

Chapitre 1 : Enzymologie en milieu homogène

1. Généralité

Les enzymes molécules de nature protéique, catalyseurs des systèmes biologiques, sont de remarquables machines moléculaires qui déterminent le profil de certaines transformations chimiques. Elles assurent aussi la transformation d'une forme d'énergie en une autre.

Enzyme : une molécule qui catalyse des réactions biochimiques.

Catalyseur : il augmente la vitesse d'une réaction biochimique, sans modifier la constante d'équilibre en diminuant l'énergie d'activation.

Environ, un quart des gènes du génome humain code pour des enzymes, ce qui témoigne de leur importance pour la vie.

Les enzymes sont **les unités fonctionnelles** du métabolisme cellulaire intervenant en séquences organisées. Elles **catalysent** les centaines d'étapes réactionnelles par lesquelles les molécules de nutriments sont dégradées, l'énergie chimique est conservée et transformée, les macromolécules cellulaires sont synthétisées à partir de précurseurs simples.

Elles sont constituées de plusieurs **acides α -aminés** de la série L unis entre eux par une liaison formée par condensation entre le groupement carboxyle d'un acide aminé et le groupement amine d'un autre acide aminé afin de former une liaison amide. Les enzymes sont donc des polypeptides , dont l'ordre, dans lequel sont arrangés les acides aminés, constitue ce que l'on appelle la structure primaire des enzymes .

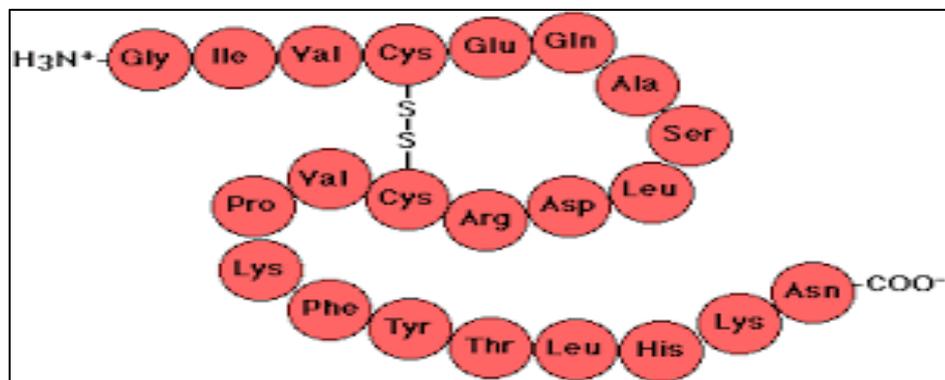


Figure 1. Une chaîne polypeptidique

Les enzymes peuvent être répartis en deux groupes :

- **Enzymes extracellulaires(ou exoenzymes)** : elles sont synthétisées à l'intérieur de la cellule, puis sécrétés dans l'espace extracellulaire.
1. **Enzymes intracellulaires(ou endoenzymes)** : elles sont synthétisées et utilisées entièrement à l'intérieur de la cellule où elles sont généralement liées à des particules subcellulaires ou membranes intracellulaires rendant leur extraction plus difficile.

2. Nomenclature et classification

Les enzymes sont classés selon la réaction qu'ils catalysent. Chaque enzyme est caractérisé par un nom usuel simple (exemple : carboxypeptidase A), un nom systématique plus informatif de la réaction catalysée (exemple: peptidyl-L-amino acide hydrolase) et un numéro de code à quatre chiffres précédé de EC (**EC « Enzyme Commission »** exemple: 3.4.17.1). Ce numéro est spécifique pour chaque enzyme.

- **Le premier chiffre** indique le type de réaction en jeu. Ces réactions sont classées en six groupes (classes) :

1. **oxydoréductase (Réaction oxydation – réduction)**
2. **transférase (Transfère des groupements fonctionnels)**
3. **hydrolase (Réactions hydrolytiques)**
4. **lyase (Réaction d'élimination pour former des liaisons doubles)**
5. **isomérase (Isomérisation)**
6. **ligase** Union de molécules couplée avec l'utilisation de nucléotides tri-phosphoré

- **Le deuxième chiffre** précise le type de groupement chimique ou de liaison concernée (sous-classe)
- **Le troisième chiffre** détermine la nature précise des groupements chimiques en jeu ou les mécanismes réactionnels quand ils sont connus (sous-sous-classe)
- **Le quatrième chiffre** est le numéro d'ordre d'enregistrement de l'enzyme dans la sous-sous classe concernée.

