

Extrait de la publication

LES ZÉOLITHES

UN NANOMONDE AU SERVICE DE LA CATALYSE

Michel Guisnet et
Fernando Ramôa Ribeiro


EDP
SCIENCES

chimie | matériaux

LES ZÉOLITHES, UN NANOMONDE AU SERVICE DE LA CATALYSE

Michel Guisnet et Fernando Ramôa Ribeiro



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustration de couverture : © droits réservés.

ISBN : 2-86883-826-X

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

À ma femme, mes enfants et petits-enfants,

Au Professeur Raymond Maurel et à Denise Barthomeuf, Directeur de recherche CNRS qui m'ont inoculé leur passion pour la Catalyse et pour les Zéolithes,

M. G.

À ma sœur, nièce et neveu et à mon collègue et ami, José Luis Figueiredo,

À Christian Marcilly, Directeur de recherche à l'Institut Français du Pétrole qui a guidé mes premiers pas en recherche et au Professeur Éric Derouane pour son soutien constant,

F.R. R.

À tous nos collaborateurs et élèves qui, par leur enthousiasme et leur dynamisme ont joué un rôle clé dans la conception de ce livre,

À tous les chercheurs industriels et universitaires de nombreux pays avec qui nous avons coopéré pour leurs suggestions et leurs critiques,

Un remerciement particulier à ceux qui ont contribué avec dextérité à la préparation matérielle du manuscrit, et spécialement à Joao Pedro Marques, Hugo Vale, Maryvonne Choumil, Philippe Ayrault et Sébastien Laforge ainsi qu'à notre collègue et ami Jacques Védrine qui a accepté de préfacer ce livre.

M. G ; F.R. R.

Préface

Les zéolithes sont des matériaux qui ont fasciné les hommes dès leur découverte par A.F. Crönsted (*zeo-lithos* ou la pierre qui bout) en Suède en 1756. Il s'agissait alors de la stilbite, un alumino-silicate hydraté. Pendant plus de deux cents ans, les zéolithes furent des minéraux de collection des musées d'histoire naturelle avec de beaux cristaux naturels. La synthèse artificielle de tels minéraux s'est développée dès les années 1950 pour leurs propriétés d'adsorption spécifique, de catalyse et d'échange ionique (détergents). Actuellement plus de 130 zéolithes ont été synthétisées contre une quarantaine trouvée dans la nature.

C'est dans le domaine de la catalyse hétérogène que les innovations et la créativité des chercheurs ont été les plus spectaculaires. Pour beaucoup de chercheurs, la catalyse hétérogène reste une science mystérieuse et les découvertes aléatoires, pour ne pas dire fortuites. Les différents concepts qui ont pu être proposés sont rarement généraux ou applicables *a priori*. Il est largement reconnu que les catalyseurs hétérogènes les plus actifs sont des solides mal cristallisés, parfois même amorphes, souvent fort complexes et constitués de plusieurs phases ou composés minéraux, ce qui rend la description du site actif et du cycle catalytique pratiquement impossible. Par contre, le cas des zéolithes, composés bien cristallisés et à structure stable, est apparu « digne d'intérêt » en recherche fondamentale, car des concepts simples (tamisage moléculaire, sélectivité de forme, catalyse supramoléculaire, etc.) d'action et de réaction catalytique peuvent être imaginés. C'est pourquoi on a assisté, dès les années 70, à un engouement des chercheurs pour ce domaine de recherche qui a même provoqué quelques conflits avec les autorités universitaires qui considéraient ces travaux comme un simple cadeau à la recherche industrielle.

