

Cours de cytophysiologie (2^{ème} semestre)

CHOUDAR.N

Maitre De Conférence .B

Préclinique /Département de première Année

Institut des sciences vétérinaires –Khroub /Univ.Constantine1

PREREQUIS ET OBJECTIFS DU COURS

PREREQUIS → Notions de base sur la cytologie, la biologie animale et sur l'expérimentation cellulaire

Objectifs → A l'issue de cet enseignement, l'étudiant arrivera à :

6 chapitres pour un volume horaire de :
30h cours
15h TDs

- **Comprendre** la bioénergétique, la production de l'ATP par la cellule , ainsi que les modes de respiration de la cellule .
- **Retenir** le fonctionnement physiologique des cellules nerveuses et musculaires .
- **Comprendre** le mécanisme du vieillissement et de la mort cellulaire .
- **Avoir des notions** de bases sur les cellulaires de l'immunité .

Chapitre VI : La bioénergétique

Introduction

Que signifie la bioénergétique?

→ Au cours de ses fonctions vitales, la cellule produit de l'**énergie**, il y a échange de celle-ci entre les molécules biologiques

Utilisation de la bioénergétique

?

→ Pour les fonctions vitales et l'entretien de la cellule :

- l'**auto assemblage** des macromolécules,
- la **production** des déchets et leur **excrétion**,
- l'**instruction génétique** qui va du noyau vers le cytosol,
- le **trafic vésiculaire** golgien.

Chapitre VI : La bioénergétique

Introduction

Rôle important
de la cellule 
végétale dans la
bioénergétique ?

l'*énergie* lumineuse est transformée en composés organiques riches en *énergie*.

La majorité des autres organismes vivants (procaryotes et animaux) puisent directement de cette *énergie* en se nourrissant de ces plantes, ou d'organismes qui se nourrissent eux même de plantes.

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

Nous apporterons
des



1-1 Des **Définitions** élémentaires

Nous
expliqueront



1-2 Les Principales lois de la thermodynamique :

-Premier principe : **conservation** de l'**énergie**

- Deuxième principe : **conversion** de l'**énergie** en chaleur

-l'**entropie**

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-1 Définitions élémentaires

1-1-1 Travail, énergétique

L'**énergie** est une propriété de la **matière** qui permet à celle-ci de se **transformer** en **travail** ou à l'inverse de se **former** comme résultat d'un **travail**.

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-1 Définitions élémentaires

1-1-2 Les deux états alternatifs de l'énergie

L'énergie est la capacité de *modifier* ou de *déplacer* un objet. Elle existe sous deux états alternatifs : l'énergie potentielle, et l'énergie cinétique :

Une cellule nerveuse au **repos** possède une énergie potentielle si la concentration en ions de sodium reste élevée sur la face externe de sa membrane plasmique et faible sur la face interne. A l'ouverture des canaux sodium après stimulation, le déplacement unidirectionnel du flux ionique vers l'intérieur de la cellule, est une forme d'énergie cinétique qui peut servir à l'accomplissement d'un travail dans le cytosol de la cellule nerveuse et la **transmission de l'influx** nerveux (potentiel d'action).

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-1 Définitions élémentaires

1-1-3 Les deux facteurs de mesure de l'énergie

Le travail ou **énergie** dépensée dépend de deux facteurs : un facteur **potentiel**, et un facteur de **capacité**. Le premier, est proportionnel à l'intensité du champ de force, alors que le deuxième donne une idée sur la taille de l'objet ou molécule considérée. Pour le déplacement des ions de sodium (ions chargés), le facteur potentiel est le voltage, et le facteur de capacité est la charge des particules. En effet, si l'un de ses deux facteurs augmente, la quantité d'**énergie** augmente aussi.

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-1 Définition de la thermodynamique

L'**étude** des transformations d'énergie dans une portion de matière se nomme ***thermodynamique***. La portion de matière constitue le **système** (la cellule) et tout ce qui est externe, représente l'environnement, comme la cellule dans l'organisme.

