

CATALYSE et CONTACTS

Le terme «catalyse», étymologiquement décomposition, dissolution, dénouement, est rentré dans le langage courant et quelques applications font partie de la vie quotidienne (four à nettoyage par catalyse, pot d'échappement catalytique,...). Le mot fut introduit par Berzélius en 1836 pour qualifier certains faits expérimentaux observés au cours de différentes réactions chimiques découvertes au début du XIX^{ème} siècle.

Un catalyseur est une substance (solide liquide ou gazeuse) qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans apparaître dans les produits finaux. Première conséquence de cette définition : les caractéristiques thermodynamiques de la réaction ne sont pas concernées puisque le catalyseur ne figure pas dans l'équation stœchiométrique. Dans les conditions choisies, la faisabilité d'une réaction reste la même. Autre conséquence : un catalyseur de l'étape directe d'une réaction réversible est aussi catalyseur de l'étape inverse. Grâce au catalyseur apparaît un nouveau chemin réactionnel plus facile qui est en général un cycle ininterrompu d'étapes élémentaires de combinaisons, transformations et régénérations.

Les réactions catalytiques sont classées en deux grandes catégories suivant la nature du milieu réactionnel :

Catalyse homogène : le catalyseur est soluble dans le milieu

Catalyse hétérogène : le milieu présente deux phases différentes ; on peut ranger dans cette catégorie la catalyse enzymatique si importante pour le monde vivant.

Généralités

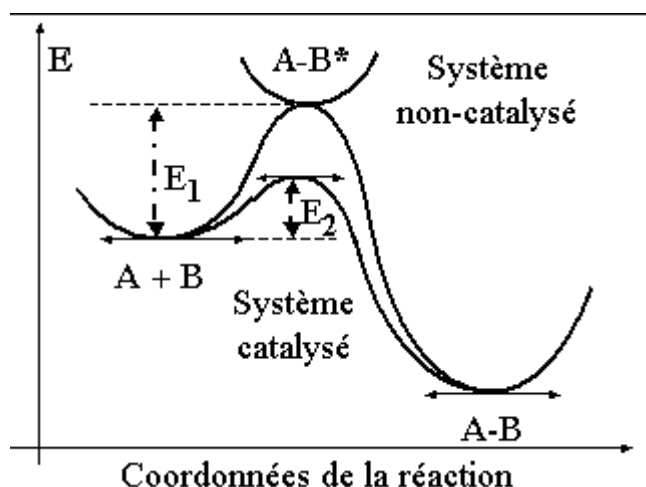
Deux facteurs interviennent spécifiquement au niveau des lois de vitesse pour une transformation chimique : le facteur pré-exponentiel, A , et l'énergie d'activation, E_a . L'expression classique de la constante de vitesse est :

$$k = A e^{-E_a/RT}$$

Cette constante n'est valable que pour un système donné. À partir d'un ensemble de réactifs, via un chemin réactionnel approprié, le système évolue vers la formation des produits. E_a mesure la hauteur de la barrière de potentiel (cf. figure ci-dessous).

Contrairement à la thermodynamique qui ne tient pas compte du chemin suivi (principe de l'état initial et de l'état final), la cinétique chimique en est largement dépendante. En modifiant ce chemin, on modifiera la barrière de potentiel. Si E_a augmente, la barrière s'élève et la constante de vitesse décroît et inversement.

35 Une manière relativement simple pour modifier cette barrière est l'usage d'un catalyseur. En fait, celui-ci participe à certaines étapes élémentaires, mais est régénéré. Il permet aux réactifs de trouver un chemin réactionnel moins difficile en abaissant la hauteur de la barrière de potentiel.



40

A la réaction $A + B \longrightarrow A-B$ est associée une énergie d'activation E_1

La même réaction en présence d'une espèce catalytique C s'écrit :

$A + B + C \longrightarrow A-B + C$ et s'effectue avec l'énergie d'activation E_2

Le mode d'action de C n'importe pas. On observe une augmentation de la vitesse de formation du produit A-B. En admettant que le facteur pré-exponentiel est beaucoup moins perturbé que l'énergie d'activation de telle sorte que l'on peut ignorer cet effet au moins en première approximation, on peut expliquer l'augmentation de la vitesse si on considère que E_2 est inférieure à E_1

Existe-t-il des catalyseurs "négatifs" c'est-à-dire des composés qui augmentent la barrière de potentiel ? Un système réactionnel prendra toujours le chemin le plus facile. Le fait d'ajouter un **inhibiteur** ne modifie pas la barrière de potentiel de la réaction considérée. Par contre, sa présence permet d'ouvrir d'autres chemins réactionnels plus faciles. Le système réactionnel est alors orienté vers une autre "sortie" de telle sorte qu'il se produit une diminution de la vitesse de la réaction originellement considérée.