Le succès de ces matériaux en adsorption et surtout dans de nombreux procédés catalytiques essentiels (craquage ou FCC, transformation du méthanol en essence ou MTG, etc.) ont donné lieu à des brevets et publications innombrables et à de nombreux livres. Le présent livre, écrit par deux experts en catalyse hétérogène sur zéolithes, en est un exemple frappant. C'est aussi un des rares livres actuels en langue française à l'usage d'un public varié depuis des étudiants français

ou francophones jusqu'aux chercheurs des secteurs publics et industriels. Il présente de grands avantages :

- Il constitue une synthèse moderne des connaissances actuelles dans le domaine des zéolithes. Il comprend 14 chapitres dans lesquels tous les principaux aspects et caractéristiques de ces matériaux sont exposés, de façon simplifiée le plus souvent mais exhaustive. Il s'agit de la structure, de la synthèse de matériaux zéolithiques, de leur caractérisation par des techniques variées et surtout de leurs nombreuses propriétés catalytiques tant pour les procédés industriels que pour les mécanismes réactionnels mis en jeu...
- Ce livre est très bien documenté, au fait des derniers développements en catalyse sans omettre les développements plus anciens. Les tamis moléculaires mésoporeux, qui n'ont pas reçu d'application industrielle à ce jour ne sont pas abordés volontairement. Le livre présente également tous les aspects, souvent occultés, de la désactivation des catalyseurs zéolithiques par le coke et de leur régénération...

C'est un excellent livre que l'on peut fortement conseiller aux chercheurs débutants mais également aux chercheurs confirmés, universitaires ou industriels du domaine. Il n'a pas l'ambition de se substituer aux livres spécialisés sur des aspects particuliers de ces solides mais il se veut simple et généraliste. Trois annexes apportent des compléments généraux importants en catalyse hétérogène et sur les réacteurs. Elles sont de grande utilité en rappelant des grands principes que les chercheurs ont souvent tendance à oublier.

Je suis particulièrement heureux de cette initiative de mes collègues et je tiens à leur exprimer toutes mes félicitations et mon admiration pour ce travail exhaustif et d'excellente qualité.

Professeur Jacques C. VEDRINE, Directeur de Recherche CNRS Émérite
Éditeur *Applied Catalysis A: General*
Laboratoire de Physico-Chimie des Surfaces
École Nationale Supérieure de Chimie de Paris, ENSCP

Préface	v
Introduction	xv

Chapitre 1 : Les zéolithes : de la synthèse aux applications

1. Histoire des zéolithes	1
2. Structure poreuse et sites actifs des zéolithes	5
2.1. <i>Structure poreuse [15]</i>	5
2.2. <i>Sites actifs</i>	6
2.2.1. <i>Catalyse acide sur zéolithes. Sites actifs</i>	6
2.2.2. <i>Catalyse d'oxydoréduction sur zéolithes</i>	14
2.2.3. <i>Catalyse bifonctionnelle sur zéolithes</i>	15
3. Les zéolithes, des catalyseurs intelligents à la base d'une chimie verte ..	15
4. Conclusions	20

Références

Chapitre 2 : Synthèse et modification des zéolithes

1. Synthèse hydrothermale des zéolithes	23
1.1. <i>Étapes clés</i>	23
1.2. <i>Supersaturation de la solution</i>	24
1.3. <i>Nucléation</i>	25

Extrait de la publication

1.4. Croissance des cristaux	26
1.5. Paramètres déterminant la zéolithisation	26
2. Traitements post-synthèse	27
2.1. Échange d'ions [6]	27
2.2. Désalumination	29
2.2.1. Désalumination par des agents non siliciques	29
2.2.2. Désalumination par des agents siliciques	35

Références

Chapitre 3 : Caractérisation des catalyseurs zéolithiques

1. Structure zéolithique	39
2. Composition globale et composition de la maille élémentaire	41
2.1. Composition chimique	41
2.2. Composition de la maille élémentaire	42
2.2.1. Détermination du rapport Si/Al de charpente	42
2.2.2. Formule de la maille élémentaire	47
3. Taille et forme des cristallites	48
4. Propriétés d'adsorption	48
5. Sites d'adsorption	51
5.1. Détermination quantitative des concentrations en sites de Brønsted et de Lewis	52
5.2. Force des sites acides de Lewis et de Brønsted	54
5.3. Catalyseurs bifonctionnels Pt/zéolithe. Dispersion du platine	56
6. Conclusions	57

Références

Chapitre 4 : Transformation d'hydrocarbures par catalyse acide sur zéolithes

1. Introduction	61
2. Sites acides et activité catalytique	62
3. Mécanismes de réaction	62
3.1. Généralités	62
3.2. Isomérisation squelettale et craquage d'alcènes	64