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-1 Définition de la thermodynamique

Les organismes vivants sont des systèmes ouverts



Échange d'énergie (échange de matière)



absorbent
l'*énergie*
(lumière, ou
molécules
organiques



dégagent de la chaleur et éliminent dans l'environnement des déchets métaboliques tels que le dioxyde de carbone.

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-2 lois de la thermodynamique

Nous avons **deux principes** fondamentaux qui expliquent les phénomènes de la *thermodynamique*.

1-2-2-1 Premier principe de la thermodynamique : *conservation* de l'énergie

1-2-2-2 Deuxième principe de la thermodynamique : *conversion* de l'énergie en chaleur

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-2 lois de la thermodynamique

1-2-2-1 Premier principe de la thermodynamique : *conservation* de l'énergie



La quantité d'*énergie* dans un système ou dans l'univers est *constante*, ne peut pas être détruite, mais peut être *transférée* et *transformée*

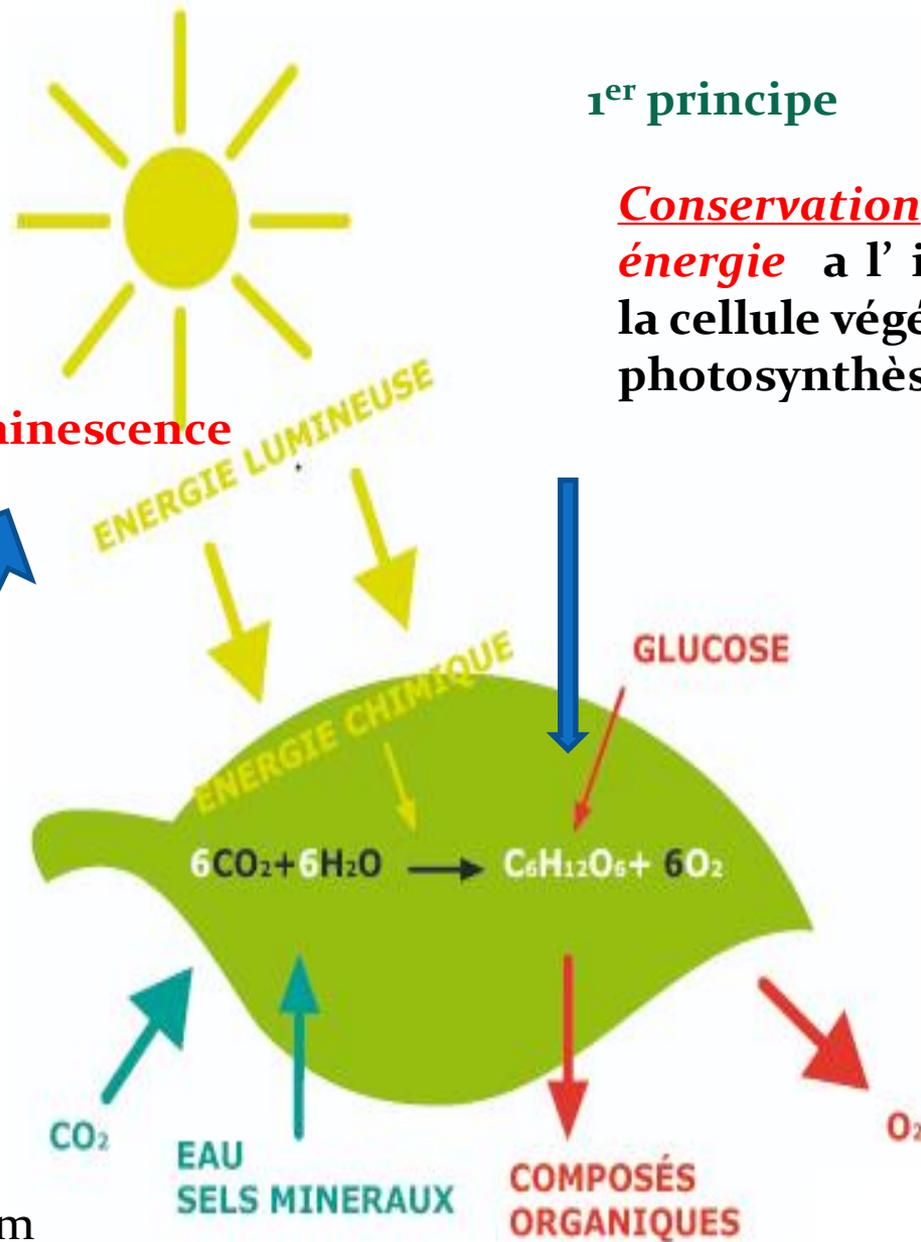
Poisson lumineux.



