

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Ecole Supérieure des Sciences Appliquées d'Alger



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر

Département du second cycle

## Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Procédés Organiques

Thème :

## La désactivation et la régénération de catalyseur de craquage catalytique

Présenté par : ADEL Sara

Encadré (e) par : BERKACHE Kamel

Co-encadré(e) par : BENAMARA Hocine

Soutenu le : 24/06/2023

Devant le jury composé de :

Mr. KHERFI Hamza	MCA	ESSA-Alger	President
Mme. BOUDERDARA Nabila	MCB	ESSA-Alger	Examinatrice
Mr. BERKACHE Kamel	MCA	ESSA-Alger	Encadreur
Mr. BENAMARA Hocine	Ingénieur	SONATRACH	Co-Encadreur

Binôme N° : 22PO/MASTER/2023

## Résumé

Le catalyseur de craquage catalytique est un catalyseur zéolithique utilisé dans l'industrie pétrochimique pour produire des carburants liquides à partir de grandes molécules d'hydrocarbures. Cependant, la désactivation du catalyseur de craquage catalytique est un problème courant qui peut entraîner une diminution de l'activité catalytique et une réduction de la durée de vie du catalyseur. Les principales causes de désactivation comprennent l'accumulation de coke, de contaminants et de poisons de surface, qui peuvent obstruer les pores et les canaux du catalyseur.

**Mots clés :** catalyseur zéolithique, craquage catalytique, désactivation.

## ملخص

يعد المحفز الحفاز للتكسير الحفزي محفزاً زيوليتياً يستخدم في صناعة البتر وكيماويات لإنتاج الوقود السائل من جزيئات الهيدروكربونات الكبيرة. ومع ذلك، يُعد تعطل المحفز للتكسير الحفزي مشكلة شائعة يمكن أن تؤدي إلى تقليل النشاط الحفزي وتقليل عمر المحفز، حيث تشمل الأسباب الرئيسية للتعطل تراكم الكوك والشوائب. والسموم السطحية، التي يمكن أن تسد المسام والقنوات في المحفز.

. **الكلمات المفتاحية :** التكسير الحفزي، تعطل المحفز، محفزاً زيوليتياً

## Abstract

The catalytic cracking catalyst is a zeolite catalyst used in the petrochemical industry to produce liquid fuels from large hydrocarbon molecules. However, deactivation of the catalytic cracking catalyst is a common problem that can result in reduced catalytic activity and a shortened catalyst lifespan. The primary causes of deactivation include the accumulation of coke, contaminants, and surface poisons, which can clog the catalyst's pores and channels.

**Key words:** zeolite catalyst, catalytic cracking, deactivation.

## Dédicace

Je tien à dédie ce travail qui est un mémoire de fin d'étude a tous ceux que j'aime surtout mes parent ma mère et mon père qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études.

C'est un moment de plaisir de dédier cet œuvre à mes sœurs en signe de reconnaissance et de gratitudes.

J'ai le plaisir de dédier ce travail à toute ma famille et mes amies sans exception.

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Ensuite, je tiens à remercier mon encadrant, **Mr. BERKACHE KAMEL**, pour ses qualités humaines et son aide durant toute la période du travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à mon co-encadrant, **Mr. BENAMARA HOCINE** pour son soutien.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury, **Mr. KHERFI et Mme. BOUDERDARA**, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs précieuses remarques.

# Table des matières

Résumé .....	ii
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures .....	viii
Introduction.....	1
Chapitre 1 Généralité sur la catalyse et le catalyseur .....	2
1.1 Introduction .....	2
1.2 Définition de la catalyse .....	3
1.3 Historique de catalyseur .....	3
1.4 Types de catalyseur .....	4
1.4.1 Catalyseur homogène .....	4
1.4.2 Catalyseur hétérogène .....	4
1.5 Propriétés et caractéristiques des catalyseurs industriels .....	6
1.5.1 Activité.....	6
1.5.2 Sélectivité.....	6
1.5.3 Stabilité.....	7
1.5.4 Morphologie .....	7
1.5.5 La résistance mécanique.....	8
1.5.6 Régénération.....	9
1.5.7 Reproductibilité.....	10
1.5.8 Originalité.....	10
1.5.9 Coût .....	11

Chapitre 2 Catalyseur du craquage catalytique .....	12
2.1 Zéolithes .....	12
2.1.1 Historique des zéolithes .....	12
2.2 Types zéolithes .....	13
2.3 Procédé de craquage catalytique de catalytique .....	14
2.4 Zéolithes dans les procédés de craquage catalytique.....	14
2.4.1 Structure du catalyseur de Craquage Catalytique .....	15
Chapitre 3 Désactivation de catalyseur de craquage catalytique .....	19
3.1 Différentes formes de la désactivation des catalyseurs .....	19
3.1.1 Frittage .....	19
3.1.2 Inhibiteurs.....	19
3.1.3 Empoisonnement .....	20
3.2 Régénération de catalyseurs .....	22
3.3 Gestion du catalyseur frais et usée a l'unité de craquage catalytique .....	23
3.3.1 Catalyseur frais.....	23
3.3.2 Catalyseur à l'équilibre .....	23
3.3.3 Catalyseur à l'équilibre réutilisable .....	23
3.3.4 Élimination du catalyseur à l'équilibre .....	24
3.3.5 Particules de catalyseur FCC.....	24
3.4 Méthodes de caractérisation des espèces désactivantes .....	24
Conclusion .....	26
Bibliographie .....	28

## Liste des tableaux

Tableau 1 : une comparaison entre les catalyseurs homogènes et hétérogènes .....	5
Tableau 2: Demande mondiale en catalyseur (milliard d'US\$/Année) par secteur[5].....	5
Tableau 3 : Principales techniques utilisées pour la caractérisation des espèces désactivantes.....	25

## Liste des figures

Figure 1: Zéolithes naturelles .....	13
Figure 2 : Structure de la faujasite (zéolithe Y) .....	15
Figure 3 : Construction de la structure zéolithe .....	16
Figure 4 : Le catalyseur de FCC.....	17



# Introduction

La catalyse est une méthode fréquemment employée dans l'industrie chimique afin d'accélérer les réactions chimiques et améliorer leur efficacité. Les catalyseurs, substances utilisées, permettent d'augmenter la vitesse et la spécificité d'une réaction chimique sans être consommés dans le processus. Toutefois, les catalyseurs ne sont pas éternels et subissent des altérations mécaniques, physiques et/ou chimiques qui entraînent une diminution de leur activité, ainsi que de leur spécificité. Ce phénomène, appelé désactivation, est courant dans les procédés catalytiques industriels, et conduit à une dégradation des propriétés catalytiques.

La désactivation des catalyseurs peut entraîner des conséquences préjudiciables pour les processus chimiques, notamment en termes de coûts et de performances. Les causes de désactivation des catalyseurs peuvent varier, allant de l'empoisonnement et de la contamination à l'usure physique et chimique. Les catalyseurs peuvent également être désactivés par des produits de réaction tels que des réactifs ou des produits catalytiques, qui se déposent sur la surface active du catalyseur et obstruent les sites actifs. La désactivation des catalyseurs peut être un phénomène complexe et difficile à appréhender, car il peut impliquer des interactions complexes entre les catalyseurs, les réactifs, les produits et les conditions de réaction. Ainsi, une compréhension approfondie des mécanismes de désactivation des catalyseurs est essentielle pour améliorer leur durée de vie et optimiser les processus catalytiques.