55 CATALYSE HOMOGÈNE

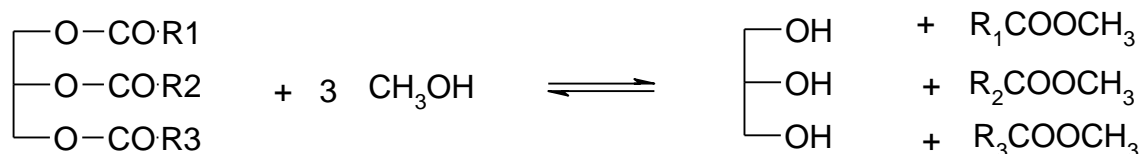
De moins en moins concrètement employée à grande échelle, la catalyse « monophasique » permet une illustration moléculaire simple du principe catalytique. Dès 1814 Kirchoff signale l'influence de l'ajout d'acide dans l'hydrolyse de l'**amidon**.

Considérons le cas historiquement et industriellement important de la transestérification des esters naturels d'**acides gras**. La production de "biogazole" par méthanolyse des huiles végétales

(fabrication d'esters méthyliques d'huile végétales : EMHV ; cf. Annexe I, p.10) illustre les principes et les limites de la catalyse acido-basique :

Une huile végétale est constituée de triglycérides : triester du glycérol (propane-1, 2, 3-triol) et d'acides carboxyliques à longue chaîne aliphatique (nommés acides gras). L'utilisation directe
65 d'huile végétale comme carburant dans les moteurs diesel s'est heurtée à des difficultés concrètes (viscosité, présence d'acides, stockage difficile, ...) et leur alcoolyse est apparue comme une alternative. L'emploi de méthanol (disponible en grandes quantités, peu cher) permet d'obtenir des produits de caractéristiques proches du carburant issu de la distillation du pétrole (viscosité, *point éclair*, ...). La réaction bilan est schématisée ci-dessous :

70



L'addition d'acides minéraux (chlorhydrique, phosphorique, sulfurique, ...) au méthanol accélère la réaction (cf. annexe II, p.11) ; à noter que cette méthode a été employée directement sur
75 les graines de tournesol, le méthanol agissant en même temps comme agent d'extraction et supprimant ainsi l'étape de pressage.

L'ajout de base (hydroxyde de sodium ou de potassium, alkoxydes de sodium, ...) est plus utilisé commercialement car la réaction est beaucoup plus rapide. L'explication mécanistique est élémentaire (Annexe II, p.11).

80

CATALYSE HETEROGENE

Très employée industriellement, notamment en pétrochimie (reformage, isomérisation des alcanes,...), elle concerne les réactions dans lesquelles les réactifs ne sont pas dans la même phase que le catalyseur, en général solide. La séparation est donc concrètement facilitée. On peut
85 distinguer trois réactions chimiques du cycle catalytique :

1. Chimisorption : il s'agit en fait d'une véritable réaction avec formation de liaisons chimiques entre les réactifs et les sites actifs de la surface du catalyseur.
2. Réaction c'est à dire transformation des espèces chimisorbées.
3. Désorption du ou des produits et régénération du catalyseur.

90

Le fait que la réaction se produise à la surface du catalyseur (interface solide – fluide) complique le cycle puisque des étapes de transport de matière interviennent : diffusion des molécules de réactifs vers la surface du solide et des produits de la surface vers la phase fluide. Les

transferts de chaleur sont aussi à considérer puisque la réaction chimique (exothermique ou endothermique) se produit très ponctuellement : les différences de température au sein du milieu ont des conséquences sur l'activité et surtout la sélectivité des catalyseurs.

L'activité du catalyseur (qui est une expression de la vitesse de réaction) s'exprime en quantité de réactif transformé par unité de masse du catalyseur et par unité de temps. Elle dépend donc étroitement de la surface du catalyseur et plus précisément de la densité des sites actifs. Cela explique les surfaces spécifiques très élevées des catalyseurs employés, qui s'étendent de 50 à 1000 m²/g. De telles surfaces ne peuvent être obtenues que par la création de pores au cours de la préparation ; on distingue suivant la taille des pores des solides macro, méso ou microporeux.

Si l'on considère l'ensemble du processus entre une molécule en phase gazeuse et un solide poreux, il est possible de distinguer 7 étapes élémentaires :

- Diffusion externe dans la phase fluide entourant le grain : en régime permanent un gradient de concentration existe au voisinage du grain.
- Diffusion dans les pores du catalyseur : le transport des molécules doit tenir compte des chocs entre molécules et avec les parois solides.
- Adsorption, c'est-à-dire rétention des molécules à la surface : dans le cas de l'acte catalytique, nous avons vu qu'il s'agit de l'établissement de liaisons chimiques : si on considère la réaction d'hydrogénation sur platine, la molécule gazeuse de dihydrogène est dissociée et des liaisons H-Pt se forment.
- La transformation représente l'acte chimique désiré : la compréhension de cet acte élémentaire nécessite l'identification des intermédiaires. Dans l'exemple simple de l'hydrogénation catalytique des alcènes sur platine, seule la molécule de dihydrogène est chimisorbée, l'autre réactif restant dans la phase fluide. Le cas se complique quand les deux molécules sont adsorbées sur le catalyseur ; il faut alors considérer les différents sites actifs possibles et l'intervention des méthodes de modélisation est indispensable.

