



المدرسة العليا للتكنولوجيا - العيون
 +ⴰⵎⵏⴰⵏⵏⵉⵏⴰ ⴰⴷⵓⵎⴰⵔⵉⵏⴰ
 ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE - LAÂYOUNE

Biochimie métabolique

Notions de Bioénergétique

Génie Agrobiologie
Semestre 2

Pr. F. FAHMI

Année universitaire 2019/2020

1

Bioénergétique

1- Définition

La **bioénergétique** c'est l'étude des mécanismes de transformations (conversion) de l'énergie dans les tissus vivants.

- ✘ L'étude des transformations d'énergie qui se produisent dans une portion de matière = **Thermodynamique**.
- ✘ Les scientifiques emploient le terme **système** pour désigner la portion de matière étudiée, et **environnement** pour faire référence à ce qui est extérieur à celle-ci.

L'énergie se conserve
(constante)

+

L'entropie (degré de désordre) augmente

=

Principes de la thermo-dynamique

2

4- Énergie libre de Gibbs (G)

L'**énergie libre G**: quantité d'énergie contenue dans une molécule susceptible d'être libérée au cours d'une réaction chimique.

► G représente la partie d'énergie susceptible de fournir du travail.

a- Variation de l'énergie libre (ΔG)



$\Delta G > 0 \rightarrow GB > GA$ La réaction ne peut pas évoluer vers la droite

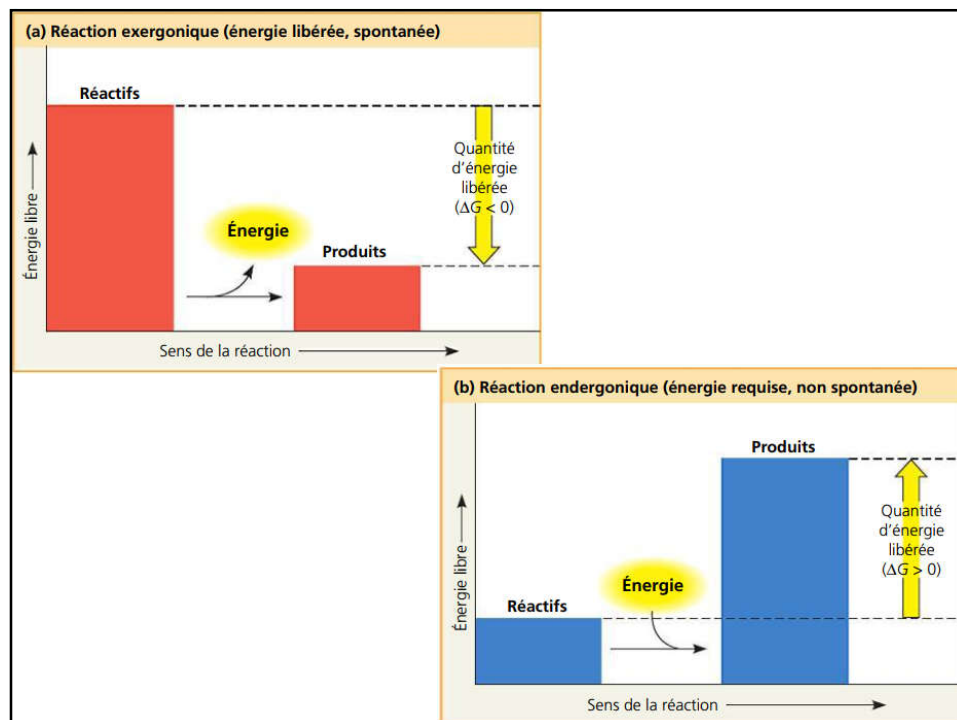
La réaction à besoin d'énergie \implies La réaction est endergonique

$\Delta G < 0 \rightarrow GB < GA$ La réaction se fait spontanément de gauche à droite

La réaction libère de l'énergie \implies la réaction est exergonique.