Il est également envisageable d'explorer des méthodes de régénération des catalyseurs afin de prolonger leur durée de vie et de réduire les coûts liés à leur remplacement. Cependant, il n'est pas toujours possible de les régénérer, et dans certains cas, le remplacement complet du catalyseur est la seule option viable. En définitive, la désactivation des catalyseurs représente un défi à relever dans les processus catalytiques. Cependant, grâce à une compréhension approfondie de ce phénomène, il est possible d'optimiser leur utilisation et de maximiser leur efficacité.

# Chapitre 1

## Généralité sur la catalyse et le catalyseur

### 1.1 Introduction

En 1835, Berzelius découvrit le phénomène de la catalyse, qui se réfère à l'accélération d'une réaction chimique grâce à l'intervention d'un catalyseur qui n'est pas consommé dans la réaction. Cette notion revêt une importance économique considérable, car de nombreux produits industriels essentiels tels que les plastiques, les carburants, les détergents et les solvants sont fabriqués en utilisant des catalyseurs.

La recherche dans le domaine de la catalyse est particulièrement active, impulsée par l'épuisement des ressources pétrolières et l'augmentation des coûts des matières premières. L'un des objectifs majeurs de la chimie contemporaine est de découvrir et de développer des catalyseurs capables non seulement d'accélérer les réactions chimiques, mais aussi de favoriser les réactions souhaitées tout en inhibant les réactions indésirables.

Une grande importance est accordée à la recherche de catalyseurs performants, sélectifs et durables. Les catalyseurs performants jouent un rôle crucial en accélérant les réactions, ce qui améliore l'efficacité des processus industriels et réduit les coûts de production. Les catalyseurs sélectifs favorisent la formation des produits désirés tout en minimisant la production de sous-produits indésirables, ce qui permet de maximiser le rendement et la pureté des produits finaux. Enfin, les catalyseurs durables sont conçus pour être stables et réutilisables, ce qui contribue à réduire les coûts et les impacts environnementaux.

La découverte de nouveaux catalyseurs et l'amélioration de ceux déjà existants nécessitent une compréhension approfondie des mécanismes de la catalyse. Les chercheurs se penchent sur les interactions entre les catalyseurs, les réactifs et les produits afin de saisir les étapes clés de la

réaction et d'optimiser les conditions de réaction. Cette connaissance permet de concevoir des catalyseurs personnalisés en modifiant leur composition, leur structure et leurs propriétés catalytiques, répondant ainsi aux besoins spécifiques des réactions chimiques ciblées [1].

## **1.2 Définition de la catalyse**

La catalyse se réfère à l'action d'un catalyseur sur une transformation chimique. Cette action est exclusivement d'ordre cinétique. En effet, un catalyseur ne fait qu'accélérer, parfois de manière considérable, la vitesse d'une réaction thermodynamiquement possible. Il est important de souligner que le catalyseur ne peut en aucun cas rendre une réaction thermodynamiquement très défavorable réalisable. Autrement dit, le catalyseur modifie la valeur de la constante de vitesse d'une réaction, mais n'affecte en rien la constante d'équilibre de cette réaction. Par conséquent, l'utilisation d'un catalyseur ne permet pas d'accroître le rendement d'une réaction [2].

## **1.3 Historique de catalyseur**

Les premières découvertes dans le domaine de la catalyse sont étroitement liées à la biocatalyse, où l'utilisation d'enzymes pour la fermentation alcoolique et l'accélération des fermentations dans la production de fromage ont été observées. Par la suite, de nombreuses réactions catalytiques ont été explorées, telles que l'oxydation du dioxyde de soufre en présence d'un catalyseur et d'air, l'estérification des alcools catalysée par des acides, ainsi que l'utilisation de la chaleur du platine pour réaliser des réactions à haute température. Le terme "catalyseur" a été introduit par Berzelius en 1835 pour désigner la cause d'un groupe de réactions. Dans les années 1850, Kekulé a réalisé l'importance de la loi d'action de masse et des forces catalytiques dans les réactions chimiques. Enfin, vers 1901, Georg Bredin a mis en avant l'importance de l'empoisonnement des catalyseurs. Ces avancées ont jeté les bases de notre compréhension de la catalyse et ont ouvert la voie à de nouvelles découvertes et applications dans ce domaine [1].

## **1.4 Types de catalyseur**

### **1.4.1 Catalyseur homogène**

Un catalyseur homogène est un type de catalyseur qui se trouve dans la même phase que les réactifs au cours d'une réaction chimique. Il est généralement dissous dans le même solvant ou milieu réactionnel que les réactifs, ce qui permet une interaction directe entre le catalyseur et les espèces réactives. Ainsi, le catalyseur homogène peut interagir de manière étroite avec les réactifs, favorisant ainsi les réactions chimiques.

Les catalyseurs homogènes se composent fréquemment de composés organométalliques ou de complexes métalliques. Ils peuvent prendre la forme d'ions métalliques, de complexes de coordination ou de composés organométalliques contenant un ou plusieurs métaux de transition. Ces catalyseurs sont couramment utilisés dans les réactions organiques, telles que l'hydrogénation, la polymérisation et la synthèse asymétrique. Ils jouent un rôle crucial en facilitant ces réactions et en permettant la formation de produits spécifiques de manière efficace et sélective. L'utilisation de ces catalyseurs offre des avantages significatifs en termes de rendement, de sélectivité et de contrôle des réactions chimiques.

### **1.4.2 Catalyseur hétérogène**

Un catalyseur hétérogène se réfère à un type de catalyseur présent dans une phase distincte de celle des réactifs au cours d'une réaction chimique. Contrairement aux catalyseurs homogènes, les catalyseurs hétérogènes sont généralement solides et se trouvent dans une phase séparée des réactifs, qui peuvent être sous forme liquide ou gazeuse.

Les catalyseurs hétérogènes sont fréquemment composés de matériaux solides tels que des métaux, des oxydes métalliques, des zéolithes ou des catalyseurs supportés sur des supports inertes. Ils jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines industriels, notamment la production d'ammoniac, la conversion du pétrole, la purification des gaz d'échappement des véhicules, la synthèse de produits chimiques, et bien d'autres encore [3].

Voici une présentation comparative entre les catalyseurs homogènes et hétérogènes, du point de vue d'un expert spécialisé dans la catalyse homogène :

Tableau 1 : une comparaison entre les catalyseurs homogènes et hétérogènes

	Homogène	Hétérogène
Activité	<b>haut</b>	<b>variable</b>
Sélectivité	<b>élevé</b>	<b>variable</b>
États de la réaction	<b>douce</b>	<b>dure</b>
Temps de la vie de catalyseur	<b>Variable</b>	<b>longtemps</b>
Sensibilité à la désactivation	<b>basse</b>	<b>haute</b>
Problèmes dus à la diffusion	<b>aucune</b>	<b>difficile à résoudre</b>
Le recyclage du catalyseur	<b>habituellement difficile</b>	<b>peut facilement être fait</b>
Les propriétés électriques et stériques	<b>facilement changées</b>	<b>aucune variation possible</b>
Mécanisme	<b>modèles réalistes existent</b>	<b>non évident</b>

La catalyse industrielle est largement dominée par l'utilisation de catalyseurs hétérogènes, en particulier les catalyseurs solides. En effet, environ 80% des procédés catalytiques industriels font appel à des catalyseurs solides, tandis que les catalyseurs homogènes représentent environ 17% et les biocatalyseurs environ 3% des utilisations restantes [4].