- Désorption du (ou des) produit(s) des sites actifs.
- Diffusion dans les pores jusqu'à la frontière du grain.
- Diffusion externe à travers la couche gazeuse qui entoure le grain.

Les caractéristiques physiques essentielles des solides employés en catalyse hétérogène sont le volume poreux, la répartition des pores et la surface spécifique. Ces grandeurs sont mesurées expérimentalement à partir des isothermes d'adsorption de l'azote.

Définition de la surface spécifique $S_g = N V_m a_m / m V_M$

- N : nombre d'Avogadro ; a_m : surface occupée par une molécule adsorbée ;
 V_M : volume d'une mole d'adsorbat ; m : masse de solide utilisé pour l'adsorption ;
 V_m : volume adsorbé nécessaire pour obtenir une monocouche d'adsorbat sur toute la surface.

Pour l'azote : $a_m = 0,162 \text{ nm}^2$ la température d'adsorption est 77 K (c'est-à-dire E_{b760}).

130 La qualité d'un catalyseur est définie par son activité, sa sélectivité et sa stabilité ; les fabricants et utilisateurs évaluent ces grandeurs par des tests représentatifs du procédé industriel. L'activité est estimée à partir des courbes d'évolution du **taux de conversion** en fonction du temps de travail. La sélectivité est en fait le caractère primordial du choix du catalyseur. En effet, il est rare qu'une transformation ne mène qu'à un seul produit ; les réactions secondaires imposent la

135 mise en œuvre de procédés de séparation très coûteux économiquement et écologiquement. La sélectivité est chiffrée simplement par le rendement en produit désiré par rapport au réactif. La connaissance des mécanismes est ici importante pour connaître l'origine des produits indésirables (transformation directe du réactif, réaction secondaire du produit sur le réactif, sur le catalyseur, ...) et agir sur les conditions opératoires pour trouver le meilleur compromis. Enfin la stabilité, c'est-à-

140 dire la durée de vie du catalyseur détermine le temps d'utilisation avant régénération ou changement du matériau. La désactivation d'un catalyseur provient principalement :

- de la dégradation thermique,
- de l'empoisonnement dû à la présence dans le fluide réactionnel de composés réagissants et occupant les sites actifs,
- 145 • de l'encrassement par des impuretés organiques piégées dans le catalyseur.

La catalyse hétérogène est très employée dans les raffineries ; on considère que 80% des molécules constituant le pétrole rencontrent un catalyseur avant commercialisation. Par exemple le craquage catalytique qui a pour but de réduire la taille des molécules d'hydrocarbures pour

150 permettre de les utiliser comme carburant, s'effectue à pression atmosphérique, vers 500°C, en présence de **zéolithe** à caractère acide. Le procédé dit de « lit fluidisé » optimise les contacts en mettant les particules (20 à 50 μm) de catalyseur en suspension dans le fluide.

Une autre application est la synthèse de carburant par procédé **Fischer-Tropsch**. Découvert en 1923, il a été très employé pendant la 2^{ème} guerre mondiale pour assurer l'indépendance énergétique

155 de l'Allemagne. Le développement industriel de ce procédé suit évidemment les fluctuations économiques du marché du pétrole. Il a connu un regain d'intérêt après le choc pétrolier de 1973 ; de nombreuses études ont été entreprises depuis pour optimiser les conditions opératoires. C'est une illustration parfaite de l'apport de l'évolution de toutes les techniques (analytiques, de modélisation, de transfert d'énergie et de matière, de dépôts de métaux, de conception d'installation

160 industrielles) à l'évolution d'un procédé industriel. Des unités de production ont été mises en fonction en Afrique du sud (Société SASOL, à partir du charbon extrait par la même société : 4,5 10^6 T/an depuis 1983), Malaisie, USA.... Le principe est de synthétiser des hydrocarbures liquides

à partir de monoxyde de carbone et de dihydrogène (gaz de synthèse obtenu par gazéification du charbon ou craquage du gaz naturel ou du pétrole) ; l'emploi de catalyseur basique contenant du ruthénium, du fer, ou du cobalt est indispensable. Nous allons principalement nous attacher à l'évolution du catalyseur solide.