$\Delta G = 0 \rightarrow$ la réaction est en équilibre énergétique.

3



4

ΔG dépend :

- de la nature de la réaction
- du pH
- de la température
- des concentrations initiales de A et B

b- Variation de l'énergie libre dans la cellule

b-1 Caractéristiques de $\Delta G0'$ et $\Delta G0$

$\Delta G0'$ = variation d'énergie libre standard en **biochimie**

- à pH = 7
- à $t^\circ = 25^\circ\text{C}$,
- Pour une concentration de A et de B = 1M

$\Delta G0$ = variation d'énergie libre standard mesurée en **chimie** :

- à pH = 0
- à $t^\circ = 25^\circ\text{C}$,
- Pour une concentration de A et de B = 1M

$\Delta G0'$:

- * est indépendante des étapes de la réaction
- * Est une constante caractéristique pour chaque réaction
- * A une valeur invariable

5

b-2 ΔG réel

Soit la réaction : $A \rightleftharpoons B$

$$\Delta G \text{ réel} = \Delta G0' + RT \ln [B] / [A]$$

ΔG Réel = Variation d'énergie libre de Gibbs d'une réaction J / mol

$\Delta G0'$ = Variation d'énergie libre standard biologique de Gibbs J / mol

T : Température absolue ° kelvin ($0^\circ\text{C} + 273$)°Kelvin

R : Constante des gaz parfait (8.315 J/mol/degé)

B/A : Rapport des concentrations produits /réactifs

6

c- notion de couplage

Si $\Delta G > 0$, la réaction ne peut avoir lieu (endergonique) sauf si la réaction $A \rightarrow B$ est couplée à une autre réaction $B \rightarrow C$ exergonique.

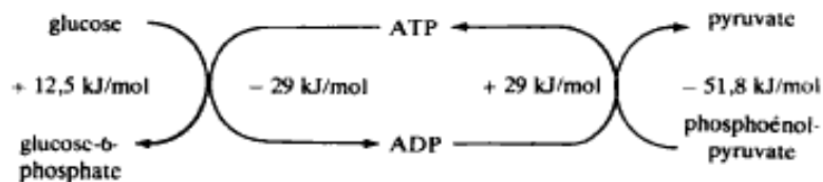
Avec :

$$[(\Delta G (B \rightarrow C) + \Delta G (A \rightarrow B))] < 0$$

Présence d'un intermédiaire commun aux deux réactions.

Le **couplage d'énergie** consiste à employer l'énergie dégagée par une réaction exergonique pour déclencher une réaction endergonique, en grande partie grâce à l'ATP.

- Dans la majorité des cas, l'ATP est la source d'énergie directe qui permet à la cellule de produire du travail.