3.3. Réarrangement et craquage d'alcane	66
3.4. Isomérisation, transalkylation et alkylation des hydrocarbures aromatiques [16]	69
4. Conclusions	72

Références

Chapitre 5 : Sélectivité de forme en catalyse

1. Introduction	75
2. Sélectivité de forme par tamisage moléculaire	76
2.1. Tamisage des molécules de réactif	76
2.2. Tamisage des molécules de produits	78
2.3. Paramètres déterminant la sélectivité par tamisage moléculaire	79
3. Sélectivité liée à la taille des états de transition	80
4. Effet de concentration ou de confinement des molécules dans les micropores	82
5. Autres types de sélectivité de forme	83
6. Catalyse en bouche de pores et sélectivité de forme	84
7. Conclusions	86

Références

Chapitre 6 : Formation de « coke », désactivation et régénération des zéolithes acides

1. Introduction	89
2. Zéolithes, catalyseurs modèles pour l'étude de la désactivation par le « coke »	90
3. Modes de formation du « coke »	92
3.1. Généralités	92
3.2. Influence des conditions opératoires et des caractéristiques des zéolithes	92
3.2.1. Formation de « coke » à basse température	93
3.2.2. Formation de coke à haute température	95
4. Modes de désactivation	99
4.1. Généralités	99
4.2. Effet désactivant des molécules de « coke »	99
4.3. Modes de désactivation	100
5. Régénération : élimination du « coke »	101

6. Le « coke » a-t-il toujours un effet nocif?	103
7. Conclusion	104

Références

Chapitre 7 : Le craquage catalytique (FCC), unité clé des raffineries

1. L'unité de craquage catalytique (FCC) : un système autothermique, complexe mais flexible	111
1.1. Réacteur	111
1.2. Séparation des produits	111
1.3. Régénération	113
1.4. L'équilibre thermique du FCC, base de son fonctionnement	113
1.5. Soutirage et ajout de catalyseur	114
1.6. Influence de la nature de la charge sur les produits formés	114
2. Les catalyseurs de FCC – des formulations en évolution permanente ...	115
2.1. Zéolithe FAU (Y)	116
2.2. Matrice	117
2.3. Les additifs – Vers plus d'octane et moins de rejets polluants	118
2.3.1. Amélioration de l'indice d'octane	118
2.3.2. Oxydation totale de CO	118
2.3.3. Réduction des émissions de SO _x	119
2.3.4. Passivation du nickel et du vanadium	119
3. La chimie du craquage : un nombre incalculable d'étapes interconnectées	119
3.1. Formation des carbocations	120
3.2. Coupure des liaisons C–C	121
3.3. Transfert d'hydrogène	122
3.4. Formation de coke	124
4. Conclusion	125

Références

Chapitre 8 : Conversion du méthanol en hydrocarbures

1. Schéma réactionnel	129
2. Mécanismes des principales étapes réactionnelles	132

2.1. Mécanismes de formation de la première liaison carbone-carbone	134
2.1.1. Mécanismes par intermédiaires carbènes	134
2.1.2. Mécanismes par intermédiaires carbocations	135
2.1.3. Mécanismes radicalaires	136
2.1.4. Mécanismes par ylures d'oxonium	136
2.2. Premier alcène formé	137
2.3. Effet autocatalytique	137
3. Désactivation des catalyseurs	139
4. Les procédés commerciaux	140
5. Conclusion	141

Références

Chapitre 9 : Catalyse bifonctionnelle : applications en hydro-isomérisation et hydrocraquage

1. Introduction	145
2. La catalyse bifonctionnelle	146
2.1. Mécanisme bifonctionnel	146
2.2. Influence des caractéristiques des catalyseurs bifonctionnels sur leur activité, sélectivité et stabilité	150
2.2.1. Influence de la « balance » entre les deux fonctions du catalyseur	150
2.2.2. Influence de la structure poreuse des zéolithes	155
3. L'hydro-isomérisation des alcanes	157
3.1. Hydro-isomérisation des n-alcanes C ₅ -C ₆	157
3.2. Hydro-isomérisation d'alcanes C ₇	159
4. Hydrocraquage	160
4.1. Configuration des procédés	161
4.1.1. Procédé deux étapes	161
4.1.2. Procédé en série (ou procédé une étape)	161
4.2. Influence des conditions opératoires sur l'hydrocraquage (réacteur 2)	163
4.3. Choix des catalyseurs	163
5. Conclusion	164