Les enzymes protéolytiques ont été les plus étudiés, ce qui permet leur classement en fonction de leur mécanisme catalytique. Exemple : La carboxypeptidase porte le numéro de classe 3 (hydrolase), la sous-classe 4 (lien peptidique), la sous-sous-classe 17 (métallo-carboxypeptidase) et 1 (numéro de l'enzyme dans cette série).

3. Les enzymes sont des catalyseurs

C'est une réaction chimique qui se déroule dans la cellule ou le milieu cellulaire, en présence d'un catalyseur biologique (biocatalyseur), l'enzyme.

On écrira une réaction enzymatique de la manière suivante :



Il existe essentiellement deux grands types de réactions biochimiques : ▪ Les réactions de dégradation de la matière organique (catabolisme). ▪ Les réactions de synthèse de la matière organique (anabolisme).

Substrat : C'est une substance entrant en transformation au cours de la réaction enzymatique.

Produit : C'est la substance qui résulte de la réaction
Coenzymes : Eléments non protéiques qui participent à la réaction enzymatique, ces molécules ne sont pas liées par des liaisons covalentes à la protéine.

Du point de vue de leur structure on divise les enzymes en deux catégories :

- Les enzymes purement protéiques : elles ne sont constituées que d'acides aminés. Ce sont les **holoenzymes**.
- Les enzymes en deux parties : une partie protéique appelée apoenzyme (thermolabile) et une partie non protéique appelée cofacteur ou coenzyme (thermostable). L'association des deux parties forme l'**hétéroenzyme**.

➤ Nature des cofacteurs

Un cofacteur est une substance chimique non protéique, mais qui est liée à une protéine, et qui est nécessaire à l'activité biologique de cette protéine.

Les cofacteurs peuvent être considérés comme des molécules d'assistance aidant aux transformations biochimiques. Ils peuvent être classés selon leur mode de liaison aux enzymes

- Composés liés fortement à l'enzyme (groupement prosthétiques) exemple : le groupement porphyrine dans les catalases ou cytochromes.
- Composés liés faiblement à l'enzyme : beaucoup de ces coenzymes sont des dérivé de vitamines exemple : NAD ou NADP qui dérivent du Nicotineamide (vitamine pp).

- Ions métalliques (cations) : Fe^{2+} , Mg^{++} , Mn^{++} , Cu^+ , Ca^+ ,..... l'ion associé à la partie protéique forme la métallo-enzyme.

Site actif

La fonction des enzymes est liée à la présence dans leur structure d'un site particulier appelé le site actif. Schématiquement, il a la forme d'une cavité ou d'un sillon dans lequel vont se fixer les substrats grâce à plusieurs liaisons chimiques faibles. Une fois fixés, les substrats vont agir et se transformer en produits.

Le site actif est subdivisé en deux partis :

- Le site de liaison /fixation/reconnaissance : il reconnaît la complémentarité de forme avec un substrat spécifique à l'enzyme.
- Le site catalytique ; il permet la réaction transformant le substrat en produit.

4. Propriétés des enzymes

- Les enzymes modifient la réaction en accélérant sa vitesse. Elles accélèrent les réactions chimiques dans les systèmes biologiques d'un facteur 10^6 au minimum.
- L'enzyme agit à concentration très faible
- l'enzyme ne figure pas quantitativement parmi les produits de la réaction. Chaque molécule peut catalyser un nombre illimité de réaction.
- L'enzyme ne modifie pas la nature de la réaction ni son équilibre ni son état thermodynamique, elle modifie la réaction en accélérant sa vitesse.
- Les enzymes abaissent l'énergie libre d'activation du substrat

Structure des Enzymes :

Les enzymes sont des protéines formées de longues chaînes d'acides aminés repliées en structures tridimensionnelles. Leur structure détermine leur spécificité pour un substrat donné.