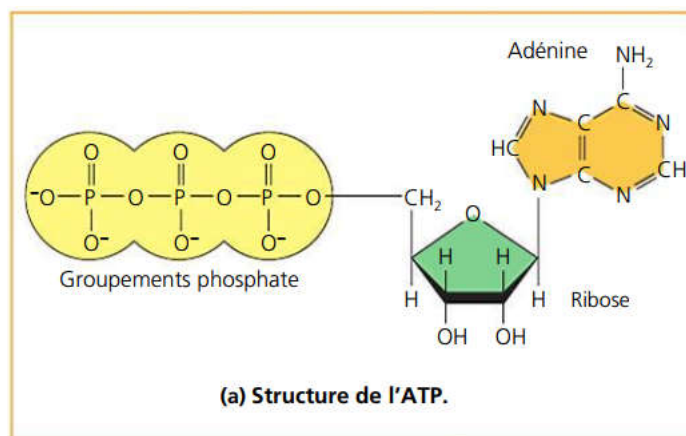


7

5- Liaisons à haut potentiel d'hydrolyse

a- La structure de l'ATP

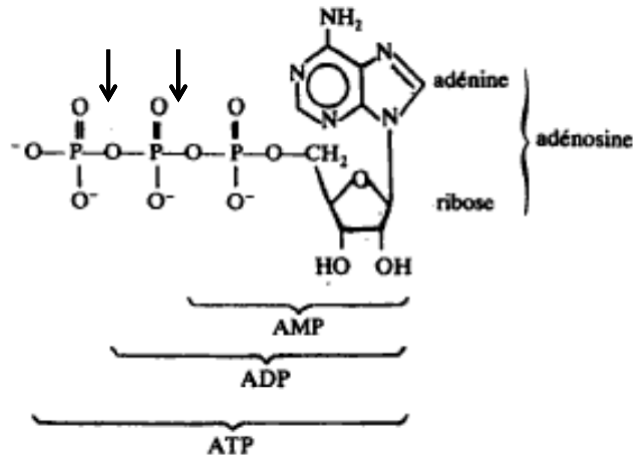
L'ATP (**adénosine triphosphate**) se compose du ribose, auquel sont liées la base azotée adénine et une chaîne de trois groupements phosphate.



8

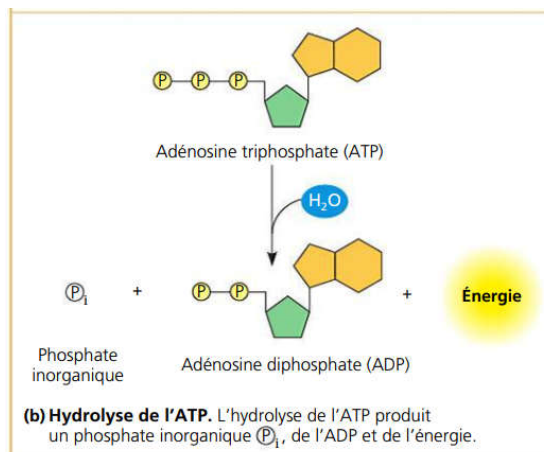
Caractéristiques d'ATP

- ATP (10^2 moles/cellule) = forme de stockage et de transport énergétique de la cellule.
- Deux liaisons riches en énergie.
- Durée de vie très brève (1 min) : renouvellement rapide.



9

b- L'hydrolyse de l'ATP



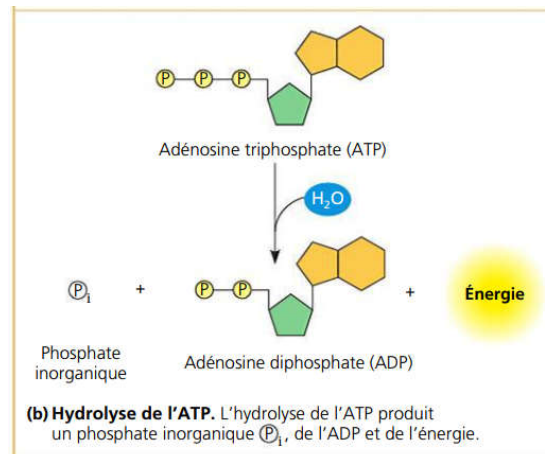
- Les liaisons entre les groupements phosphate de l'ATP peuvent être rompues par une réaction d'hydrolyse (H₂O).



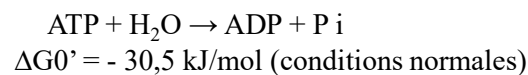
Libération de phosphate inorganique (HOPO₃²⁻) = Pi.

10

b- L'hydrolyse de l'ATP

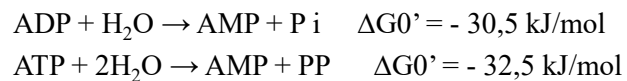


- Réaction exergonique; dégage 30,5 kJ d'énergie par mole d'ATP hydrolysée:



11

- L'ADP est encore riche en énergie. Et on obtient ensuite de l'AMP (adénosine monophosphate).
- Si on hydrolyse directement l'ATP pour donner l'AMP et le PP (pyrophosphate), on libère 32,5 kJ/mol.