Références

Chapitre 10 : Nouveaux modes d'activation des hydrocarbures C₂-C₄ sur catalyseurs zéolithiques

1. Activation des alcanes légers sur zéolithes protoniques :
mécanisme « superacide » 168
2. Aromatisation des alcanes légers sur les catalyseurs Ga/MFI.
Un nouveau type de catalyse bifonctionnelle redox-acide ? 172
3. Isomérisation squelettale des butènes sur HFER :
un nouveau mécanisme d'isomérisation ? 174
4. Conclusions 180

Références

Chapitre 11 : Procédés sélectifs et propres de production d'alkylaromatiques sur zéolithes

1. Production du paraxylène, choix et adaptation du catalyseur zéolithique 186
 - 1.1. Procédés industriels 186
 - 1.2. Mécanisme réactionnel, une question de porosité 187
 - 1.2.1. Isomérisation des xylènes 187
 - 1.2.2. Transméthylation des méthylbenzènes 189
 - 1.2.3. Transformations de l'éthylbenzène 191
2. Alkylation des aromatiques. Vers des procédés plus propres 193
 - 2.1. Procédés industriels 193
 - 2.2. Mécanisme réactionnel, une question de porosité 195
3. Conclusion 198

Références

Chapitre 12 : Catalyse d'oxydation sur zéolithes et tamis moléculaires apparentés

1. Les titanosilicates microporeux. Préparation, caractérisation et applications catalytiques 201
 - 1.1. Synthèse de TS-1 Extrait de la publication 202

1.2. Structure du titane de la charpente de TS-1	203
1.2.1. Méthodes indirectes : effet du Ti en position tétraédrique sur la charpente	203
1.2.2. Méthodes directes de détermination de l'état de coordination du titane	205
1.3. Interaction du titane de charpente avec diverses molécules (eau, H ₂ O ₂ , solvants)	206
1.4. Applications catalytiques	207
1.4.1. Hydroxylation du phénol par l'eau oxygénée	207
1.4.2. Ammoximation de la cyclohexanone	208
1.5. Origine des propriétés catalytiques remarquables de TS-1 en oxydation par H ₂ O ₂	209
2. Catalyseurs Fe/MFI pour l'hydroxylation directe du benzène en phénol par N ₂ O	210

Références

Chapitre 13 : Catalyse basique sur zéolites

1. Composition et propriétés basiques des zéolites	216
2. Réactions catalytiques sur zéolites basiques	219
2.1. Intermédiaires réactionnels [20]	219
2.2. Alkylation du toluène par le méthanol	220
2.3. Condensation aldolique	221
2.4. Transformation du dichlorométhane sur des faujasites alcalines	222
3. Conclusions	227

Références

Chapitre 14 : Chimie fine : synthèse organique par catalyse acide et par catalyse bifonctionnelle

1. Acétylation de composés aromatiques	232
1.1. Acétylation de l'anisole par l'anhydride acétique sur une zéolithe HBEA	233
1.2. Acétylation du méthoxy-2 naphthalène (2MN) par l'anhydride acétique (AA)	235

Extrait de la publication

2. Transformation multistade en une seule étape apparente par catalyse bifonctionnelle	238
3. Conclusions	240

Références

Annexes

A.1. La catalyse hétérogène

A.2. Les réacteurs catalytiques

1. Choix du type d'écoulement	247
2. Thermicité de la réaction et choix du réacteur	248
3. Mesure de l'activité en réacteur isotherme à lit fixe	249

A.3. Caractéristiques essentielles des carburants automobiles : indice d'octane et indice de cétane

1. Indice d'octane	251
2. Indice de cétane	253

Index	255
-------------	-----

Crédits	257
---------------	-----

Introduction

Les zéolithes, un nanomonde au service de la catalyse ...