Tableau 2: Demande mondiale en catalyseur (milliard d'US\$/Année) par secteur [5]

Année Secteur	2007	2010	2013
Raffinage	4.35	4.98	5.58
Pétrochimie	3.03	3.64	4.34
polymère	3.24	3.75	4.3
Chimie fine et autre	1.47	1.59	1.7
Environnemental	5.51	6.28	6.93
total	17.6	20.2	23.1

## **1.5 Propriétés et caractéristiques des catalyseurs industriels**

En plus des caractéristiques intrinsèques essentielles à tout catalyseur, telles que l'activité, la sélectivité et la stabilité, les applications industrielles requièrent que le catalyseur présente des propriétés supplémentaires. Il doit être régénérable, c'est-à-dire capable de retrouver ses performances catalytiques après une réactivation ou une régénération. Il doit également être reproductible, c'est-à-dire que sa synthèse et ses performances doivent être constantes d'un lot à l'autre.

De plus, le catalyseur doit être mécaniquement et thermiquement stable, résistant aux contraintes physiques et aux hautes températures auxquelles il peut être exposé lors des réactions chimiques. Il doit être original, en offrant des caractéristiques uniques ou des avantages par rapport à d'autres catalyseurs existants. Sur le plan économique, il doit être abordable en termes de coût de production et de durée de vie.

Enfin, le catalyseur doit posséder les caractéristiques morphologiques appropriées, telles que la taille, la forme et la structure de surface, qui influencent son activité et son efficacité dans le contexte spécifique de l'application industrielle.

### **1.5.1 Activité**

Une activité élevée se manifeste par une productivité accrue des réacteurs, permettant ainsi l'utilisation de volumes relativement réduits de catalyseur. De plus, des conditions de fonctionnement douces, notamment en termes de température, peuvent améliorer la sélectivité et la stabilité du catalyseur si la thermodynamique de la réaction est favorable.

### **1.5.2 Sélectivité**

Une sélectivité élevée permet d'obtenir un rendement élevé du produit souhaité tout en éliminant les réactions concurrentielles et indésirables. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'améliorer la texture du catalyseur, notamment en ajustant le volume des pores et leur distribution. En effet, une meilleure texture du catalyseur contribue à réduire les limitations dues à la diffusion interne, ce qui, dans le cas des réactions consécutives, permet de préserver efficacement la sélectivité.

### **1.5.3 Stabilité**

Un catalyseur de qualité conservera sa stabilité au fil du temps, même lors des processus de régénération et d'utilisation, mais à un rythme très lent. En réalité, un catalyseur subit généralement des modifications au cours de la réaction, contrairement à ce qui est théoriquement envisagé. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à une perte progressive d'activité, de sélectivité ou de résistance mécanique, notamment :

La formation de coke peut se produire sur certains catalyseurs en raison de réactions parasites telles que l'hydrogénolyse, la polymérisation, la cyclisation et le transfert d'hydrogène. Les réactifs, les produits ou les substances indésirables peuvent également affecter les sites actifs du catalyseur ou le support sur lequel il repose.

De plus, des composés volatils tels que le chlore peuvent être évaporés lors de réactions telles que la reformage.

Les cristaux d'un métal déposé peuvent croître ou s'agglomérer, ce qui peut entraîner une modification de la structure cristalline du support. Ce changement de structure cristalline peut entraîner une diminution de la résistance mécanique du catalyseur.

L'adsorption progressive de traces de substances toxiques présentes dans les réactifs ou les produits peut entraîner une diminution de l'activité du catalyseur. Il est important de noter que les matières premières utilisées dans l'industrie sont rarement des produits purs, mais plutôt des mélanges contenant des impuretés. Par conséquent, il est parfois nécessaire de prétraiter ces mélanges afin d'éliminer les impuretés, pour assurer l'utilisation optimale du catalyseur dans des conditions favorables.

### **1.5.4 Morphologie**

Les caractéristiques morphologiques externes d'un catalyseur, telles que sa forme et sa taille de grain, doivent être adaptées au processus spécifique auquel il est destiné. Dans le cas de réacteurs à lit mobile ou à lit fluidisé, une forme sphérique est recommandée pour minimiser les problèmes d'usure et d'abrasion. Dans un lit fluidisé, l'utilisation de poudres sphériques est préférée pour

réduire l'usure, et il est important que les grains aient une distribution de taille appropriée pour assurer une bonne fluidisation. Dans un lit fixe, différents types de catalyseurs tels que des billes, des anneaux, des granulés, des extrudés ou des flocons peuvent être utilisés. Cependant, leur forme et leurs dimensions influenceront la chute de pression engendrée par le lit. Ainsi, des catalyseurs peuvent être classés en fonction de leur diamètre équivalent et de l'effet qu'ils ont sur la chute de pression, de la manière suivante : Anneaux < billes < granules (pastilles) < extrudés < écrasé.

La chute de pression doit être suffisamment élevée pour assurer une distribution uniforme du fluide réactionnel à travers le lit catalytique, mais elle ne doit pas être excessive afin de ne pas entraîner des coûts élevés de compression et de recyclage du gaz.

Il convient de souligner que la densité des grains et en particulier la densité de remplissage sont des préoccupations majeures pour les utilisateurs, et ces paramètres dépendent de la morphologie, notamment du volume de pores. Lors de l'achat du catalyseur en poids pour remplir un réacteur donné, le coût de la charge de catalyseur sera influencé par sa densité de remplissage.

En conclusion, en ce qui concerne la morphologie, les catalyseurs sous forme de billes sont plus faciles à manipuler, à remplir et à vider dans les réacteurs. Le tamisage peut également être nécessaire pour éliminer les fines particules après plusieurs cycles de régénération.

### **1.5.5 La résistance mécanique**

La résistance mécanique d'un catalyseur se manifeste par sa capacité à résister à l'écrasement, lui permettant ainsi de rester intact malgré les contraintes prévues et accidentelles présentes dans le lit catalytique. Cette résistance mécanique est également illustrée par la capacité des grains à résister à l'usure due au frottement, qui peut générer des fines particules et entraîner une augmentation de la chute de pression dans le lit catalytique.

Dans le cas des catalyseurs en poudre destinés aux lits fluides ou aux lits à ébullition, il est également essentiel qu'ils résistent à l'abrasion contre les parois ou à l'érosion causée par les fluides.



En résumé, la résistance mécanique d'un catalyseur est démontrée par sa capacité à résister à l'écrasement, à l'usure et à l'abrasion, garantissant ainsi son intégrité structurelle et minimisant les problèmes de chute de pression dans le lit catalytique.

### **Caractéristiques thermiques**

Dans le cas de certains catalyseurs, il est important de prendre en compte la conductivité thermique et la chaleur spécifique. Une conductivité thermique élevée de la masse catalytique permet de réduire les gradients de température à la fois dans le grain et dans le lit catalytique lors de réactions endothermiques ou exothermiques, améliorant ainsi le transfert de chaleur.

Pour d'autres catalyseurs, la chaleur spécifique joue un rôle plus important. Une chaleur spécifique élevée permet à un catalyseur de craquage catalytique de supporter une charge thermique élevée provenant de la combustion du coke, et de la réutiliser dans la réaction de craquage endothermique, où elle est consommée de manière utile.

En résumé, la conductivité thermique élevée d'un catalyseur favorise le transfert de chaleur, tandis que la chaleur spécifique élevée est importante pour le support thermique et l'efficacité des réactions spécifiques, comme le craquage catalytique.