- *ATP est intéressante grâce à l'énergie qu'elle peut générer lors de son hydrolyse.*
- *Pour former cette molécule d'ATP, il faudra de l'énergie pour former ses liaisons.*

12

d – Le classement énergétique des composés riches en énergie

Liaison riche en énergie si $\Delta G^0' < -25$ KJ/mol.

| | $\Delta G^0'$ kJ/mol | |
|--|-------------------------|-----------|
| Phosphoénolpyruvate | - 61,9 | Riche |
| 1,3-Bisphosphoglycérate (\rightarrow 3-Phosphoglycérate + P_i) | - 49,3 | |
| Créatine phosphate | - 43,0 | |
| PPi (\rightarrow 2 P_i) | - 33,4 | |
| ATP (\rightarrow AMP + PP_i) | - 32,2 | |
| Acétyl-CoA | - 31,4 | |
| ADP (\rightarrow AMP + P_i) | - 30,5 | |
| ATP (\rightarrow ADP + P_i) | - 30,5 | |
| <hr/> | | |
| Glucose-1-phosphate | - 20,9 | Non Riche |
| Fructose-6-phosphate | - 15,9 | |
| AMP (\rightarrow Adénosine + P_i) | - 14,2 | |
| Glucose-6-phosphate | - 13,8 | |
| Glycérol-1-phosphate | - 9,2 | |

13

Réactions d'oxydo-réduction et Potentiel d'oxydo-réduction

1- Notions d'oxydation et de réduction

Oxydation

Gain d'oxygène
Perte d'hydrogène
Perte d'électrons

Réduction

Perte d'oxygène
Gain d'hydrogène
Gain d'électrons

2- Réactions d'oxydo-réduction

- Dans une réaction d'oxydo-réduction il y a un couple d'oxydo-réduction constitué de 2 demi-réactions qui sont couplées:
 - un réducteur (donneur) qui fournit des H^+ (et des électrons) et *s'oxyde*.
 - un oxydant (accepteur) qui capte des H^+ (et des électrons) et *se réduit*.
- Le couple forme oxydée et forme réduite d'un même composé (AH_2/A) est appelé un couple Redox.

14

3- Potentiel d'oxydo-réduction standard

- Toute réaction d'oxydo-réduction est composée de 2 demi-réactions qui sont couplées et réversibles.
Exemple de couples : (AH₂/A) et (BH₂/B).
- Chaque demi-réaction est caractérisée par un potentiel d'oxydo-réduction E⁰.
- Le potentiel rédox E⁰ d'un couple d'oxydo-réduction (AH₂/A ou BH₂/B) mesure son affinité pour les électrons.
- Le potentiel rédox est une constante mesurée:
 - à 25°C.
 - à pH 7.
 - qui dépend de la concentration initiale des espèces oxydées et réduites.

15

- Mise en présence de 2 couples d'oxydo-réduction AH₂/A et BH₂/B :
le transfert des H⁺ d'un couple à l'autre dépend du potentiel rédox de chaque couple : il se fait du couple qui a le potentiel le plus bas vers celui qui a le potentiel le plus élevé.
- Si le potentiel rédox du couple B est plus élevé que celui du couple A : E_B > E_A
 B = l'oxydant = potentiel le plus élevé
 AH₂ = le réducteur = potentiel le plus bas

$$\Delta E = E_B - E_A > 0, \text{ on aura:}$$

$$\text{AH}_2 + \text{B} \longrightarrow \text{A} + \text{BH}_2$$

16

4- Variation d'énergie libre dans les réactions d'oxydo-réduction

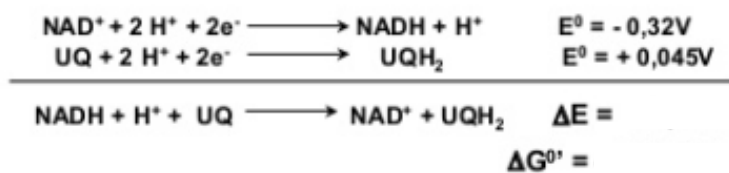
$$\Delta G^{\circ'} = - nF\Delta E^{\circ'}$$

n : nombre d'électrons échangés entre le réducteur et l'oxydant.