... Au service de l'homme

Ce livre constitue une introduction aux matériaux à la fois fascinants et utiles au quotidien que sont les zéolithes.

Les propriétés remarquables de ces solides microporeux parfaitement cristallisés sont mises à profit dans des domaines nombreux et variés allant :

- de la détergence (ex. composant des lessives pour l'adoucissement de l'eau par **échange** des cations calcium et magnésium) ;
- au séchage du gaz naturel, etc., de l'air (ex. doubles vitrages), à la purification, à la séparation économique d'isomères (ex. tamisage moléculaire des n- et iso-alcanes), de l'oxygène de l'air, etc. par **adsorption** ;
- à la **catalyse** de nombreuses réactions, etc.

Si la première application consomme la plus grande quantité de zéolithes (70 %), c'est la dernière qui est, et de beaucoup, la plus importante en valeur ajoutée. En effet, les zéolithes sont devenues en un demi-siècle les catalyseurs les plus employés en **raffinage du pétrole**. C'est ainsi qu'il existe un procédé utilisant un catalyseur zéolithique pour la transformation de chacune des coupes pétrolières, des gaz aux résidus de distillation sous vide. Les zéolithes sont aussi très employées en **pétrochimie** permettant notamment la production des aromatiques essentiels pour l'industrie chimique : benzène, paraxylène, alkylbenzènes (éthylbenzène, cumène) et celle d'éthylène et de propène à partir du méthanol (Figure 1). Qui plus est, elles prennent peu à peu une place de choix en catalyse de **dépollution** et en **chimie fine**.

Quelles sont les raisons d'un tel succès ?

La première raison vient à coup sûr de leur structure poreuse dans laquelle sont situés la plupart des centres catalytiquement actifs et où se produisent donc les réactions. Les cages et les canaux qui la constituent, de tailles très proches des molécules organiques, peuvent être considérés comme des **nanoréacteurs**. Dans ces nanoréacteurs, la vitesse, la stabilité et la sélectivité des transformations

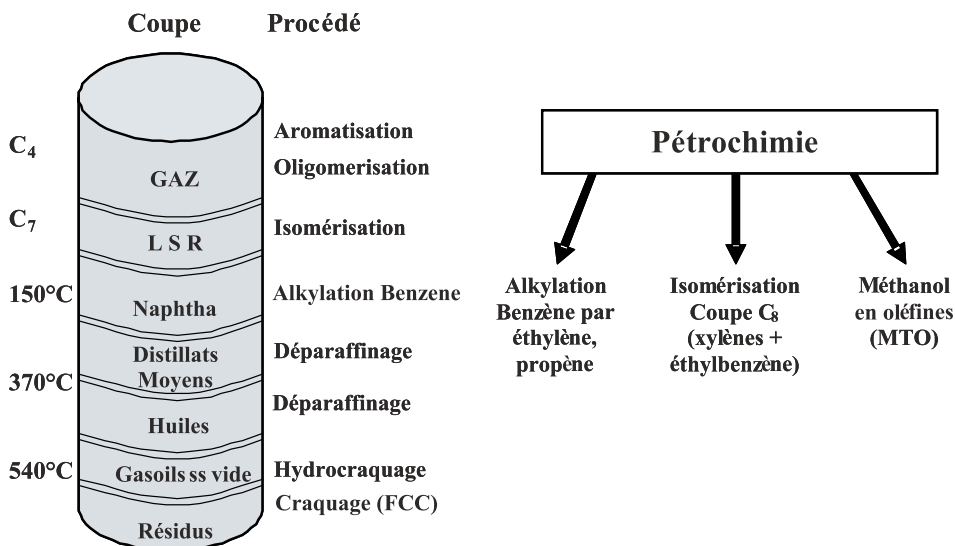


FIG. 1 – Procédés de raffinage et de la pétrochimie utilisant des catalyseurs zéolithiques.

catalytiques sont non seulement déterminées par les caractéristiques des centres actifs comme c'est le cas pour tous les catalyseurs, mais aussi par la taille et la forme des nanoréacteurs (cages, canaux) et de leurs ouvertures. On parle de **sélectivité de forme**. Une approche scientifique s'appuyant sur des concepts simples (**tamissage moléculaire**, **confinement**, etc.) et sur des méthodes de synthèse et de modification des zéolithes maintenant bien maîtrisées permet de concevoir et préparer le catalyseur actif, stable et sélectif pour la transformation ou la production désirée.