### **1.5.6 Régénération**

Comme nous l'avons souligné en ce qui concerne la stabilité, il est important de noter que dans la réalité, les catalyseurs ne restent pas intacts à la fin de la réaction. Tout au long de leur durée de vie, lorsque leurs activités ou sélectivités deviennent insuffisantes, ils doivent être régénérés par un processus qui restaure tout ou partie de leurs propriétés catalytiques. La méthode de régénération la plus courante est la combustion du carbone, mais le contact avec des gaz appropriés est également fréquemment utilisé pour éliminer certains poisons réversibles. L'hydrogénolyse des composés d'hydrocarbures peut être effectuée si le catalyseur le permet, et l'injection de composés chimiques peut également être utilisée dans le processus de régénération. Donc, lorsqu'un catalyseur atteint un stade où son activité ou sa sélectivité sont insuffisantes, il est nécessaire de le régénérer en utilisant diverses techniques telles que la combustion du carbone, l'élimination des poisons réversibles par contact avec des gaz appropriés, l'hydrogénolyse des composés d'hydrocarbures ou l'injection de composés chimiques. Cela permet de restaurer tout ou partie des propriétés catalytiques du matériau.

Lorsque le processus de régénération n'implique pas la combustion du carbone déposé sur le catalyseur, il est souvent appelé "rajeunissement". Plus le cycle de fonctionnement entre deux régénérations est court, plus le rajeunissement joue un rôle crucial. Il devient évident que la simple régénération ne suffit pas à rétablir l'activité et la sélectivité du catalyseur ; il est également essentiel de préserver sa résistance mécanique lors de régénérations successives ou de rajeunissements. En d'autres termes, pour que le catalyseur retrouve son activité et sa sélectivité, il est nécessaire de procéder à des régénérations fréquentes ou à des rajeunissements, tout en veillant à ce que sa résistance mécanique soit préservée. Un intervalle court entre les cycles de régénération est donc essentiel pour maintenir les performances du catalyseur.

### **1.5.7 Reproductibilité**

La reproductibilité est une caractéristique aussi importante pour la préparation d'un catalyseur que pour le catalyseur lui-même. Elle est une préoccupation majeure pour les utilisateurs industriels qui souhaitent être assurés de la qualité constante du catalyseur à chaque nouvelle production. Elle préoccupe également les ingénieurs impliqués dans le développement du catalyseur, depuis le laboratoire jusqu'à la production industrielle. En effet, la préparation d'un catalyseur implique généralement plusieurs étapes complexes qui dépendent d'un grand nombre de variables difficiles à contrôler simultanément. Il est donc essentiel de pouvoir rapidement vérifier la reproductibilité de la préparation du catalyseur et de garder à l'esprit que la formulation développée en laboratoire doit être extrapolable à l'échelle pilote et industrielle, tout en respectant des conditions économiques acceptables.

### **1.5.8 Originalité**

Il est également crucial que le catalyseur et les procédés auxquels il est destiné puissent être utilisés légalement, en respectant les licences appropriées. Cela n'est possible que si le catalyseur est original, ce qui est rare, ou s'il est dans le domaine public, ce qui est plus courant. Dans le premier cas, il peut être protégé par des brevets fondamentaux, tandis que dans le second cas, les brevets peuvent s'appliquer uniquement aux améliorations apportées. Plus le catalyseur est original, plus il est associé à des redevances potentielles et est essentiel dans le contrôle de la technologie du processus.

### **1.5.9 Coût**

Même si un catalyseur présente toutes les propriétés et caractéristiques énumérées précédemment, il reste une condition finale : il doit résister à la comparaison avec les catalyseurs concurrents ou les procédés offrant des performances équivalentes en termes de coût. Idéalement, son coût ne devrait pas constituer une charge excessive pour l'économie du processus dans lequel il sera utilisé, ou du moins, il ne devrait pas imposer un fardeau trop lourd [3].

## Chapitre 2

# Catalyseur du craquage catalytique

### 2.1 Zéolithes

#### 2.1.1 Historique des zéolithes

Le géologue suédois Axel Frederick Cronstedt (1722-1765), considéré comme un "réformateur de la minéralogie" en raison de ses contributions majeures à ce domaine, a introduit le terme "zéolite" en 1756. Le mot zéolite est dérivé de la combinaison des mots grecs "zein" (bouillir) et "lithos" (pierre), ce qui lui confère la signification de "pierre qui fait bouillir".

En 1862, Claire Deville a réussi à synthétiser la première zéolite artificielle, appelée la lévyne, en chauffant des silicates de sodium et de potassium à 170 °C. En 1896, Friedel a observé que plusieurs liquides, tels que le benzène et le chloroforme, étaient piégés à l'intérieur des zéolithes déshydratées, ce qui a conduit à l'idée que la structure des zéolithes déshydratées était composée d'un "armazon spongieux".

En 1925, Weigel et Steinhoff ont observé le premier effet de tamis moléculaire lorsqu'ils ont remarqué que la chabazite déshydratée adsorbait rapidement de l'eau, du méthanol, de l'éthanol et de l'acide formique, mais n'adsorbait pas l'acétone, l'éther ou le benzène. Cependant, le terme "tamis moléculaire" a été introduit pour la première fois par Mc Bain en 1932 dans son livre intitulé "The Sorption of Gases and Vapors by Solids".

Dans les années 1930, l'utilisation de la diffraction des rayons X a permis la détermination de la structure cristalline des zéolithes naturelles (Pauling, 1930 ; Taylor, 1930). À partir de 1948, Milton et ses collaborateurs ont commencé à travailler sur la synthèse des zéolithes, motivés par

leurs applications industrielles. À la fin des années 1960, les applications commerciales des zéolites étaient solidement établies. Au cours des dernières décennies, la recherche sur les zéolites a connu une augmentation significative, comme en témoignent les nombreux articles, brevets et livres publiés chaque année dans ce domaine. Aujourd'hui, de nouvelles zéolites synthétiques ainsi que des matériaux présentant de nouvelles topologies et de nouvelles propriétés en matière de canalisation et d'adsorption continuent d'émerger.

## 2.2 Types zéolithes

Selon l'origine on peut distinguer deux types de zéolithe :

1. Zéolithe d'origine minérale compose de mordinite, chabazite, erionite, clinopyilote, qu'on peut trouver dans la nature.
2. La zéolithe d'origine synthétique de type X, Y, ZSM5, MCM41 Ets

Les zéolithes ont pour formule chimique générale, c'est-à-dire la composition des mailles élémentaires, s'écrit comme suit :



Où :

M : cation

n : valence des cations

z H<sub>2</sub>O : eau intercrystalline du réseau

Dans toutes les situations, M représente un cation échangeable, pouvant être un métal alcalin, alcalino-terreux, un métal de transition, un ammonium ou un proton. Le cation M joue un rôle essentiel dans les propriétés acido-basiques de Brønsted et de Lewis, ainsi que dans les capacités d'échange cationique des zéolithes. De plus, il compense la charge négative résultant de la structure du réseau cristallin.



Figure 1: Zéolithes naturelles

## **2.3 Procédé de craquage catalytique de catalytique**

Le craquage catalytique est un procédé largement utilisé dans l'industrie pétrolière pour convertir des hydrocarbures lourds en produits pétroliers plus légers et plus utiles. Ce processus s'effectue dans un réacteur catalytique où les hydrocarbures sont mélangés à un catalyseur à base de zéolithe, puis chauffés à des températures élevées. Cela permet de rompre les grosses molécules en molécules plus petites. Périodiquement, le catalyseur est régénéré en le chauffant à des températures élevées afin de brûler les résidus de carbone qui se sont accumulés à sa surface pendant le processus de craquage. Ainsi, l'activité catalytique du catalyseur est maintenue.