Spécificité de l'Enzyme :

Les enzymes sont spécifiques de leurs substrats en raison de la forme de leur site actif. Cette spécificité peut être expliquée par la théorie du "cadenas et clé" ou par la théorie de l'ajustement induit, où l'enzyme modifie sa conformation pour s'adapter au substrat.

5. Cinétique des réactions enzymatique :

En milieu homogène, l'étude de la cinétique enzymatique permet de mieux comprendre comment les enzymes fonctionnent et comment elles interagissent avec les substrats. La cinétique enzymatique se concentre sur la vitesse des réactions et comment cette vitesse change en fonction de différents facteurs.

- **Vitesse de Réaction** : La vitesse d'une réaction catalysée par une enzyme peut être exprimée par la quantité de produit formé par unité de temps.
- **Loi de Michaelis-Menten** : L'une des bases fondamentales de la cinétique enzymatique est la loi de Michaelis-Menten, qui décrit la relation entre la vitesse de réaction (v), la concentration du substrat ($[S]$), et les paramètres enzymatiques :

$$V = V_{\max} [S] / K_M + [S]$$

K_M : La constante de Michaelis, qui est la concentration de substrat à laquelle la vitesse de la réaction atteint la moitié de la vitesse maximale.

- **Inhibiteurs Enzymatiques** :

Les enzymes peuvent être inhibées par des substances qui ralentissent ou arrêtent leur activité. Les inhibiteurs peuvent être :

- ✓ **Inhibiteurs compétitifs** : Ils se lient au site actif de l'enzyme et empêchent le substrat de se fixer.
- ✓ **Inhibiteurs non compétitifs** : Ils se lient à un site autre que le site actif, modifiant la conformation de l'enzyme et réduisant son activité.
- ✓ **Inhibiteurs un compétitifs** : Ils se lient au complexe enzyme-substrat, empêchant la réaction.

5.1.Équation de Michaelis-Menten

L'équation de Henri qui est à l'origine de l'équation de vitesse de Michaelis-Menten repose sur l'observation suivante : la vitesse initiale d'une réaction est directement proportionnelle à la concentration de la préparation enzymatique, mais augmente de manière non linéaire avec la concentration du substrat, jusqu'à une vitesse maximale limite.

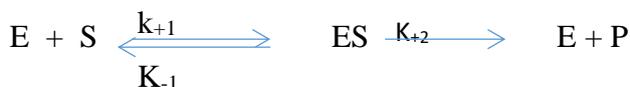
La loi de Henry et la loi de Michaelis-Menten décrivent toutes deux des relations de saturation, bien qu'elles concernent des phénomènes différents :

1. **Loi de Henry** → décrit la dissolution d'un gaz dans un liquide en fonction de la pression.
2. **Loi de Michaelis-Menten** → décrit la vitesse d'une réaction enzymatique en fonction de la concentration de substrat.

L'établissement de l'équation d'Henri est fondé sur les hypothèses suivantes :

- l'enzyme est un catalyseur ;
- l'enzyme et le substrat réagissent rapidement pour former un complexe enzyme-substrat
- un seul substrat et un seul complexe enzyme-substrat sont impliqués et le complexe enzyme-substrat se brise pour donner directement l'enzyme libre et le produit ;
- l'enzyme, le substrat et le complexe enzyme-substrat sont en équilibre. De plus, la vitesse de dissociation de ES en E + S est beaucoup plus rapide que la vitesse de coupure de ES pour former E + P ;
- la concentration du substrat est beaucoup plus élevée que celle de l'enzyme ; ainsi, la formation du complexe ES n'altère pas la valeur de la concentration de S ;
- la vitesse globale de la réaction est limitée par la coupure du complexe ES pour former l'enzyme libre et le produit ;
- la vitesse est mesurée dans les premiers instants de la réaction de telle manière que la réaction inverse ne soit pas significative.