La synthèse d'hydrocarbures à partir de monoxyde de carbone a été mentionnée à l'origine par P. Sabatier ; celui-ci, employant du nickel comme catalyseur, obtenait essentiellement du méthane, ce qui n'a pas suscité un intérêt important. Entre 1925 et 1928, F. Fischer et H. Tropsch étudient l'activité de différents solides à base de fer et de cobalt au regard des rendements et des proportions de produits. Les variations des conditions de pression, de température sont examinées ainsi que l'influence d'additifs dans le solide. Le catalyseur « standard » proposé en 1934 : cobalt à 10% de ThO₂ précipité sur *Kieselguhr* restera en fonction pendant 40 ans, ainsi que les conditions opératoires étudiées et optimisées par les concepteurs du procédé. Pour différentes raisons économiques et pratiques, les installations en fonction en Allemagne jusqu'en 1945 employaient des catalyseurs à base de Fer, reportés par les mêmes auteurs. A partir de 1974, les grandes compagnies pétrolières s'intéressent au procédé Fischer – Tropsch et financent des recherches pour l'améliorer. On assiste alors à une profusion de publications et de brevets concernant notamment la compréhension de l'acte catalytique : influence de la nature du support (oxyde d'aluminium, oxyde de silicium, oxyde de titane), de sa pureté et de son acidité, importance de la présence d'oxydes basiques additionnels (ZrO₂, La₂O₃), importance de la dispersion du cobalt sur le support (de nouvelles méthodes de mesures sont élaborées). Actuellement, on en est à la quatrième génération de catalyseur ; les prochains développements viendront de nouveaux modèles de microcinétique pour la compréhension des mécanismes au sein des sites actifs, de calculs théoriques éclairant le rôle des additifs, de l'application de nouvelles méthodes de dépôt du métal (à partir de colloïdes notamment).

On retrouve ces progrès de conception dans l'évolution du pot d'échappement catalytique. Obligatoires sur les véhicules neufs (en France depuis 1993 (essence) et 1997 (diesel)), ils sont destinés à transformer les rejets des moteurs à explosion en composés moins toxiques pour l'environnement (cf. annexe III, p.12). Les gaz d'échappement traversent une structure en nid d'abeille constituée de tubes capillaires de *céramique* recouvert par les espèces catalytiques : platine, palladium, rhodium ; la catalyse n'est efficace qu'au dessus de 400°C. En 1974 les chambres catalytiques commercialisées comportaient 30 cellules/cm² avec une épaisseur de paroi de 0,3 mm ; actuellement, le nombre de cellule a été multiplié par 4 alors que l'épaisseur des parois est de 0,025 mm. Soumis à des contraintes mécaniques et thermiques importantes, ces dispositifs sont à l'origine d'une nouvelle pollution : les neiges du Groenland présentent des teneurs en métaux lourds 100 fois supérieures depuis la généralisation du pot d'échappement catalytique.

Catalyse enzymatique

En général la catalyse enzymatique est traitée en dehors de la catalyse homogène et hétérogène. Elle se rattache effectivement par certains de ses aspects, à l'un ou l'autre type. Nous
200 allons considérer ici principalement les aspects de contact qui font apparaître des phénomènes aux interfaces liquide/solide.

Les réactions chimiques en milieu biologique nécessitent très souvent l'intervention d'enzymes (étymologiquement : dans la levure). Plusieurs raisons à cela : les milieux intra et
205 extracellulaires sont aqueux, très dilués, de composition chimique complexe : les molécules organiques y sont peu solubles et les probabilités de contact entre réactifs faibles. Il faut, la plupart du temps, l'intervention de molécules facilitant spécifiquement une réaction, ce qui est la définition d'un catalyseur ; ce rôle est tenu par les enzymes qui sont des *macromolécules* protéiniques. Le facteur d'accroissement dû au rôle catalytique varie de 10^7 (pour l'enzyme *chymotrypsine*) à 10^{17}
210 (pour la *phosphatase*). On peut considérer très succinctement qu'elles constituent une poche dont l'ouverture et la forme intérieure vont jouer le rôle de sélecteur pour trier les molécules et ne conserver que celles qui correspondent à leur propre spécificité réactionnelle. Celle-ci est à l'origine du nom de famille des enzymes : les ligases lient les molécules entre elles, les cyclases cyclisent, les oxydoréductases, les hydrolases....

La surface enzymatique présente des sites actifs qui vont d'abord immobiliser le substrat par
215 création de liaisons de type Van der Waals, hydrogène ou donneur-accepteur. La connaissance de la géométrie tridimensionnelle de la cavité enzymatique est l'enjeu de recherches abondantes en chimie médicinale pour l'élaboration de nouvelles molécules actives à partir de relations structure/activité. La nécessité d'avoir une représentation précise en 3 dimensions implique une
220 étude par diffraction de rayons X sur un solide cristallin ; la principale difficulté rencontrée est de cristalliser les enzymes.