La seconde raison est liée à la grande **adaptabilité** des centres actifs des zéolithes qui permet leur utilisation aussi bien en catalyse acide qu'en catalyse basique, en catalyse redox ou en catalyse bifonctionnelle (ex. métal-acide).

La troisième est non moins importante puisqu'elle concerne la protection de l'environnement. Les zéolithes sont à la base de **procédés propres, économes en atomes et en énergie**. Non seulement les réactions sont plus sélectives ce qui augmente la rentabilité économique et diminue les rejets polluants liés aux étapes de séparation, mais l'introduction des zéolithes dans le domaine essentiel de la catalyse acide industrielle limite les problèmes de corrosion et diminue considérablement les rejets polluants liés à l'utilisation des solutions acides. Notons enfin que les nombreuses études réalisées sur les zéolithes utilisées industriellement démontrent qu'elles ne présentent aucun danger pour **la santé**.

Mais, qui connaît les zéolithes ?

On pourrait croire que les propriétés remarquables des zéolithes et le rôle essentiel qu'elles jouent dans la vie de l'homme en lui procurant combustibles et carburants de qualité, de nombreux précurseurs de polymères et médicaments, etc., leur assureraient une reconnaissance universelle. Il n'en est rien. Les zéolithes sont des **vedettes méconnues** de l'homme de la rue ce que l'on peut comprendre, mais aussi des lycéens et étudiants même s'ils se sont engagés dans des études de chimie.

Essayer de réparer cet oubli incompréhensible est un des objectifs de ce livre. Nous sommes certains que les lecteurs partageront avec nous l'opinion émise il y a plus de trente ans par Donald W. Breck (*Zeolite Molecular Sieves*, Wiley, 1974), un des grands pionniers du domaine des zéolithes :

« Rarement dans notre société technologique la découverte d'une nouvelle famille de matériaux minéraux n'a suscité un aussi large intérêt scientifique et un tel développement kaléidoscopique des applications que ce qui s'est produit avec les tamis moléculaires zéolithiques. »

Cette affirmation reste toujours actuelle. Bien que la science des zéolithes ait maintenant atteint sa maturité, l'intérêt scientifique est toujours aussi grand, les applications plus diverses et plus nombreuses.

Notre expérience des zéolithes s'appuie sur plus de 30 ans de travaux de recherche. Cette aventure vécue avec une cinquantaine de jeunes chercheurs préparant leur doctorat (dont une quinzaine sous notre codirection) s'est révélée chaque jour plus passionnante. Notre souhait le plus vif est de communiquer au lecteur notre passion pour ces matériaux, très beaux à l'échelle microscopique et au mode de fonctionnement facile à saisir et à adapter aux applications souhaitées. Ceci explique l'intérêt industriel stratégique de ce domaine et pourquoi notre recherche était généralement menée en coopération avec des sociétés industrielles : Institut Français du Pétrole, Elf, Total, Galp, CUF, Statoil, Exxon, Rhodia, etc.

Spécialistes de catalyse, nous nous sommes naturellement limités à décrire les propriétés catalytiques des zéolithes et leurs applications en raffinage, pétrochimie et chimie fine (Chapitres 4 à 14), les trois premiers chapitres présentant leur système poreux, leur préparation et leur caractérisation.

Ce livre, destiné aux élèves des Écoles d'ingénieur et de leurs classes préparatoires et aux étudiants de Master et de Doctorat, devrait aussi intéresser les chercheurs universitaires et industriels utilisant des catalyseurs zéolithiques. Il comprend 14 chapitres présentant d'un point de vue fondamental et d'un point de vue appliqué les matériaux zéolithiques et les réactions qu'ils catalysent. Le lecteur pourra consulter en annexe des documents rappelant de façon succincte les notions de base sur la catalyse hétérogène, les réacteurs utilisés industriellement et au laboratoire, etc.