F : constante de Faraday (96,5 kJ/V/mol).

$\Delta E^{\circ'}$: la variation du potentiel d'oxydoréduction exprimé en Volt.

Exemple:



Plus la différence entre les potentiels rédox est élevée, plus l'énergie libérée par la réaction d'oxydo-réduction est forte.

17

المدرسة العليا للتكنولوجيا - العيون
 +ⵉⵍⵎⵉⵏ ⵜⵉⵎⵓⵔⵜ ⵜⵉⵏⵙⵉⵔⵉⵜ ⵜⵉⵖⵉⵏⵏⵉⵜ
 ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE - LAÂYOUNE



Biochimie métabolique

Cinétique enzymatique

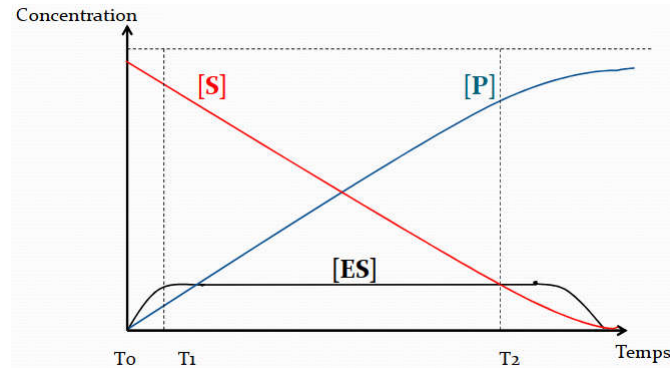
Génie Agrobiologie
 Semestre 2

Pr. F. FAHMI

Année universitaire 2019/2020

18

- Différentes phases de la réaction enzymatique



[S] : concentration du substrat, [P] concentration du produit,
[ES] concentration de la combinaison enzyme-substrat

Evolution de la cinétique enzymatique

19

Phases de la réaction enzymatique

| Différentes phases | Pré-stationnaire (T0 – T1) | Stationnaire (T1 – T2) | Post stationnaire (T2 - ∞) |
|--------------------|---|---|---|
| Caractéristiques | Enzyme mise en présence d'excès de substrat Combinaison ES très rapide | Enzyme saturée par le substrat Combinaison ES est à concentration maximale constante: Vitesse initiale (Reste constante tant que le substrat est à concentration saturante de l'enzyme) | Diminution de S de manière significative au bout d'un temps plus au moins long selon l'enzyme |

Grande quantité en S : La vitesse de la réaction est indépendante de la concentration en substrat : **Réaction d'ordre 0**

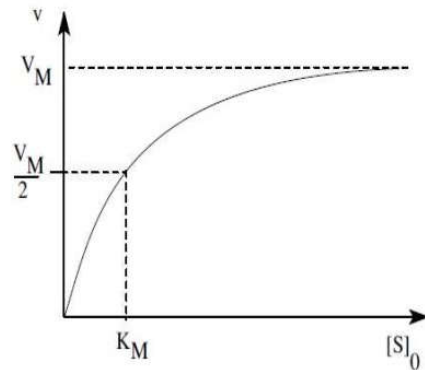
Faible quantité de S : La vitesse de la réaction est proportionnelle à la concentration en substrat : **Réaction d'ordre 1**

Travailler en concentration saturante en substrat

20

- Notion de vitesse initiale

La vitesse de la réaction enzymatique augmente avec la concentration de substrat jusqu'à atteindre la vitesse maximale V_{max} (saturation de l'enzyme par S).



La courbe de saturation de l'enzyme par son substrat

- La vitesse initiale est la vitesse tout au début de la réaction ;
- La phase initiale (pré-stationnaire) est très brève \Rightarrow vitesse initiale est la vitesse à la phase stationnaire ou l'enzyme est saturée par son substrat.
- La vitesse étudiée est toujours la vitesse initiale.