Au sein du site actif, il est d'usage de distinguer les sites de fixation et les sites catalytiques. Constitué d'un petit nombre d'acides aminés de la chaîne *polypeptidique*, sa conformation est adaptée à la reconnaissance d'un substrat donné suivant l'analogie clef/serrure proposée par E.
225 Fischer en 1894. Certains acides aminés, qui interviennent en général par leur chaîne latérale, ont pour rôle d'immobiliser le substrat, d'autres fournissent les groupements chimiques nécessaires à la réaction catalysée par l'enzyme. La formation d'un complexe enzyme – substrat (E – S) est donc l'étape initiale de la réaction dont la cinétique est développée en annexe IV (p.12)

Un exemple de réaction enzymatique est donné en annexe V (p.13). La molécule de substrat
230 est immobilisée par ailleurs et le schéma ne fait pas apparaître les sites de fixation mais uniquement les interactions surface/substrat et le déroulement très simplifié de la réaction. L'enzyme considérée est la *chymotrypsine* et la réaction est l'hydrolyse d'une fonction amide d'un *polypeptide*. Cette

enzyme appartient à un groupe (protéase à sérine) caractérisé par la présence commune, à l'intérieur du site actif, d'un enchaînement particulier de 3 acides aminés précisés sur le schéma.

235

Les phénomènes aux interfaces sont encore mal connus. Les lois qui régissent les contacts entre deux phases nous échappent. Les modèles mathématiques indispensables à la compréhension sont en évolution constante, sous la pression économique et industrielle. Le développement des sciences appartient autant à ce domaine qu'à celui d'une recherche plus théorique qui ne peut être dissociée des applications potentielles à plus ou moins long terme (Gerhard ERTL, Prix Nobel de chimie 2007 pour ses travaux sur les surfaces solides).

240

GLOSSAIRE

Acide gras : nom trivial des acides carboxyliques constituant les matières grasses, sous la forme d'ester du glycérol (glycérine).

Amidon : polymère naturel du glucose. Il est constitué de deux structures différentes : l'amylose (600 à 1000 unités monomère) et l'amylopectine (10 000 à 100 000 unités monomère).

Céramique : terme général recouvrant des matériaux de structures diverses, formé à partir d'une masse en fusion d'oxydes métalliques.

Chymotrypsine : enzyme digestive qui hydrolyse les protéines.

Inhibiteur : composé qui ralentit une réaction.

Kieselguhr : matériau constitué des squelettes siliciques d'algues microscopiques (diatomées) formant une poudre très fine et absorbante.

Macromolécule : molécule de grande masse moléculaire obtenue en général par polymérisation d'un motif élémentaire.

Phosphatase : enzyme présente dans le sang dont le rôle est d'enlever un groupe phosphate à une molécule .

Polypeptide : polymère constitué d'acides α -aminés reliés entre eux par une liaison de type amide (ou liaison peptidique)

Point éclair : température d'inflammation de vapeurs dans l'air en présence d'une flamme

Taux de conversion : fraction de réactif qui réagit lors d'une réaction.

Zéolithe : Aluminosilicate hydraté de métaux des groupes I et II ; naturelles ou synthétiques, elles sont utilisées pour leurs structures microporeuses.