A

acétylation, 232
acétylation de l'anisole, 19, 233
acétylation du méthoxy-2 naphthalène,
235, 236
adsorption, 1, 48, 49, 51
agents structurants, 26
alkoxyde, 63
alkylation des aromatiques, 16, 71, 220
aromatisation, 15, 18, 170, 172

B

BEA, 7, 19, 33, 35, 104, 159, 167, 194, 217,
233, 234, 237

C

catalyse clé-serrure, 85
catalyse en bouche de pores, 84, 85
CHA, 83
coke, 89–91, 93–95, 97, 99, 100, 103, 105,
113, 114, 124, 125, 211
confinement, 82
craquage catalytique, 9, 13, 16, 18, 108,
119, 160
craquage protolytique, 68
CsX, 218, 221

D

déparaffinage, 18
désalumination, 29–32, 34–36, 196
dismutation du toluène, 16, 185, 190

E

échange d'ions, 2, 27, 28
EMT, 45, 49
ERI, 10, 16, 76, 83, 97, 100, 101

F

FAU, 6, 7, 10, 12, 28, 32, 41, 42, 45, 49, 52,
54, 55, 69, 82, 93–97, 104, 116,
121, 124, 150, 151, 155, 164,
188–190, 217, 233
FCC, 18, 110–113, 115, 118, 121, 145
Fe/MFI, 14, 201, 210
FER, 8, 85, 86, 168, 174, 175, 177–180,
217
force acide, 10, 54, 56, 61

G

Ga/HMFI, 168, 172–174

H

hydro-isomérisation, 18, 144, 146, 159
hydro-isomérisation des alcanes, 157
hydrocraquage, 15, 18, 109, 144, 146, 160,
162, 163
hydrophilicité-hydrophobicité, 14, 201,
209, 232
hydroxylation du phénol, 207

I

indice d'octane, 76, 109, 117, 118, 123,
251, 252
indice de cétane, 251, 253, 254

ions carbénium, 62, 63, 72
ions carbonium, 63, 67, 72, 169
isomérisation, 13
isomérisation de la coupe C₈ aromatique,
15, 16, 185
isomérisation des n-butènes en isobutène,
175, 178, 179
isomérisation des n-alcanes C₅-C₆, 16, 148
isomérisation des xylènes, 187, 188
ITQ₉, 198

K

K-FAU, 215, 222

L

LTA (A), 2, 8, 23, 27, 75–77, 93
LTL, 7, 217

M

MAZ, 159
MCM41, 69, 189
mécanisme en chaîne par ions carbénium,
66, 68, 122
MEL, 84
Méthanol to Gasoline (MTG), 129, 141
MFI, 3, 4, 7, 10, 15, 16, 18, 78, 79, 81,
83, 84, 93, 94, 97, 100, 101, 103,
115, 118, 124, 129–131, 136, 137,
140, 155, 167–169, 172, 185–187,
189–191, 193–196, 208, 210, 215,
217, 239
mode de désactivation, 99, 100, 102
MOR, 7, 9, 10, 12, 13, 16, 51, 52, 80, 84,
85, 89, 100, 101, 104, 155, 156,
159, 186, 194, 196, 217
MWW (MCM22), 7, 51, 53, 55, 85, 86, 197,
217

N

NaY, 224–226
NiMoS/HFAU, 154, 160, 163

O

OFF, 51

P

Pd/HFAU, 160
Pd/HMFI, 239
Pt/HFAU, 85, 152, 155, 156, 223
Pt/LTL, 14
Pt/NaY, 227
Pt/HEUO, 85
Pt/HMFI, 85, 155, 156, 240
Pt/HMOR, 13, 158
Pt/HTON, 85

R

Régénération, 101, 113

S

SAPO11, 160
SAPO34, 103, 131, 133, 138–140
sélectivité de forme, 3, 4, 75
spatiosélectivité, 80, 81

T

tamisage moléculaire, 3, 76, 78–80
titanosilicalite-1 (TS-1), 14, 201, 202, 203,
205, 209, 210
TON, 160
transfert d'hydrogène, 122, 123

X

X (FAU), 2, 6, 23, 46, 216

Y

Y (FAU), 2, 6, 23, 27, 30, 46, 110, 116, 216