21

- La cinétique michaelienne

Signification de la vitesse maximale V_{max} et constante de Michaelis K_m

❖ V_{max}

- ✓ Correspond à la vitesse initiale quand l'enzyme est saturée par son Substrat
- ✓ Renseigne sur l'**efficacité catalytique** de l'enzyme $V_{max} = k_3 [Et]$
 $\Rightarrow V_{max} = k_{cat} [Et]$
- ✓ k_{cat} : Turn Over Number « **TNO** », nombre de molécules de substrat transformé en produit par unité de temps, c'est l'**efficacité catalytique** de l'enzyme: la fréquence de l'acte catalytique (s^{-1}).

❖ K_m

- ✓ **Affinité** de l'enzyme pour le substrat, K_m est d'autant plus élevée que l'affinité de l'enzyme pour le substrat est plus faible (inversement proportionnelle à l'affinité).
- ✓ Concentration initiale de substrat pour laquelle $V_i = 1/2 V_{max}$, donc la moitié des sites actifs de l'enzyme est occupée par le substrat.

22

L'unité enzymatique

Unité internationale:

Quantité d'enzyme capable de catalyser la transformation d'une micromole de substrat par min, dans des conditions optimales de mesure

$$UI = \mu\text{mol}/\text{min} = \text{Activité enzymatique} = V_{\text{max}}$$

Katal:

Quantité d'enzyme qui catalyse la transformation d'une mole de substrat par seconde

Activité enzymatique spécifique:

Nombre de molécules de substrat transformées par min et par milligramme d'enzyme

$$\frac{\mu\text{mol}/\text{min}}{\text{mg de protéine}} = \frac{UI}{\text{mg de protéine}}$$

Mesure le degré de pureté d'une préparation enzymatique

Activité enzymatique moléculaire:

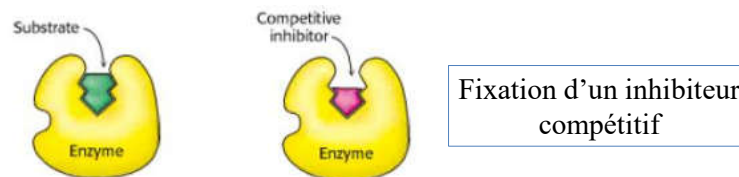
Nombre de molécules de substrat transformées par min et par molécule d'enzyme

$$\frac{\mu\text{mol}/\text{min}}{\mu\text{mol de protéine}} = \frac{UI}{\mu\text{mol de protéine}}$$

23

b-1- Les inhibiteurs réversibles

- Les inhibiteurs compétitifs
- Sont des analogues structuraux du substrat S (se fixent sur le même, site actif que le substrat).



- L'affinité de l'enzyme au substrat diminue => K_m augmente.

$$K_m = K_m \left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right)$$

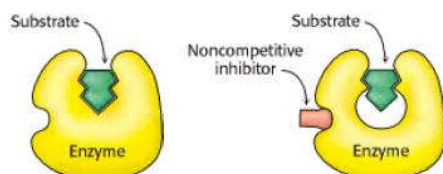
- La V_{max} est inchangée.
- L'inhibition est levée par un excès de substrat.

$$v = v_{\text{max}} \frac{[S]}{K_m \left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right) + [S]} \quad \frac{1}{v} = \frac{K_m \left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right)}{v_{\text{max}}} \cdot \frac{1}{[S]} + \frac{1}{v_{\text{max}}}$$

24

- Les inhibiteurs non compétitifs

- Se combinent à l'enzyme à un site différent à celui du substrat.