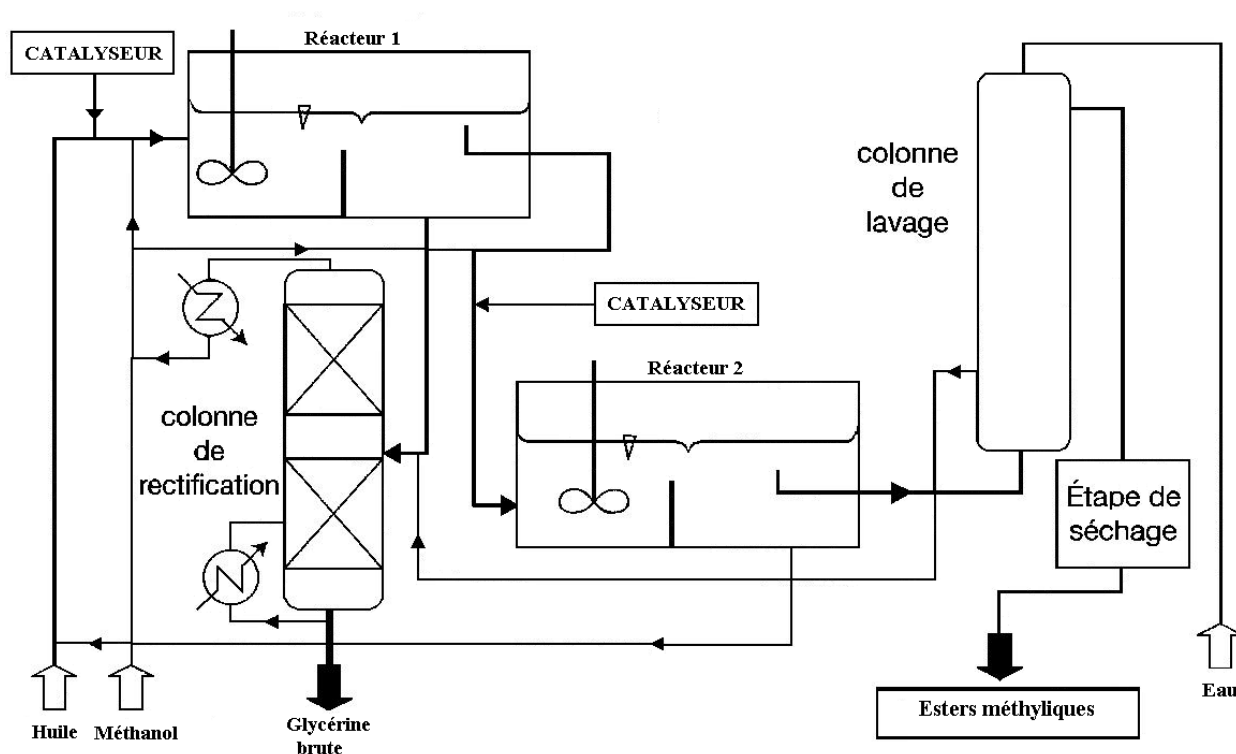
ANNEXE I

Catalyse homogène : fabrication industrielle de « biogazole »

Trans estérification des huiles végétales

Les procédés en continu sont maintenant régulièrement choisis. La capacité des unités construites ces dernières années dépassant souvent les 100 000 t/an ; les principaux avantages résident, d'une part, dans la réduction sensible de la taille des équipements et conséquemment des investissements et, d'autre part, dans la diminution des coûts opératoires.

Un schéma du procédé de production utilisant deux réacteurs en série est donné ci-dessous :

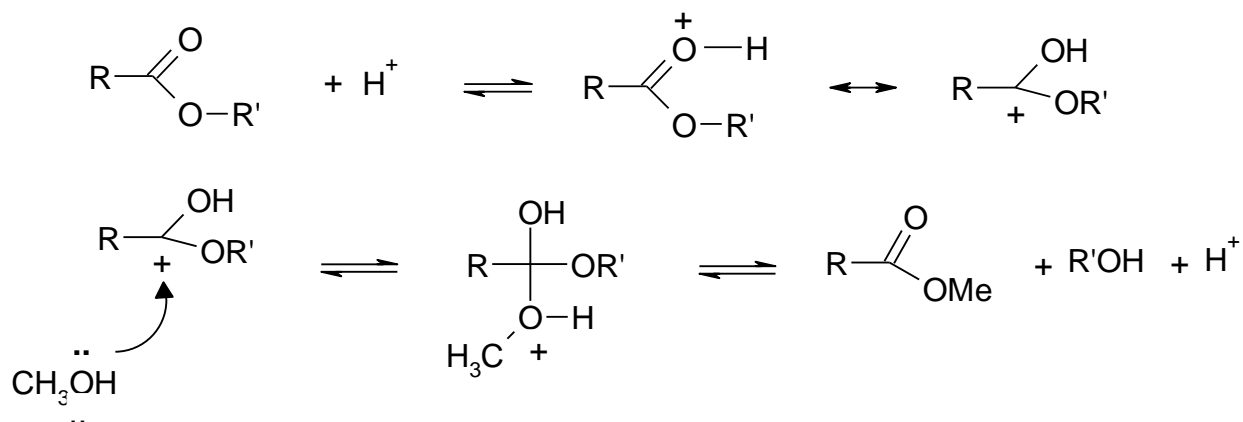


Dans ce type d'installation, les rendements en esters méthyliques sont compris entre 98,5% et 99,4% en masse. La consommation en catalyseur varie de 3,5 à 4,6 kg d'hydroxyde de sodium par tonne d'huile.

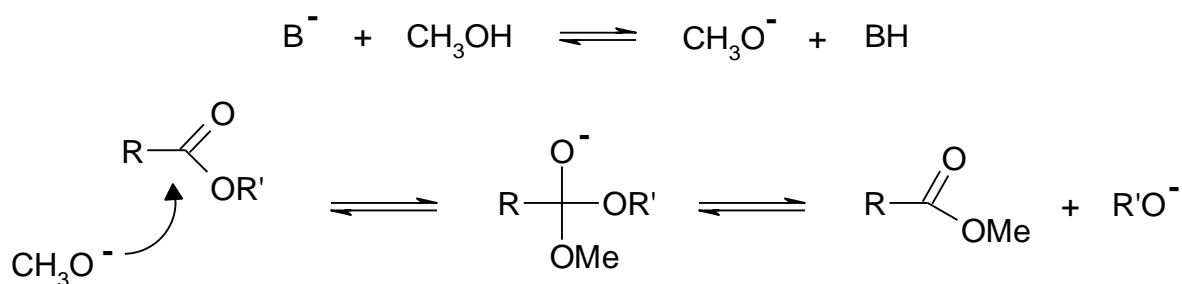
ANNEXE II

Mécanismes de transestérification

Catalyse acide :