Il existe différents types de réacteurs utilisés pour le craquage catalytique, mais le réacteur à lit fluidisé est le plus répandu. Dans ce type de réacteur, le catalyseur est maintenu en suspension dans un flux de gaz chaud. Cela favorise une répartition homogène du catalyseur et des températures uniformes dans tout le réacteur. Les produits résultant de la réaction sont ensuite récupérés et traités afin de produire des produits pétroliers plus légers et plus utiles.

Le régénérateur joue un rôle essentiel dans le procédé de craquage catalytique en restaurant l'activité du catalyseur. Le catalyseur épuisé est acheminé vers le régénérateur, où il est chauffé à des températures élevées afin de brûler les résidus de carbone accumulés à sa surface pendant le processus de craquage. Une fois régénéré, le catalyseur est renvoyé dans le réacteur pour poursuivre le processus de craquage. Le régénérateur est donc un équipement essentiel pour maintenir la performance et l'efficacité du procédé de craquage catalytique. [6].

## **2.4 Zéolithes dans les procédés de craquage catalytique**

L'incorporation des zéolithes dans les procédés de craquage catalytique a eu un impact significatif sur l'industrie du raffinage en améliorant la valorisation et la qualité des produits pétroliers. Cette utilisation a véritablement révolutionné le secteur du raffinage en ouvrant de nouvelles possibilités pour l'amélioration et la transformation des produits pétroliers.

## 2.4.1 Structure du catalyseur de Craquage Catalytique

Le catalyseur utilisé dans le processus de craquage catalytique à lit fluidisé est un solide composite complexe à base d'acide. Les catalyseurs modernes de FCC (Fluid Catalytic Cracking) sont composés de plusieurs ingrédients, parmi lesquels :

- ◆ Zéolithes (faujasites de type Y, ZSM-5).
- ◆ Matrices actives (Silice-Alumines,).
- ◆ Additifs divers (Liant, kaolin, pièges à métaux...)

Les zéolithes sont des matériaux cristallins microporeux composés de silicates d'aluminium. Des méthodes sont disponibles pour la synthèse de zéolithes ayant une structure similaire à celle des minéraux naturels, ainsi que pour la création de zéolithes qui n'ont pas d'équivalents naturels. Par exemple, la ZSM-5 est une zéolite largement utilisée dans les additifs d'amélioration de l'indice d'octane. Dans le contexte des catalyseurs de craquage catalytique à lit fluidisé, la zéolite de type Y (faujasite) présente un intérêt particulier, avec un rapport silice/alumine d'environ 5.

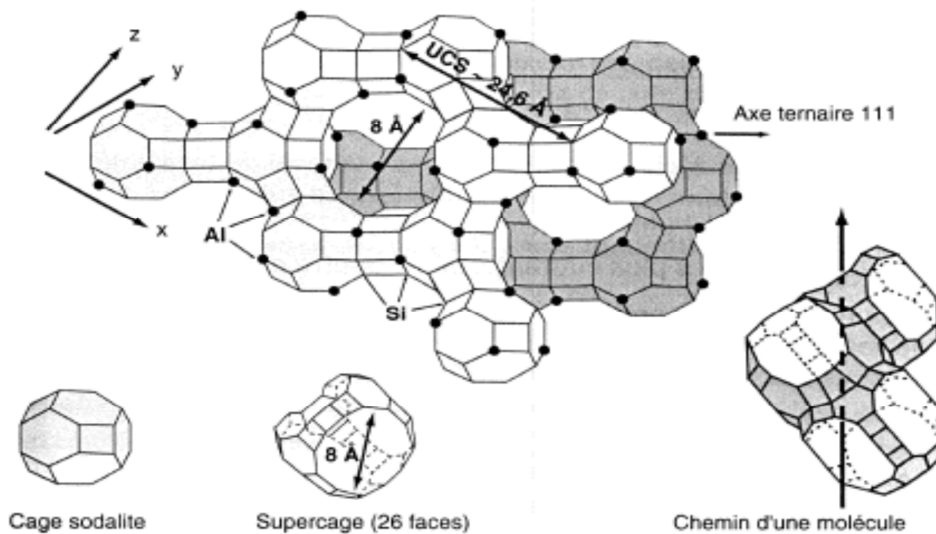


Figure 2 : Structure de la faujasite (zéolithe Y)

La structure de base de la zéolithe est constituée d'atomes d'oxygène, de silicium et d'aluminium, formant un réseau rigide de tétraèdres reliés les uns aux autres en formant des cubo-octaèdres. Certains des atomes de silicium présents dans les tétraèdres de  $\text{SiO}_4$  sont partiellement remplacés par des atomes d'aluminium, tandis que des ions sodium sont présents pour compenser la charge

correspondante. Ainsi, la zéolithe présente une structure chimique complexe où les substitutions d'atomes permettent d'obtenir différentes propriétés et fonctionnalités.

Les ions sodium présents dans la zéolithe sont relativement mobiles et peuvent subir un échange avec des ions  $\text{NH}_4^+$  ou des ions de terres rares ( $\text{RE}^{3+}$ ). Cette capacité d'échange d'ions est cruciale pour les zéolithes utilisées en tant que catalyseurs de craquage, car elle génère des sites actifs pour le processus de craquage.

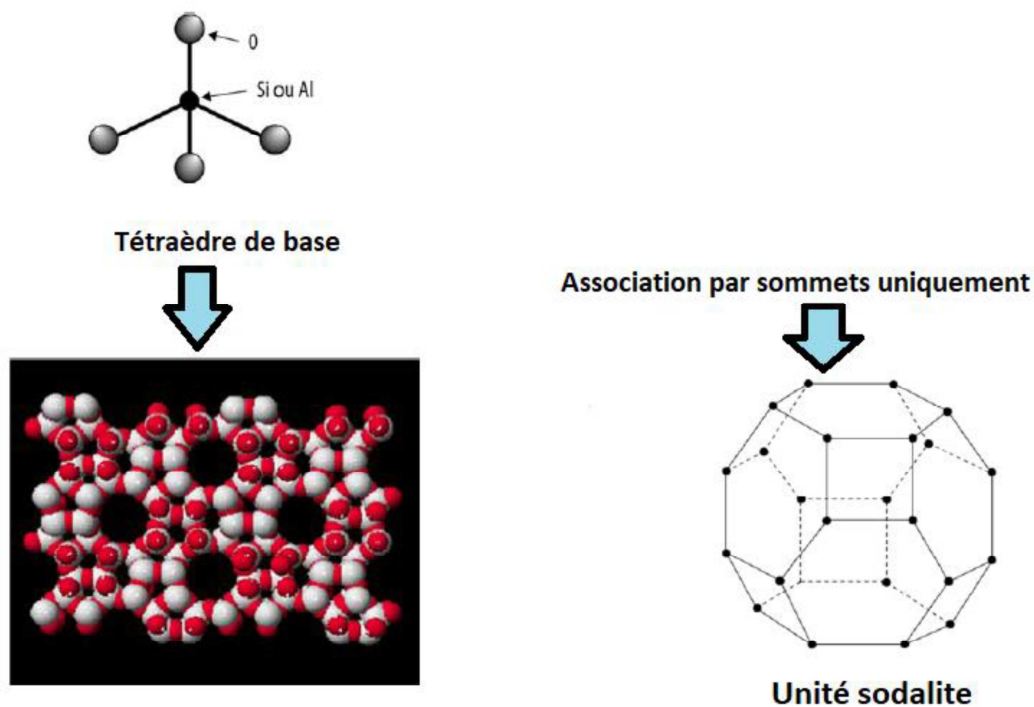


Figure 3 : Construction de la structure zéolithe

Les zéolithes qui ont subi un échange d'ions avec des terres rares (REY et REUSY) sont privilégiées dans les catalyseurs de craquage en raison de leur stabilité et de leurs activités exceptionnelles. Cependant, étant donné que les terres rares améliorent les réactions de transfert d'hydrogène, cela peut entraîner une diminution de l'indice d'octane des produits et de leurs propriétés d'oléfinicité. Au cours des années 1980, les concentrations de terres rares ont été quelque peu réduites, et parallèlement, d'autres techniques ont été développées pour compenser les pertes d'activité et de stabilité des zéolithes.