Bioluminescence



Luciole . Coléoptère dont le nom scientifique = lamproyridae



Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-2 lois de la thermodynamique

1-2-2-1 Premier principe de la thermodynamique : *conservation* de l'énergie



La quantité d'énergie dans un système est dite énergie **interne** (E), sa modification ou variation durant une transformation est donnée par la formule

$\Delta E = Q - W$. Ou, W : énergie du travail. Q : énergie calorifique. J : joules. Si on considère un système qui fournit un travail W en dégageant une quantité de chaleur Q , il existe une proportionnalité entre Q et W . les quantités de chaleur sont exprimées en joules. Soit $W = JQ$.

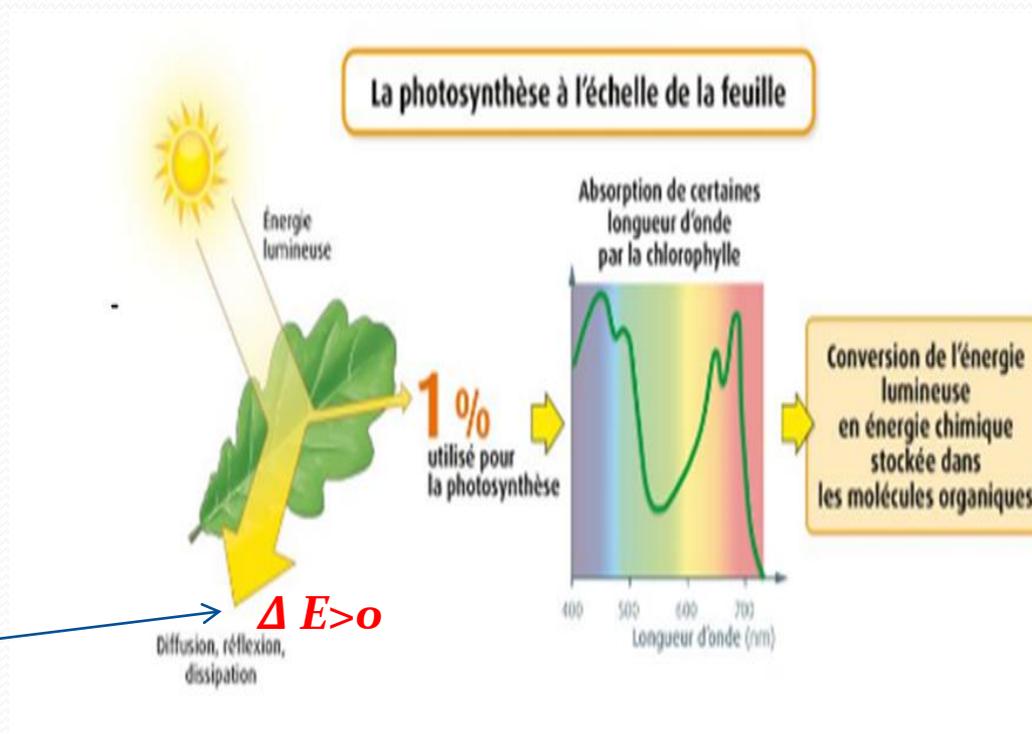
Chapitre VI : La bioénergétique

Selon la formule : $\Delta E = Q - W$, la variation de l'énergie interne peut être, négative, positive ou nulle.



cela veut dire, qu'en fonction du processus de transformation étudié, l'énergie interne (E) finale du système biologique peut être supérieure, inférieure, ou égale à son énergie interne de départ.