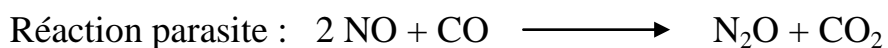
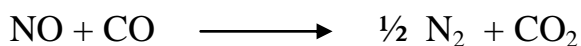
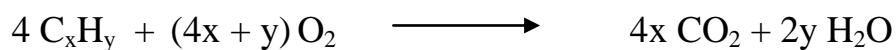
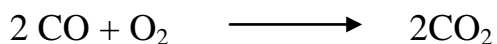


Catalyse basique :



ANNEXE III : le pot catalytique

Réactions mises en jeu :

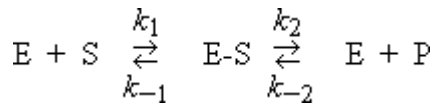


Le maximum de conversion pour les 3 réactions (95%) se situe pour un rapport précis Air/Carburant : nécessité de régulation de l'injection par une sonde à oxygène.

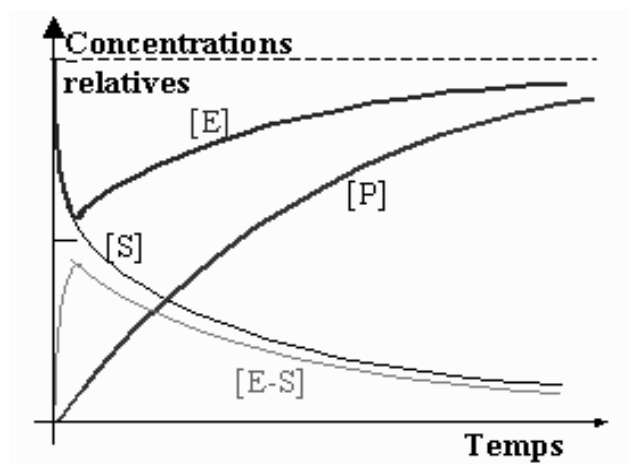
ANNEXE IV : Cinétique enzymatique

Equation de MICHAELIS-MENTEN

Considérons un système réactionnel dans lequel E, S, et P sont respectivement l'enzyme, le substrat et les produits ; le mécanisme général fait apparaître un complexe enzyme - substrat noté E-S :



L'équilibre 1 est très rapide ; en mélangeant initialement E et S, une fraction importante de l'enzyme s'associe au substrat, l'importance étant conditionnée par la constante thermodynamique de l'équilibre 1. La décomposition du complexe enzyme-substrat démarre et donne lieu à la formation du produit P en régénérant l'enzyme. La réaction 2 fait partie d'un équilibre thermodynamique. Cependant, en début de réaction, l'absence du produit P et l'abondance du complexe E-S limite considérablement l'importance de la réaction de constante k_{-2} . Ces observations sont résumées dans la figure suivante:



En supposant que la quantité du produit P est nulle au départ de la réaction et en appliquant le principe de quasi-stationnarité à la concentration du complexe enzyme-substrat :

$$\frac{d[\text{E-S}]}{dt} = k_1 [\text{E}] [\text{S}] - k_{-1} [\text{E-S}] - k_2 [\text{E-S}] = 0$$

$$[\text{E-S}] = \frac{k_1 [\text{E}] [\text{S}]}{k_{-1} + k_2} = \frac{[\text{E}] [\text{S}]}{K_M}$$

où

$$K_M = \frac{k_{-1} + k_2}{k_1}$$

K_M est ce qu'on appelle la constante de MICHAELIS.

La vitesse initiale de la réaction est :

$$V_o = \frac{d[P]}{dt} = k_2 [E-S] = \frac{k_2}{K_M} [E] [S]$$

À $t = 0$: $[E]_o = [E] + [E-S]$

$$[E-S] = \frac{([E]_o - [E-S]) [S]}{K_M} = \frac{[E]_o [S] - [E-S] [S]}{K_M}$$

$$[E-S] + \frac{[E-S] [S]}{K_M} = \frac{[E]_o [S]}{K_M}$$

$$[E-S] \left(1 + \frac{[S]}{K_M} \right) = \frac{[E]_o [S]}{K_M}; \quad \frac{[E]_o [S]}{K_M} \frac{K_M}{K_M + [S]} = [E-S]$$