La réaction totale s'écrit : Formation complex enzyme Substart



S : substrat

ES : Complexe enzyme substrat

K₁ : constante de vitesse de l'association d'enzyme substrat

k₋₁ : Constante de vitesse de dissociation de du complexe ES en enzyme et en substrat

Cette étape est réversible, c'est-à-dire que l'enzyme et le substrat peuvent se lier ou se séparer.

- Conversion du complexe ES en produit (P)

k_3 (ou k_2 selon certaines notations) : Constante de vitesse de la conversion du complexe ES en enzyme libre et produit.

- Cette dernière étape est souvent considérée comme irréversible, surtout lorsque le produit est éliminé immédiatement après sa formation.
- L'enzyme se lie au substrat pour former le complexe ES.
- Le complexe ES peut soit se dissocier en enzyme et substrat (réaction inverse), soit se transformer en produit P et libérer l'enzyme.
- Plus la concentration en substrat augmente, plus la vitesse de réaction augmente jusqu'à atteindre une vitesse maximale V_{max} , où toutes les enzymes sont saturées.
- Cette relation est la base de l'équation de Michaelis-Menten, qui permet de quantifier la vitesse d'une réaction enzymatique en fonction de la concentration en substrat.

La réaction de Michaelis-Menten :

$$V = \frac{V_M [S]}{K_M + [S]}$$

V_M est la vitesse maximale de la réaction qui permet d'obtenir la constante cinétique de la réaction lorsque la concentration des sites actifs $[E]_T$ est connue car $V_M = k_{+2} [E]_T$.

La constante cinétique k_{+2} est appelée *turnover* . Le *turnover* d'une enzyme est le nombre de molécules de substrat transformées en produit par unité de temps, lorsque l'enzyme est totalement saturée par le substrat.

K_M est appelée constante de Michaelis. Pour la plupart des enzymes, la valeur de K_M dépend du substrat ainsi que des conditions expérimentales dans lesquelles s'effectue la réaction (température, force ionique et pH), de K_M a deux significations :

- ✓ elle correspond à la concentration en substrat pour laquelle la moitié des sites actifs sont occupés.

$$F = V/V_M = [S]/([S] + K_M)$$

F : Fraction de la vitesse maximale atteinte (V/V_{max}) (proportion d'activité enzymatique par rapport à son maximum)

- ✓ cette valeur est fonction des constantes de vitesse de chacune des étapes du schéma de catalyse.

$$K_M = \frac{k_{-1} + k_{+2}}{k_{+1}}$$

Si on considère un cas limite dans lequel k_{-1} est beaucoup plus grand que k_{+2} cela signifie que la dissociation de ES en E et S est beaucoup plus rapide que la formation de E et P .

La constante de dissociation du complexe ES est alors donnée par :

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

K_M est donc égal à la constante de dissociation du complexe ES lorsque k_{+2} est beaucoup plus petit que k_{-1} . Si cette condition est satisfaite, K_M est une mesure de la stabilité du complexe ES : une valeur de K_M élevée indique une liaison faible du substrat avec l'enzyme alors qu'une valeur faible indiquera une liaison forte entre l'enzyme et son substrat.

- Il faut insister sur le fait que K_M donne l'affinité du complexe enzyme-substrat seulement lorsque k_{-1} est beaucoup plus grand que k_{+2} : cela est le cas pour la plupart des enzymes.
- La représentation de V en fonction de S étant une hyperbole, il est assez difficile de déterminer directement V_M et K_M . La linéarisation de l'équation permet une représentation plus précise :

$$\frac{1}{V} = \frac{K_M}{V_M} \times \frac{1}{[S]} + \frac{1}{V_M}$$

Si l'on trace la représentation de Lineweaver et Burk, $1/V = f(1/[S])$, on doit obtenir une droite de pente $a = K_M/V_M$ dont l'intersection avec l'axe des ordonnées est égale à $1/V_M$. De plus, l'intersection avec l'axe des abscisses peut être déterminée lorsque $1/V = 0$ et est égale à $-1/K_M$