Les pores de la zéolithe sont relativement étroits, mesurant environ 0,8 nm, ce qui les rend inadaptés aux molécules de taille moyenne présentes dans la charge d'alimentation. Par conséquent, une étape de pré-craquage est nécessaire [7].

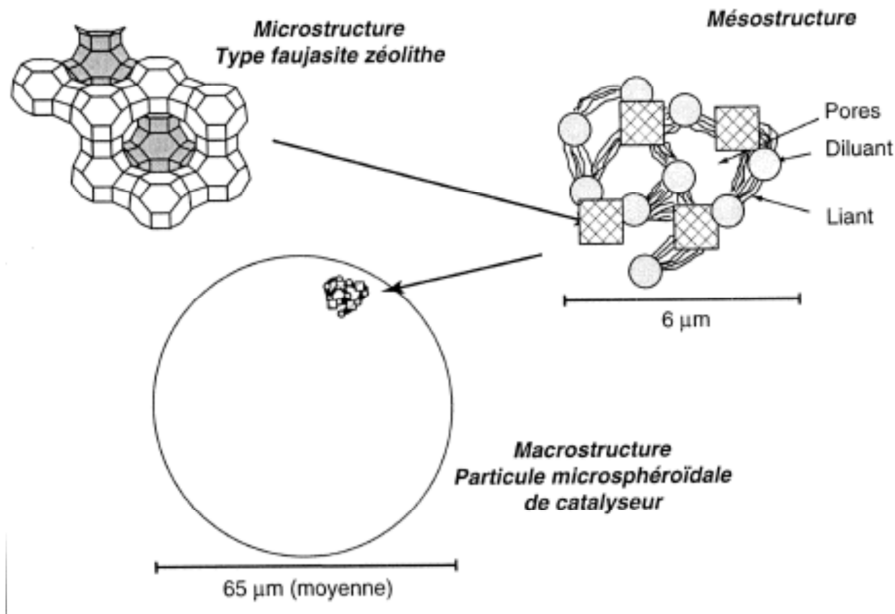


Figure 4 : Le catalyseur de FCC

**Les matrices :** Le terme "matrice" peut revêtir différentes significations. Pour certains, il désigne les composants du catalyseur autres que la zéolithe. Pour d'autres, la matrice est un composant du catalyseur qui possède une activité catalytique distincte de celle de la zéolithe. Et pour d'autres encore, la matrice fait référence au liant utilisé pour agglomérer le catalyseur.

Lorsque la matrice est susceptible de jouer un rôle catalytique essentiel, elle doit tout d'abord assumer différentes fonctions physiques :

- Elle permet de diluer les particules de zéolithe dans des particules de taille et de forme convenables pour la fluidisation ;
- Elle apporte la résistance à l'attrition nécessaire ; elle agit comme transporteur de chaleur entre régénérateur et réacteur ;
- Elle permet (ou interdit) la diffusion des molécules de réactif vers les pores des zéolithes [3].

**Kaolin :** Le kaolin joue un rôle de filtration et n'apporte pas directement d'activité au catalyseur. Le liant confère au catalyseur la résistance nécessaire. Les catalyseurs de FCC actuels, séchés par pulvérisation, sont composés de microbilles qui possèdent d'excellentes propriétés de fluidisation et une résistance élevée à l'usure.

La taille moyenne des particules dans le catalyseur frais est d'environ 65 microns, mais elle peut varier légèrement en fonction de l'efficacité des cyclones utilisés dans le réacteur et la cuve de régénération.

Les performances des catalyseurs de FCC résultent de la concentration et de l'activité catalytique des ingrédients fonctionnels, ainsi que de l'accessibilité au sein des particules du catalyseur. L'activité catalytique est influencée par des facteurs tels que le type de zéolite, la concentration des terres rares, le type de matrice et la stabilité des composants actifs. L'accessibilité dépend non seulement de la matrice et de la zéolite, mais aussi des composants non actifs présents dans le catalyseur [8].

## **Chapitre 3**

### **Désactivation de catalyseur de craquage catalytique**

#### **3.1 Différentes formes de la désactivation des catalyseurs**

##### **3.1.1 Frittage**

Le frittage est un phénomène qui peut se produire lorsque les catalyseurs sont exposés à des températures élevées. À de telles températures, les grains catalytiques peuvent se déplacer et fusionner les uns avec les autres, ce qui entraîne une réduction de la surface spécifique du catalyseur.

Lorsque les grains catalytiques s'agglomèrent, cela peut entraîner des modifications au niveau des pores du catalyseur. Les pores peuvent être partiellement ou complètement obstrués, ce qui limite l'accès des réactifs aux sites actifs du catalyseur. Cela peut conduire à une réduction de l'activité catalytique et de la sélectivité du catalyseur.

Plusieurs facteurs peuvent influencer le phénomène de frittage, notamment la nature du catalyseur, la taille des grains catalytiques, la température de fonctionnement et la composition du mélange réactionnel. Certaines propriétés intrinsèques des catalyseurs les rendent plus susceptibles de subir un frittage par rapport à d'autres [7].

##### **3.1.2 Inhibiteurs**

Les inhibiteurs sont des substances qui peuvent réduire l'activité des catalyseurs en occupant les sites actifs présents à la surface du catalyseur, en concurrence avec les réactifs. Cette occupation peut entraîner une diminution de la surface active disponible pour les réactions catalytiques. Les inhibiteurs ont tendance à être fortement adsorbés sur le métal du catalyseur, mais cette adsorption est généralement réversible. Cela signifie que les inhibiteurs peuvent être éliminés par des techniques de lavage ou de régénération afin de restaurer l'activité catalytique.

- **le carbone sur catalyseurs est un inhibiteur classique**

Il est indéniable que la présence de carbone peut avoir un effet néfaste sur l'efficacité des catalyseurs. Bien que cela n'affecte pas directement l'activité mesurée du catalyseur, cela peut entraîner une diminution de son efficacité réelle, ce qui peut altérer la conversion et les sélectivités. La réduction de la teneur en carbone peut être réalisée en améliorant la distribution de l'air et/ou du catalyseur, ce qui contribue à réduire la formation de dépôts de carbone à la surface du catalyseur. De plus, l'élévation de la température du lit dense peut également faciliter l'élimination des dépôts de carbone, surtout dans les unités qui fonctionnent en mode de combustion partielle.

### **3.1.3 Empoisonnement**

La désactivation catalytique par empoisonnement se produit lorsque des substances chimiques se déposent par adsorption sur les sites actifs, entraînant une diminution de l'activité catalytique. On peut identifier deux types d'empoisonnements :

#### **3.1.3.1 Empoisonnement réversible ou temporaire**

Les poisons temporaires se réfèrent à des substances chimiques qui ont une forte adsorption à la surface du catalyseur, occupant ainsi ses sites actifs et rivalisant avec les réactifs. Cela entraîne une diminution temporaire de l'activité catalytique jusqu'à ce que les poisons soient éliminés par désactivation ou régénération du catalyseur.