Fixation d'un inhibiteur non compétitif

- L'affinité de l'enzyme n'est pas modifiée, K_m inchangée.
- La V_{max} diminue.

$$V_m = \frac{V_m}{\left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right)}$$

$$v = \frac{V_{max}}{1 + \frac{[I]}{K_i}} \cdot \frac{[S]}{K_m + [S]} \quad \frac{1}{v} = \frac{K_m \left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right)}{V_{max}} \cdot \frac{1}{[S]} + \frac{1 + \frac{[I]}{K_i}}{V_{max}}$$

25

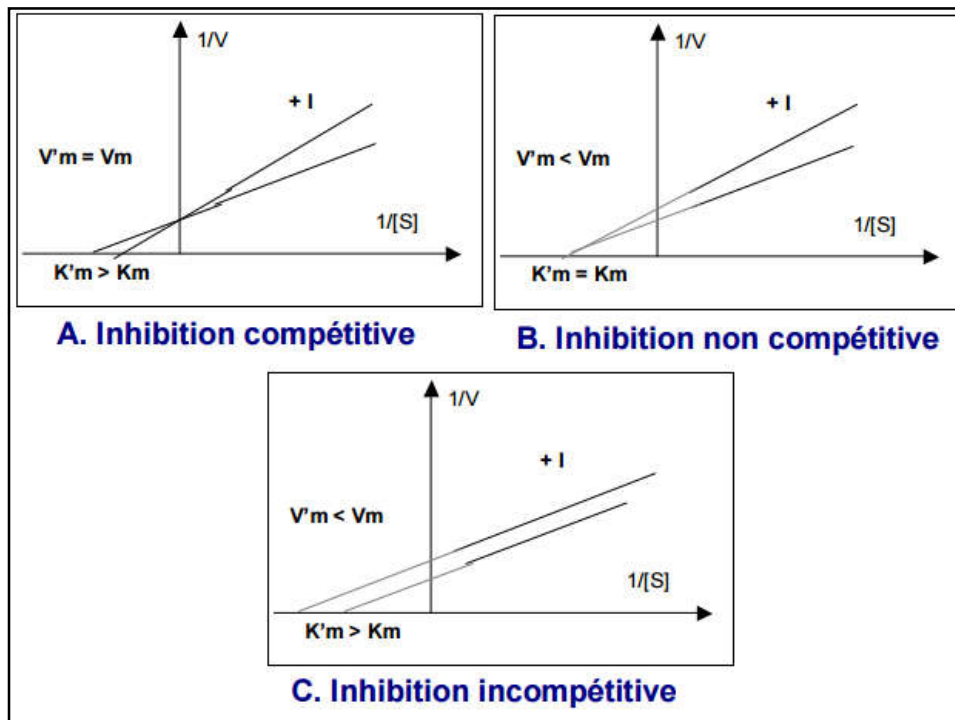
- Les inhibiteurs incompétitifs

- L'inhibiteur ne se fixe pas à l'enzyme libre mais à la combinaison ES.
- Modification de K_m , et de V_{max} :

$$K'_m = K_m \left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right) \quad V_m = \frac{V_m}{\left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right)}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{K_m}{V_{max}} \cdot \frac{1}{[S]} + \frac{1 + \frac{[I]}{K_i}}{V_{max}}$$

26



27

b-2- Les inhibiteurs irréversibles

Ils se lient de façon covalente à site important de l'enzyme entraînant une inhibition définitive, l'inhibiteur est dit inhibiteur suicide.

b-3- Les activateurs

Plusieurs types existent :

- **Les ions métalliques** : ils favorisent une bonne fixation de l'enzyme, participent à la catalyse, ex : l'ADN polymérase nécessite le Mg^{2+} .
- **La protéolyse limitée (Pro-enzyme)**: par clivage spécifique de liaisons peptidiques, permettant l'apparition du site actif, ex : la chymotrypsine.
- **Modifications covalentes**: l'enzyme peut exister entre deux formes interconvertibles, l'une active et l'autre non-active, ex : phosphorylation et déphosphorylation

28

المدرسة العليا للتكنولوجيا - العيون
 ⵜⴰⴷⵓⵔⴰ ⵜⴰⵏⵔⴰⵏⵜ ⵜⴰⵣⵓⵔⵉⵜ ⵜⴰⵉⵔⴰⵙⵉⵔⵉⵜ
 ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE - LAÂYOUNE



Biochimie métabolique
**Notion de catabolisme et
d’anabolisme**

Génie Agrobiologie
Semestre 2

Pr. F. FAHMI

Année universitaire 2019/2020

29

1- L’Anabolisme et catabolisme

Anabolisme

- Ensemble des réactions, responsables de la synthèse des produits complexes à partir d’éléments ou de molécules simples.
- Cette phase nécessite un apport énergétique suffisant.