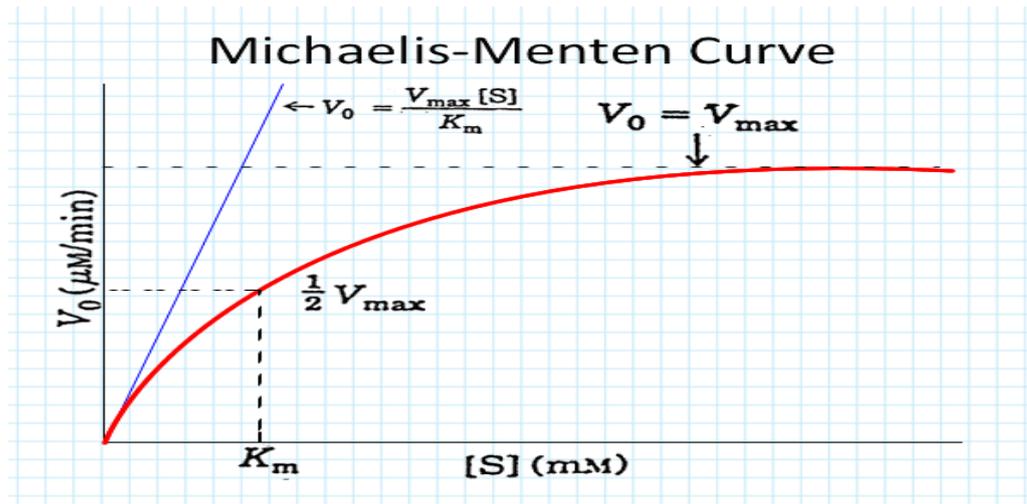


Figure 2. Michaelis Menton équation (courbe)

5.2. Inhibition/activation

N'importe quelle substance qui réduit la vitesse d'une réaction catalysée par une enzyme peut être considérée comme un inhibiteur.

L'inhibition de l'activité enzymatique est un des principaux moyens de régulation des cellules vivantes et une des procédures de diagnostic des enzymologistes. L'étude de l'inhibition d'une enzyme nous renseigne sur sa spécificité, sur l'architecture physique et/ou chimique de son site actif et sur le mécanisme cinétique de la réaction.

5.2.1. Inhibition compétitive

- Un inhibiteur compétitif est une substance qui se combine avec l'enzyme libre d'une manière qui empêche la liaison du substrat. Ainsi, l'inhibiteur et le substrat s'excluent mutuellement, du même site, par une vraie compétition.
- La nature des inhibiteurs compétitifs est variable : il peuvent être des analogues non métabolisables du substrats, des dérivés du substrat, un autre substrat de l'enzyme ou un produit de la réaction. Par exemple, la succinate deshydrogénase est l'enzyme qui catalyse l'oxydation de l'acide succinique en acide fumarique : l'acide malonique ressemble suffisamment à l'acide succinique pour se combiner avec le site actif de l'enzyme. Toutefois, comme l'acide malonique n'a qu'un seul groupe méthylène, la réaction d'oxydoréduction n'a pas lieu. L'acide malonique est un inhibiteur compétitif de la succinate deshydrogénase.
- La présence d'un inhibiteur compétitif augmente simplement le K_M apparent de l'enzyme pour le substrat, la vitesse maximale de la réaction est inchangée.

5.2.2. Inhibition non compétitive

Un inhibiteur non compétitif classique n'a pas d'effet sur la liaison du substrat avec l'enzyme et *vice versa*. L'inhibiteur et le substrat se lient de manière réversible, au hasard et de manière indépendante sur différents sites de l'enzyme. Ainsi *I* peut se lier à *E* ou *ES* et *S* à *E* ou *EI*. La liaison d'un des deux n'a aucun effet sur la dissociation du complexe formé avec l'autre. Toutefois, le complexe *ESI* ou *EIS* est inactif.

Un inhibiteur non compétitif classique diminue donc V_M mais n'a pas d'effet sur K_M .