Un exemple courant est l'antimoine, qui peut être intentionnellement ajouté au catalyseur en tant que promoteur/inhibiteur pour ajuster son activité. L'adsorption compétitive de l'antimoine sur les sites actifs du nickel réduit la disponibilité de ces sites, entraînant une diminution du rendement en hydrogène. Une quantité d'antimoine équivalente à environ 30 à 50 % de la teneur en nickel semble être suffisante pour atteindre le niveau d'activité désiré. D'autres métaux peuvent également s'adsorber à la surface du catalyseur et influencer ses performances par des mécanismes similaires. Par exemple, le fer et le cuivre, en modifiant l'ensemble des sites actifs, peuvent augmenter la production d'hydrogène, tandis que le calcium et le magnésium, en perturbant la structure du catalyseur, peuvent altérer son activité ou sa stabilité. Cependant, à des concentrations généralement présentes, ces éléments ont un impact limité.

À l'état d'équilibre, le catalyseur peut également contenir de faibles quantités d'oxydes non métalliques provenant du support (comme le kaolin) ou de pièges à métaux, tels que le soufre, le phosphore, le chlore et le titane. Cependant, le constituant prédominant du catalyseur est généralement la silice présente dans le support.

### **3.1.3.2 Empoisonnement permanent ou irréversible**

Les métaux lourds présents dans la charge d'alimentation, tels que le vanadium, le nickel et le sodium, se déposent sur les sites actifs du catalyseur.

### **3.1.3.3 Nickel (Ni)**

Le nickel présent dans la charge est déposé sur le catalyseur à l'équilibre. Le nickel reste généralement immobile lors de la régénération et agit comme un catalyseur de déshydrogénation. Dans le cadre du FCC, le nickel favorise les réactions de craquage non sélectif, en particulier celles qui entraînent une production accrue d'hydrogène et de coke.

### **3.1.3.4 Vanadium (V)**

Le vanadium est introduit dans la charge et se dépose sur le catalyseur à l'équilibre. Lors du processus de régénération, le vanadium peut migrer et pénétrer le catalyseur frais, entraînant ainsi la détérioration de la zéolite. Cela a un impact négatif sur la conversion et l'activité du catalyseur. Pour les catalyseurs conventionnels, on estime qu'une perte de 2 points d'activité du catalyseur se produit pour chaque 1 000 ppm de vanadium, en supposant des conditions d'unité et de consommation de catalyseur constantes. Tout comme le sodium, le taux de désactivation dépend fortement de la température la plus élevée et de la pression de vapeur d'eau dans le régénérateur.

### **3.1.3.5 Sodium (Na)**

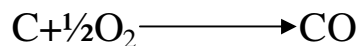
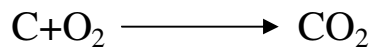
Le catalyseur frais contient de faibles quantités de sodium, généralement de l'ordre de 0,1 à 0,4 % en poids. Le sodium peut également être introduit par la charge, en particulier lors du traitement de résidus. Lorsque des taux élevés de sodium sont présents sur le catalyseur à l'équilibre, il est important de vérifier la qualité de la charge. Dans la plupart des cas, des problèmes au niveau des dessaleurs de brut ou le traitement de charges contaminées par l'eau de mer sont à l'origine de ces niveaux élevés de sodium.

Le sodium agit comme un poison pour le catalyseur en neutralisant les sites acides et en endommageant la zéolithe. Chaque pourcentage en poids de sodium provenant de la charge FCC entraîne une perte d'environ 6 points d'activité MAT du catalyseur. À des taux élevés de sodium, le catalyseur devient plus vulnérable aux hautes températures, ce qui entraîne une augmentation du frittage et de la détérioration de la surface. Il est essentiel de maintenir la teneur en sodium de la charge en dessous de 2 ppm en poids pour éviter ces effets indésirables [9].

### 3.2 Régénération de catalyseurs

La régénération des catalyseurs est nécessaire lorsque leurs performances diminuent au point où leur utilisation n'est plus économique. L'objectif de la régénération est de restaurer l'activité et la stabilité du catalyseur. Dans le processus de craquage catalytique à lit fixe, la durée d'un cycle réaction-régénération est généralement de 30 minutes. Cependant, lorsque le catalyseur est désactivé de manière irréversible, par exemple en raison de la déposition de métaux lourds ou de soufre sur les sites actifs, sa régénération devient impossible. Dans de tels cas, il est nécessaire de remplacer le catalyseur usagé par une nouvelle masse catalytique et de procéder à des traitements de la charge en amont du catalyseur.

La régénération se réfère au processus de restauration de l'activité du catalyseur lorsqu'il est désactivé de manière réversible, comme c'est le cas avec la déposition de coke sur les sites actifs. Le coke est ensuite éliminé du catalyseur par combustion ou oxydation, où il se transforme en CO<sub>2</sub> ou CO selon les réactions suivantes :



Lorsque tout le coke formé est brûlé, le catalyseur devient actif de nouveau [10].

## **3.3 Gestion du catalyseur frais et usé a l'unité de craquage catalytique**

### **3.3.1 Catalyseur frais**

Chaque jour, une quantité de catalyseur frais est ajoutée pour maintenir le niveau optimal de catalyseur dans la boucle du réacteur/régénérateur. Ce catalyseur frais compense les pertes continues de catalyseur entraînées par les gaz de combustion et les effluents gazeux évacués par le réacteur. Pour une période de fonctionnement de 2 mois dans des conditions de conception, UOP a estimé une consommation de catalyseur frais d'environ 90 m<sup>3</sup>.

### **3.3.2 Catalyseur à l'équilibre**

Le catalyseur récupéré de l'unité RFCC, également appelé catalyseur à l'équilibre (Cat-e), peut être réutilisé ou éliminé en tant que catalyseur usagé. Lors du démarrage de l'unité, il est envisagé d'utiliser le catalyseur à l'équilibre pour constituer la réserve de la boucle réacteur/régénérateur. Cela est dû au fait que l'activité du catalyseur frais est trop élevée pour être utilisée comme réserve complète de la boucle réacteur/régénérateur. Par conséquent, UOP a demandé une réserve de 329 tonnes de catalyseur à l'équilibre pour le démarrage initial de l'unité RFCC.

### **3.3.3 Catalyseur à l'équilibre réutilisable**

Un catalyseur à l'équilibre de haute qualité peut être réemployé dans l'unité RFCC à différentes fins, telles que le catalyseur de démarrage, la compensation des pertes ou le catalyseur de rinçage.

Les caractéristiques générales d'un tel catalyseur sont les suivantes :

- ◆ La nécessité d'un catalyseur non activé.
- ◆ Une teneur totale maximale en métaux (Ni + V) de 3 000 et 5 000 ppm.
- ◆ Un niveau d'activité supérieur d'environ 67% en poids MAT.
- ◆ Une granulométrie moyenne d'environ 70 microns.
- ◆ Une teneur en particules fines de moins de 40 microns : plus de 10%.
- ◆ Surface : plus de 125 m<sup>2</sup>/g.
- ◆ CRC : moins de 0,1% en poids.
- ◆ Teneur en terres rares : inférieure à 1% en poids.

La valeur de Cat-e réutilisable dépend de la demande du marché.

Une analyse représentative du catalyseur de craquage fluide à l'équilibre sera soumise à UOP pour approbation avant l'achat, au moins six mois avant le démarrage de l'unité.

### **3.3.4 Élimination du catalyseur à l'équilibre**

Si la teneur en métaux (Ni+V) du catalyseur à l'équilibre dépasse 15 000 ppm, il est généralement considéré comme un catalyseur usé et ne convient plus à une utilisation dans une exploitation RFCC à faible teneur en métaux. Par conséquent, il sera nécessaire de l'éliminer de manière respectueuse de l'environnement.