Le jour, la lumière absorbée par les pigments des chloroplastes, le CO_2 est converti en glucose. Tant que le cellule absorbe la lumière, son (E) augmente



La nuit, les glucides sont oxydés en CO_2 dans les mitochondries, l'(E) de la cellule diminue, elle sert à l'activité nocturne.

$\Delta E < 0$

Modification de l' (E) du système (feuille individuelle d'une plante)

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-2 lois de la thermodynamique

Quand le système n'effectue **aucun travail** sur son environnement ou l'inverse. La variation de l'**énergie** interne est égale à la variation de la chaleur, soit $\Delta E = \Delta Q$, c'est l'**enthalpie (H)** : par définition, c'est la variation de chaleur d'une réaction à pression et volumes constants.

$$\Delta H/\text{mole de glucose} = - 2800 \text{ kj}$$



Si de la chaleur est absorbée par le système (gagnée), l'énergie interne du système augmente, si la chaleur est perdue, son énergie interne diminue. Dans un système sous pression et volume constant, les réactions qui perdent de la chaleur sont dites **exothermiques** et celles qui en gagnent sont dites **endothermiques**.

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-2 lois de la thermodynamique

1-2-2-2 Deuxième principe de la thermodynamique : *conversion* de l'énergie en chaleur



Ce guépard , en courant , convertira l'*énergie* chimique des aliments ingérés en énergie cinétique et en d'autres formes d' énergie, qu'arrive t-il a cette *énergie* , une fois qu'elle a effectué différents processus biologiques ?

Le **Deuxième** principe répond a cette question

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-2 lois de la thermodynamique

1-2-2-2 Deuxième principe de la thermodynamique : **conversion** de l'énergie en chaleur



A chaque transfert, ou transformation d'**énergie**, une quantité **devient inutilisable** pour effectuer un travail. Dans la plupart des transformations, les formes d'énergie utilisables sont **converties**, partiellement en **chaleur**, causée par le mouvement aléatoire des atomes ou des molécules (translation, rotation, vibration). Seule une petite fraction de l'énergie chimique contenue dans les aliments est utilisée pour le mouvement (déplacement des animaux), le reste, se **perd** sous forme de **chaleur**, qui se disperse dans l'environnement.

Dans tout système échangeant de l'**énergie**, cas de beaucoup de réactions biochimiques, si la chaleur est perdue par le système, **Q** est négatif. Dans ce cas on doit écrire : $W = -JQ$, ce qui revient à : $W + JQ = 0$.

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-2 lois de la thermodynamique

1-2-2-2 Deuxième principe de la thermodynamique : *conversion* de l'énergie en chaleur



Lors des réactions chimiques qui effectuent plusieurs formes de travail , les cellules vivantes convertissent des formes organisées d'énergie en **chaleur** .

Un système peut utiliser de la chaleur pour accomplir un **travail** , seulement si une différence de température provoque la circulation de la chaleur d'un endroit plus chaud a un endroit plus froid . Si la température est uniforme , comme a l'intérieur de la cellule , l' **énergie** thermique sert seulement a réchauffer l'organisme (la chaleur produite peut rendre une pièce bondée inconfortable , car une multitude de réactions chimiques se déroulent dans le corps de chaque individu)

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-3 l'entropie

Selon le **deuxième principe** de thermodynamique, une perte d'**énergie** est inévitable au cours du fonctionnement d'un organisme vivant. Chaque transfert ou transformation, crée un **désordre** dans le système ou dans l'univers. Les scientifiques mesurent ce **désordre** par une fonction appelée entropie (S) ; ce **désordre** est associé aux mouvements aléatoires des particules de matière qui ne peuvent être contraints d'effectuer un travail orienté. En d'autres termes, l'**entropie** est l'**énergie**, non utilisable par le système .