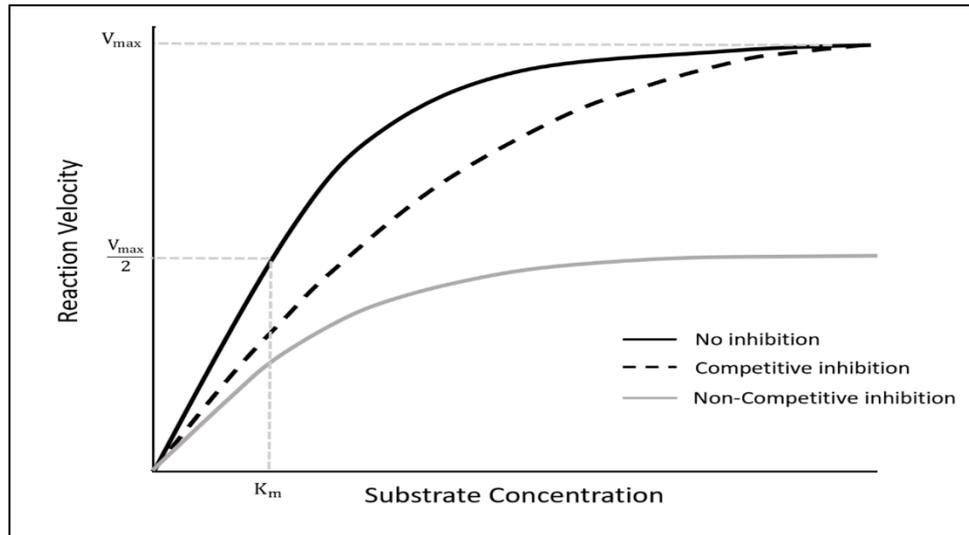


Figure 3. Michaelis Menton inhibitions

5.2.3. Activateur des enzymes

- Les activateurs sont des composés qui augmentent la vitesse d'une réaction catalytique sans être eux-mêmes impliqués dans la réaction catalysée par l'enzyme. Il existe deux types de molécules activatrices : les activateurs non essentiels, c'est-à-dire que la réaction se produit même si l'activateur n'est pas présent, ce qui est le cas des ions inorganiques et les systèmes dans lesquels le vrai substrat est un complexe substrat-activateur.
- Dans ce cas, les activateurs (groupements prosthétiques ou cofacteurs) sont nécessaires à l'activité catalytique de l'enzyme. À l'exception des groupes prosthétiques ou cofacteurs, les activateurs ne sont pas spécifiques et plusieurs familles de molécules peuvent avoir le même effet d'activation sur une enzyme : par exemple, les amylases sont activées par une grande variété d'anions.

6. Allostérie

L'allostérie est un mécanisme de régulation des enzymes et des protéines, où la liaison d'une molécule en un site spécifique (appelé site allostérique) modifie l'activité de l'enzyme.

Exemples : Hémoglobine, fixe l'oxygène de manière coopérative (effet allostérique positif)
Phosphofructokinase (PFK-1) : Régule la glycolyse en réponse à l'ATP et à l'AMP..

6.1. Principes de l'allostérie :

- **Enzyme allostérique** : Une enzyme qui possède, en plus de son site actif, un ou plusieurs sites allostériques où peuvent se fixer des effecteurs.
- **Effet allostérique** : La fixation d'un effecteur allostérique entraîne un changement de conformation de l'enzyme, ce qui augmente ou diminue son activité.

6.2. Types d'effecteurs allostériques :

- **Activateurs allostériques** : Augmentent l'affinité de l'enzyme pour son substrat → accélèrent la réaction.
- **Inhibiteurs allostériques** : Diminuent l'affinité de l'enzyme pour son substrat → ralentissent la réaction.

6.3. Modèles de régulation allostérique : (modèle de Monod)

- Si la liaison d'une molécule de substrat sur la protéine (qui possède plusieurs sites actifs) induit des changements de structures qui modifient l'affinité des sites vacants, la courbe de vitesse ne suivra plus la cinétique de Michaelis-Menten et l'enzyme sera classée en enzyme allostérique. En général, les enzymes allostériques ont des courbes de vitesse sigmoïdes.
- La liaison d'une molécule de substrat facilite la liaison de la suivante en augmentant l'affinité des sites de liaison vacants. Ce phénomène est appelé liaison coopérative, ou coopérativité positive, par rapport à la fixation du substrat.