### **3.3.5 Particules de catalyseur FCC**

Les particules de catalyseur FCC ont généralement peu d'applications pour une réutilisation dans l'unité FCC et doivent donc être éliminées en tant que catalyseur usé. Cependant, certaines de ces particules fines peuvent être utilisées pour améliorer l'écoulement dans les unités présentant des problèmes de circulation [9].

## **3.4 Méthodes de caractérisation des espèces désactivantes**

Le tableau ci-dessous répertorie les principales techniques de caractérisation utilisées et les informations obtenues. Ces techniques permettent généralement d'accéder à la quantité et/ou à la nature des espèces responsables de la désactivation des catalyseurs, parfois à leur impact sur les sites actifs, mais rarement à leur composition. Le texte suivant se concentre sur la caractérisation des dépôts responsables de la désactivation des catalyseurs, en particulier du coke [11].



Tableau 3 : Principales techniques utilisées pour la caractérisation des espèces désactivantes

<b>Techniques</b>	<b>Caractérisation</b>
<b>Analyse élémentaire</b>	Teneur C, H, S, N, etc., H/C
<b>Adsorption atomique, Fluorescence X, ICP, PIXE</b>	Teneur en hétéroéléments (alcalins, métaux, halogénures, etc.)
<b>ATG + (GC, SM)</b>	Produits de décomposition du coke en fonction de la température
<b>TPO</b>	Composition (H/C, etc.)
<b>Micro gravimétrie en fonction du temps</b>	Cinétique de cokage
<b>TEOM</b>	Cinétique de cokage et de désactivation ( <i>operando</i> )
<b>IRTF, DRIFTS, Raman</b>	Nature du coke (aliphatique, aromatique, etc.) Effet sur les sites actifs (pour les zéolithes acides)
<b>UV-VIS</b>	Nature du coke (oléfinique, carbocations)
<b>RMN</b>	Nature, localisation du coke
<b>EPR</b>	Nature du coke Formation de radicaux
<b>DRX</b>	Nature, localisation du coke Dégradations structurales, etc.
<b>TEM</b>	Localisation du coke Taille des particules Dégradations structurales
<b>XPS</b>	Localisation du coke (surface) Degré d'oxydation des métaux
<b>Dissolution du catalyseur + extraction par solvant + analyse par couplage GC-MS ou MALDI-TOF-MS</b>	Composition du coke

## Conclusion

La durée de vie des catalyseurs industriels, qu'ils soient solubles ou solides, dépend fortement des caractéristiques spécifiques du procédé. Cela inclut la nature et la pureté des réactifs, les conditions opératoires, ainsi que le choix du catalyseur et du réacteur utilisés. Par exemple, dans le cas du craquage catalytique fluidisé (FCC) qui est un procédé clé dans les raffineries pour la conversion de charges lourdes en essence, les catalyseurs peuvent se désactiver en quelques secondes seulement. Cette désactivation rapide s'explique par la complexité et la lourdeur des charges traitées, qui comprennent divers réactifs et impuretés, ainsi que par les conditions opératoires rigoureuses qui sont appliquées.

La désactivation des catalyseurs peut avoir différentes causes, allant de l'empoisonnement et la contamination à l'usure physique et chimique. Il est crucial de comprendre en détail les mécanismes de désactivation des catalyseurs afin d'améliorer leur durée de vie et d'optimiser les processus catalytiques. L'empoisonnement des catalyseurs se produit lorsque des substances indésirables s'adsorbent sur les sites actifs du catalyseur, réduisant ainsi son activité catalytique. Ces substances peuvent provenir de la charge d'alimentation, des réactifs ou des impuretés présentes dans le système. Par exemple, des métaux lourds ou des composés soufrés peuvent agir comme des poisons pour les catalyseurs, entravant leur fonctionnement.

La contamination peut également entraîner la désactivation des catalyseurs. Des particules solides indésirables, telles que des résidus de charbon ou des matières inorganiques, peuvent s'accumuler sur la surface du catalyseur, obstruant ainsi les sites actifs et limitant son efficacité. En outre, l'usure physique et chimique peut se produire au fil du temps en raison des conditions opératoires sévères, telles que les hautes températures, les pressions élevées ou les réactions agressives. Cela peut entraîner des modifications structurelles du catalyseur, une réduction de la surface active ou une détérioration de sa stabilité chimique. Une connaissance approfondie de ces mécanismes de désactivation permet de développer des stratégies pour atténuer leurs effets et prolonger la durée de vie des catalyseurs. Cela peut inclure des techniques de régénération, des traitements de la

charge d'alimentation pour réduire les impuretés ou des modifications de la formulation du catalyseur pour améliorer sa résistance à la désactivation. En optimisant la durée de vie des catalyseurs, il est possible d'atteindre une meilleure efficacité des processus catalytiques, ce qui se traduit par des avantages économiques et environnementaux significatifs.

Il est essentiel de considérer les facteurs responsables de la désactivation des catalyseurs lors de leur conception et de leur utilisation. De plus, il est possible d'explorer les méthodes de régénération des catalyseurs pour prolonger leur durée de vie et réduire les coûts de remplacement.

Finalement, la désactivation des catalyseurs représente un défi à relever dans les processus catalytiques. Cependant, en acquérant une compréhension approfondie de ce phénomène, il devient possible d'optimiser leur utilisation et de tirer le meilleur parti de leur efficacité.

## Bibliographie

- [1] A. SOUFIA and A. A. HAMMADI, "SYNTHESE DES CATALYSEURS BIFONCTIONNELS A BASE DE ZEOLITHE," Université KASDI-MERBAH Ouargla.
- [2] H. Knözinger and K. Kochloefl, "Heterogeneous catalysis and solid catalysts," *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000.
- [3] Hamdoun, "Valorisation Des Fractions Lourdes Par Craquage Catalytique Sur Des Catalyseurs Naturels (bentonite) Et Zéolithiques [Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara - Boumerdes]." 2013.
- [4] G. Winé, "Synthèse de zéolithe BETA sur du  $\beta$ -SiC et dans des nanotubes de carbone: Application à la réaction d'acylation de Friedel-Crafts," Strasbourg 1, 2004.
- [5] L. L. Guarieiro, M. J. Rezende, N. M. Ribeiro, E. A. Torres, W. A. Lopes, P. A. d. P. Pereira, J. B. de Andrade, E. Lotero, Y. Liu, and D. Lopez, "Per Stoltze; Introduction to heterogeneous catalysis; Department of Chemistry and Applied Engineering Science; Aalborg University Introduction\_to\_Heterogeneous\_Catalysis (2)," *PDF-Acesso em*, vol. 10.
- [6] D. Decroocq, *Le craquage catalytique des coupes lourdes*: Editions TECHNIP, 1978.
- [7] BELOUADI.L and MECIOURI.I, "Étude De L'influence Des Paramètres Opératoires Du Procédé De Craquage Catalytique A Lit Fluidisé De La Raffinerie D'Alger."
- [8] "Manuel opératoire de la raffinerie d'Alger unité de craquage catalytique.."
- [9] "Manuel opératoire de la raffinerie d'Alger unité de craquage catalytique."
- [10] S. Otmani. (2006). *Valorisation Des Charges Lourdes Compoundées Par Le Craquage Catalytique [Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara - Boumerdes]*.
- [11] M. Guisnet and L. Pinard, "Catalyse hétérogène : désactivation et régénération des catalyseurs," *Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique*, 2014.