Chapitre VI : La bioénergétique

1-Lois de la thermodynamique et l'idée de l'entropie

1-2 Principales lois de la thermodynamique

1-2-3 l'entropie

Tout échange d'énergie , augmente **l'entropie** .

Exemple : la libération de la chaleur lors de l'**oxydation** du glucose cellulaire ou de la **friction** engendrée par le flux sanguin dans un vaisseau, est un exemple concret de l'augmentation d'**entropie**, car cette énergie thermique, n'est utilisée que pour augmenter la vitesse des mouvements aléatoires des molécules, en aucun cas, elle ne peut être orientée pour effectuer un travail.

Chapitre VI : La bioénergétique

2-l'énergie libre

2-1 Définition

L'**énergie** libre dite **enthalpie libre**, est la portion de l'énergie d'un système qui peut produire un travail à une température et à une pression constante, comme c'est le cas dans une cellule. En d'autre terme, c'est l'énergie utilisable ou disponible pour effectuer un travail (G).

L'**énergie** totale d'un système (H), réuni l'**énergie** libre (G) et l'entropie (S) dans la formule :

$H = G + T S$. ou T est la température absolue en degrés Kelvin ($K = ^\circ C + 273$).

Chapitre VI : La bioénergétique

2-l'énergie libre

2-2 Variation du niveau d'énergie libre

dans une réaction **chimique** et **biochimique** spécifiques, les variations du niveau d'**énergie** libre se calculent par la formule suivante :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S :$$

ΔH = la variation d'**enthalpie** du système (équivalent de ΔE dans un système biologique).

ΔS = est la variation d'entropie du système

Chapitre VI : La bioénergétique

2-l'énergie libre

2-2 Variation du niveau d'énergie libre

cette formule
 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$



Permet de voir si un
processus métabolique est
spontané (sans apport
d'énergie) ?



ΔG est négatif, Donc le
système :



C'est un processus
exergonique

diminue de
son enthalpie
(H)

Et augmente de
son entropie
(S)

Les processus où la valeur de ΔG est positive ou égale à 0 ne sont jamais spontanés, ils sont dits endergoniques.

Chapitre VI : La bioénergétique

2-l'énergie libre

2-3 Energie libre et métabolisme

2-3-1 Réactions exergoniques et endergoniques dans le métabolisme

Chapitre VI : La bioénergétique

2-l'énergie libre

2-3 Energie libre et métabolisme

2-3-1-1 Réactions exergoniques

Une réaction exergonique s'accompagne spontanément d'un dégagement net d'**énergie libre** (G diminue) la variation de l'énergie libre ΔG a une valeur **négative**