Deux types de modèles ont été proposés pour les enzymes allostériques : le **modèle séquentiel** et le **modèle concerté**.

- **Le modèle séquentiel**, comme son nom le suggère, suppose des changements séquentiels ou progressifs dans l'affinité des sites vacants, au fur et à mesure de l'occupation des sites.
- **Le modèle concerté** suppose que l'enzyme sous forme d'un mélange en équilibre d'un oligomère à forte affinité et un oligomère à faible affinité. Les ligands (substrat, activateur, inhibiteur) agissent en déplaçant l'équilibre en faveur d'un état ou de l'autre.

Durant la transition, la conformation de toutes les sous-unités change en même temps et l'oligomère garde sa symétrie. Ce modèle, proposé par **Monod** et ses collaborateurs en 1965, repose sur **les points suivants** :

- **Les protéines allostériques** sont polymériques et contiennent des unités minimales identiques (protomères) arrangées de manière symétrique ;
- chaque protomère possède un et un seul site actif de liaison pour n'importe quel ligand (substrat, inhibiteur ou activateur) ;
- **l'oligomère** peut exister dans au moins deux conformations différentes qui sont en équilibre. Les différentes conformations peuvent provenir d'un réarrangement de la structure quaternaire ou d'un changement de la structure tertiaire des protomères.
- L'affinité d'un site de liaison pour un ligand donné dépend de la conformation du protomère.
- La liaison d'un ligand sur une conformation particulière provoque un déplacement de l'équilibre entre les conformations de l'oligomère, vers la conformation qui possède la meilleure affinité pour ce ligand. Comme chaque oligomère possède plusieurs sites de liaison, et que le changement de conformation de la faible affinité vers la forte affinité se produit simultanément pour tous les sites, on obtient une courbe sigmoïde.

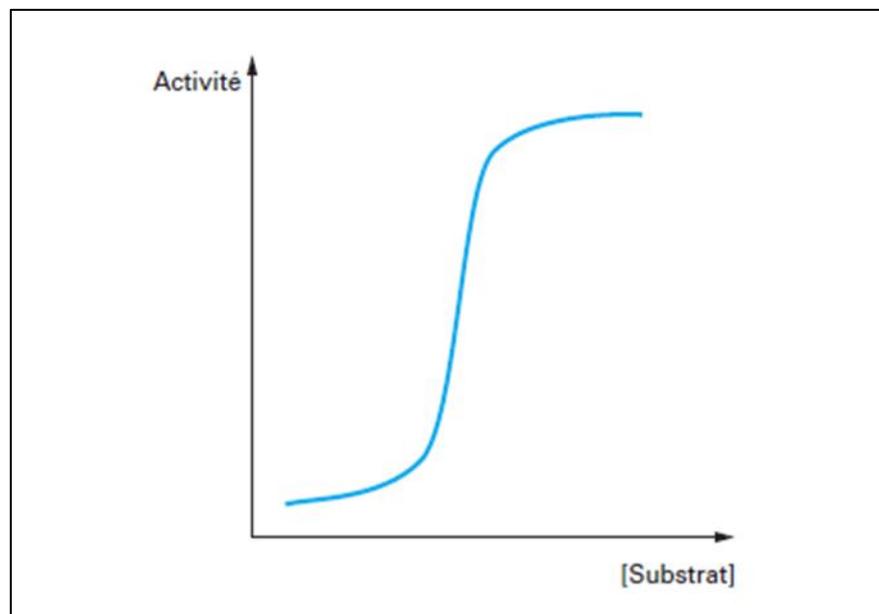


Figure 4. Représentation graphique de l'influence de la concentration de substrat sur la vitesse de réactions d'une enzyme allostérique

7. Facteurs Affectant l'Activité Enzymatique en Milieu Homogène

De nombreux facteurs influencent l'activité des enzymes en milieu homogène, notamment :

7.1. Température :

L'activité enzymatique augmente généralement avec la température, mais une température trop élevée peut dénaturer l'enzyme et réduire son activité.

