = -fval;
23
24 % Display the maximum value and optimal solution
25 disp('Maximum value:');
26 disp(max_value);
27 disp('Optimal solution:');
28 disp(x);
```

Figure B-3 : Représentation des fonctions sur de MATLAB.

Annexe C

Les analyses des charge, reformat et l'analyse de chlore en catalyseur régénéré et cokéfié.

Summary

Component	% (w/w)	% (V/V)
Saturates	89.22	89.22
Olefins	10.59	10.62
Aromatics	0.20	0.16

Normalized Volume Percent Results

Cnr	Naph.	i-Par.	n-Par.	Cycl Ol.	i-Olef.	n-Olef.	Arom.	Total
4	-	-	0.03	-	-	0.03	-	0.05
5	0.03	0.09	0.27	-	0.05	0.12	-	0.55
6	3.12	4.66	4.94	0.03	0.14	0.43	-	13.32
7	8.08	7.41	8.52	4.12	0.22	4.56	-	32.90
8	19.36	6.50	4.88	0.11	-	0.33	0.02	31.19
9	5.81	2.59	0.23	-	0.23	0.03	-	8.89
10	5.77	-	0.47	0.18	0.05	-	0.07	6.54
11	1.20	0.02	0.13	0.01	-	-	-	1.38
12+	-	3.45	-	-	-	-	0.07	3.52
Poly	1.66	-	-	-	-	-	-	1.66
Total	45.04	24.71	19.47	4.44	0.68	5.49	0.16	100.00

Figure C-1: Résultats des analyses chromatographiques du naphta lourd.

Normalized Volume Percent Results

Cnr	Naph.	i-Par.	n-Par.	Cycl Ol.	Olef.	Arom.	Total
4	-	0.10	0.41	-	-	-	0.51
5	2.41	-	1.72	-	-	-	4.14
6	2.97	3.52	0.89	-	-	-	7.37
7	1.14	8.34	2.27	-	-	18.69	30.44
8	1.37	0.41	0.01	-	-	44.27	46.07
9	0.21	-	-	-	-	1.22	1.43
10	0.03	0.01	-	-	-	8.12	8.16
11	-	-	-	-	-	-	-
12+	-	0.27	-	-	-	1.61	1.88
Poly	-	-	-	-	-	-	-
Total	8.13	12.65	5.30	-	-	73.92	100.00

Figure C-2 : Résultats des analyses chromatographiques du reformat.

Annexe D

Représentation des graphes

- La figure III.1: evolution de l'indice d'octane en fonction de la teneur en Cl dans le catalyseur noir s'effectue par les données suivants :

Tableau D.1: L'indice d'octane en fonction de %Cl dans le catalyseur noir

NO	Cl en cata noir
099.1	0.917
100.3	1.015
100.5	1.046
101.0	1.081
101.1	1.108
101.3	1.140
101.4	1.150
102.0	1.210
099.1	0.917

- La figure III.2: Evolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la quantité de chlore en catalyseur régénéré S'effectue par les données suivants :

Tableau D.2: L'indice d'octane en fonction de %Cl dans le catalyseur blanc

NO	Cl en cata blanc
099.1	0.917
100.3	1.015
100.5	1.046
101.0	1.081
101.1	1.108
101.3	1.14
101.4	1.15
102	1.21

- Figure III.3 : Evolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la composition de %P présente dans la charge S'effectue par les données suivants :

Tableau D.3: L'indice d'octane en fonction de %P présente dans la charge

NO	%P dans la charge
99.1	30.24
100	31.70
100.3	41.8
100.4	54.08
100.8	56.70
101.0	59.94
101.1	60.25
102.2	62.75

- Figure III.4 : Evolution de l'indice d'octane de reformat en fonction de la composition de %N présente dans la charge S'effectue par les données suivants :

Tableau D.3: L'indice d'octane en fonction de %P présente dans la charge.

NO	%N dans la charge
099.1	64.89
100.0	58.20
100.3	57.42
100.4	40.54
100.6	39.60
100.8	38.17
101.0	31.53
101.1	30.83
102.2	29.20