et

$$[E-S] = \frac{[E]_o [S]}{K_M + [S]}$$

Puisque $V_o = k_2 [E-S]$

$$V_o = k_2 \frac{[E]_o [S]}{K_M + [S]}$$

La vitesse maximum est obtenue lorsque $[S] \gg K_M$:

$$\frac{V_o}{V_{\max}} = \frac{k_2 [E]_o [S]}{K_M + [S]} \frac{1}{k_2 [E]_o} = \frac{[S]}{[S] + K_M}$$

$$\frac{V_{\max}}{V_o} = \frac{[S] + K_M}{[S]} = 1 + \frac{K_M}{[S]}$$

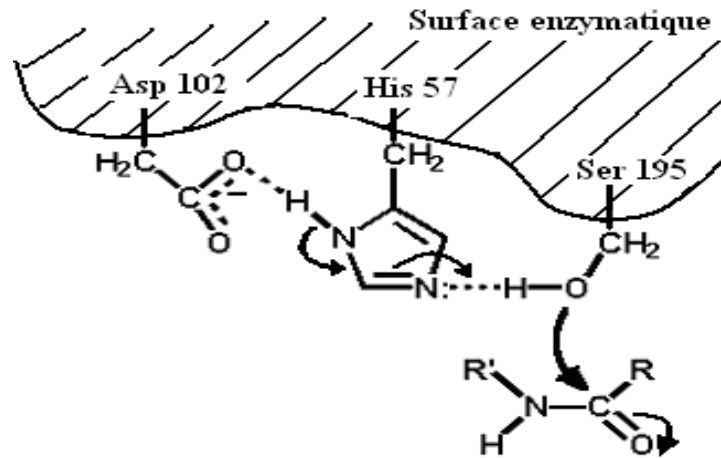
$$\frac{V_o}{V_{\max}} = \frac{[S]}{K_M + [S]}$$

Le rapport $V_o / V_{\max} = 1/2$ lorsque $K_M = [S]$

$$V_o = \frac{V_{\max} [S]}{K_M + [S]}$$

Expression de l'équation de Michaelis - Menten

ANNEXE V : Hydrolyse enzymatique d'une amide

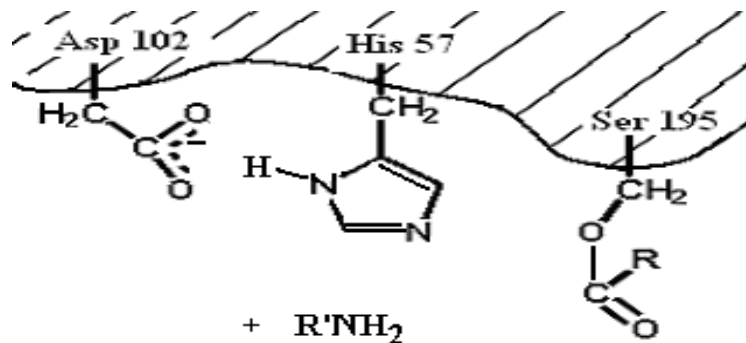


Asp 102 : Acide aspartique, 102^{ème} acide de la chaîne polypeptidique de l'enzyme

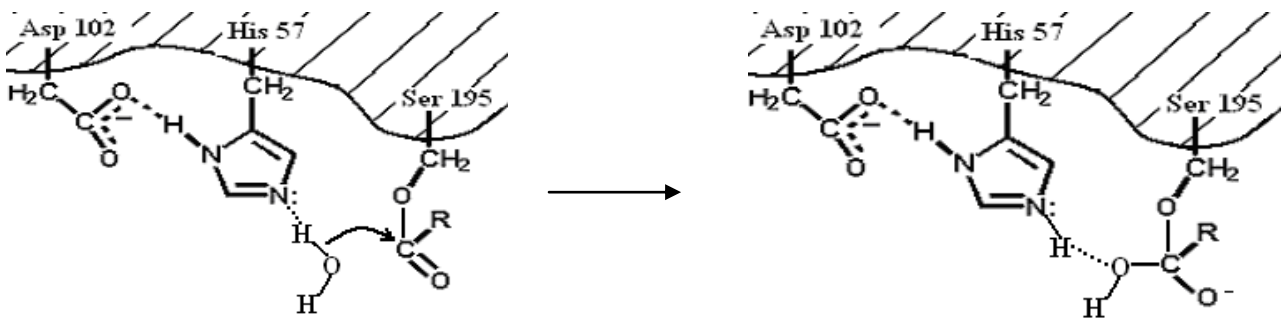
Hist 57 : Histidine, 57^{ème} acide de la chaîne polypeptidique de l'enzyme

Ser 195 : Sérine, 195^{ème} acide de la chaîne polypeptidique de l'enzyme

1^{ère} étape : rupture de la liaison amide



2^{ème} étape : intervention d'une molécule d'eau



3^{ème} étape : régénération de l'enzyme