Il faut tout d'abord distinguer deux phénomènes radicalement différents quant à leur origine : l'inactivation par dénaturation thermique et l'effet habituel de la température sur la vitesse de réaction (activation des molécules).

7.1.1. Activation de la réaction

- La vitesse initiale d'une réaction enzymatique dans la zone de température utilisable pour du matériel biologique, de 0 à 50 °C environ, Cette approche est assurée exclusivement, et au hasard, par l'agitation moléculaire qui suit les lois de la cinétique des gaz.
- Le nombre des collisions croît avec la température, mais d'une façon très faible, qui ne peut en aucune façon expliquer l'augmentation de vitesse de réaction. L'énergie de ces collisions, par contre, croît d'une façon importante et est à l'origine de cette augmentation de vitesse.

7.1.2. Dénaturation thermique

- C'est une transformation, sous l'effet de la chaleur, de la forme active de l'enzyme en une ou des formes dénaturées. Au-delà d'une certaine température, l'agitation thermique des molécules de solvant du milieu provoque la rupture plus ou moins importante de l'organisation structurale de la protéine nécessaire à l'activité catalytique entraînant la perte de la structure tertiaire.
- Cette dénaturation est suivie par la mesure du temps de demi-vie de l'enzyme qui correspond, pour une température donnée, La plupart des enzymes montrent des vitesses d'inactivation thermique notables à partir de 30-35 La plupart des enzymes montrent des vitesses d'inactivation thermique notables à partir de 30-35 °C.
- Toutefois certaines sont particulièrement résistantes : il faut atteindre des températures de 70-80 °C et même 110-120 °C pour des amylases provenant d'organismes thermophiles pour obtenir une dénaturation de la protéine.. Toutefois certaines sont particulièrement résistantes : il faut atteindre des températures de 70-80 et même 110-120 °C pour des amylases provenant d'organismes thermophiles pour obtenir une dénaturation de la protéine.

7.2. pH :

Chaque enzyme a un pH optimal, au-delà ou en deçà duquel son activité peut diminuer.

L'activité enzymatique dépend fortement du pH et pour la plupart des enzymes. On distingue facilement une étroite zone dite de pH optimum où la vitesse de réaction est la plus grande, de part et d'autre de laquelle la vitesse décroît notablement. Cet effet peut être dû à trois actions indépendantes :

- un effet de dégradation irréversible des pH extrêmes sur l'enzyme, comportant, soit la dénaturation qui, par rupture de liaison non covalente, modifie la structure spatiale de l'enzyme, soit même la rupture de liaisons covalentes.
- un effet sur l'état d'ionisation du substrat s'il possède des groupes polaires que l'on peut éventuellement déduire du comportement d'analogues dépourvus de ces groupes ; enfin, un effet sur l'état d'ionisation de l'enzyme qui est le plus intéressant pour l'étude des enzymes.

7.3. Concentration en Enzyme et Substrat :

La vitesse de réaction augmente avec la concentration en substrat jusqu'à atteindre, au-delà duquel la vitesse devient constante.

7.4. Présence de Co-facteurs :

Certaines enzymes nécessitent des cofacteurs, comme des ions métalliques ou des molécules organiques (coenzymes), pour leur activité.

8. Applications Pratiques en Milieu Homogène

Les études enzymatiques en milieu homogène sont essentielles dans diverses applications industrielles et biologiques :

- **Industrie pharmaceutique** : Pour la production de médicaments, l'étude des enzymes permet de concevoir des inhibiteurs spécifiques, comme les médicaments antiviraux ou anticancéreux.
- **Médecine diagnostique** : Les tests de dosage enzymatique peuvent être utilisés pour diagnostiquer des maladies en mesurant les niveaux d'enzymes spécifiques dans le sang.
- **Biotechnologie** : L'utilisation des enzymes pour la fermentation, la production de biocarburants, ou la dégradation de déchets.
- **Alimentation** : Les enzymes jouent un rôle clé dans la transformation des aliments (ex. : enzymes dans la fabrication de fromage).