Catabolisme

- Dégradation de molécules complexes avec la formation de déchets et une production plus ou moins importante d’énergie.

30

2- L'autotrophie et l'hétérotrophie

- Certains organismes peuvent réaliser la synthèse de tous leurs constituants uniquement à partir de composés minéraux, mais une source d'énergie est indispensable.
- Ces organismes dits **autotrophes** sont capables d'introduire un apport d'énergie extérieure (É chimique ou É lumineuse).

Selon la forme d'énergie on distingue :

- ✗ **Les autotrophes par photosynthèse** (*phototrophes*) : utilisent l'énergie lumineuse par l'intermédiaire de leurs pigments chlorophylliens
- ✗ **Les autotrophes par chimiosynthèse** (*chimioolithotrophes*) : l'énergie provient des réactions d'oxydation portant sur des composés minéraux, dérivés de l'azote et du soufre.
- L'énergie capturée par les autotrophes est emmagasinée au cours de l'anabolisme sous forme d'énergie chimique dans les glucides en particulier.
- Elle sera libérée et utilisée au cours des réactions du catabolisme.

31

- Les autres organismes ont besoin de matières organiques diverses fournissant à la fois la matière et l'énergie : ce sont des **hétérotrophes** (*chimio-organotrophes*).
- Ils sont incapables de capturer et d'utiliser l'énergie lumineuse.
- Chez les hétérotrophes l'énergie nécessaire aux synthèses provient de l'oxydation des substances organiques au cours de phénomènes de la respiration et des fermentations.

32



المدرسة العليا للتكنولوجيا - العيون
 +ⴷⵓⵏⴰ ⵜⴰⵏⵓⵎⴰⵏⵜ ⵜⴰⵏⵓⵎⴰⵏⵜ ⵜⴰⵏⵓⵎⴰⵏⵜ
 ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE - LAÂYOUNE

Biochimie métabolique

Glycolyse et Fermentation

Génie Agrobiologie Pr. F. FAHMI
 Semestre 2

Année universitaire 2019/2020

33

I- GLYCOLYSE

Introduction

- La **Glycolyse** est une voie de **dégradation du glucose** avec production d'**ATP** et des **métabolites intermédiaires** qui vont être repris par d'autres voies métaboliques.
- Elle se déroule entièrement dans le **cytosol** : fraction liquide du cytoplasme.
- La glycolyse conduit à la formation de :
 - **2 ATP**,
 - **2 NADH,H⁺** et
 - **2 Pyruvates**
- Au cours de la glycolyse anaérobie (en absence d'oxygène): le pyruvate se transforme selon l'équipement enzymatique de la cellule soit en:
 - Lactate: le glucose subit une fermentation lactique
 - Éthanol: le glucose subit une fermentation alcoolique

34

1- Les étapes enzymatique de la glycolyse

- La glycolyse est une série de 10 réactions enzymatiques catalysées par 10 enzymes.
- Elle est divisée en deux grandes phases :
 - ➡ une 1ère phase au cours de la quelle :
 - le glucose se transforme en **Glycéraldéhyde 3- P** .
 - Cette phase est consommatrice de 1'ATP
 - ➡ une 2ème phase, au cours de la laquelle:
 - **Le Glycéraldéhyde 3- P** s'oxyde pour donner **1 Pyruvate, 2 ATP et 1 NADH, H⁺**
 - Phase commune à tous les hexoses