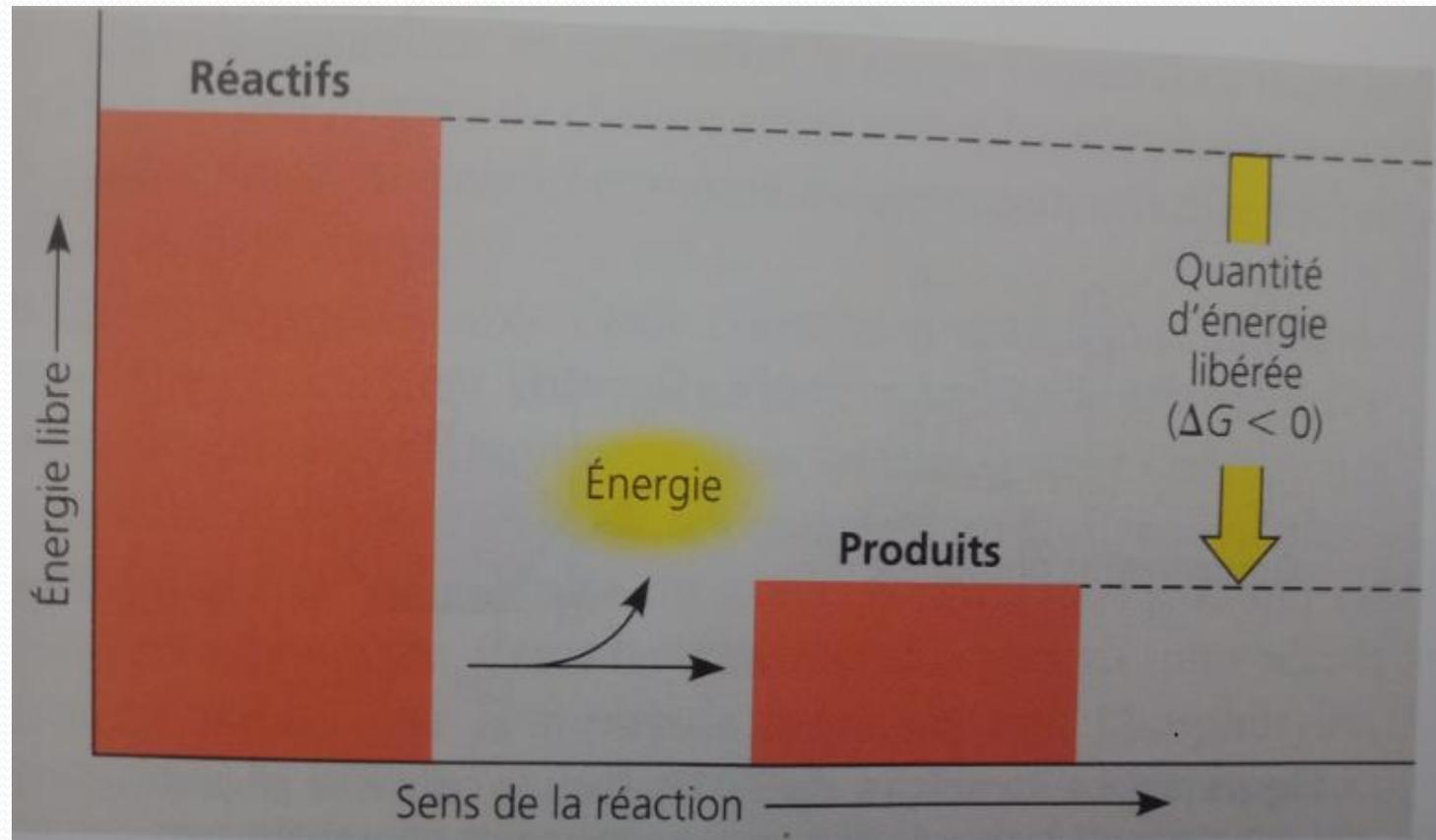


Fig.1. Réaction exergonique (dégagement d'énergie)

Chapitre VI : La bioénergétique

2-l'énergie libre

2-3 Energie libre et métabolisme

2-3-1-1 Réactions exergoniques

Plus la perte d'**énergie** libre est grande, plus la quantité de travail possible est grande

Ex: la dégradation d'une mole (180g) de **glucose** lors de la respiration aérobie cellulaire (Conditions physiologiques : 25°C, pH 7)



$\Delta G = -2870 \text{KJ/Mol}$:

donc **2870KJ** d'**énergie** sont libérés pour produire du travail, les produits ($6\text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$) ont donc 2870KJ d'énergie de moins que les réactifs ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$)



C'est une réaction **exergonique**

Chapitre VI : La bioénergétique

2-l'énergie libre

2-3 Energie libre et métabolisme

2-3-1-2 Réactions endergoniques

Une réaction endergonique absorbe l'**énergie** libre de son environnement.

ΔG a une valeur **Positive** = énergie minimale requise

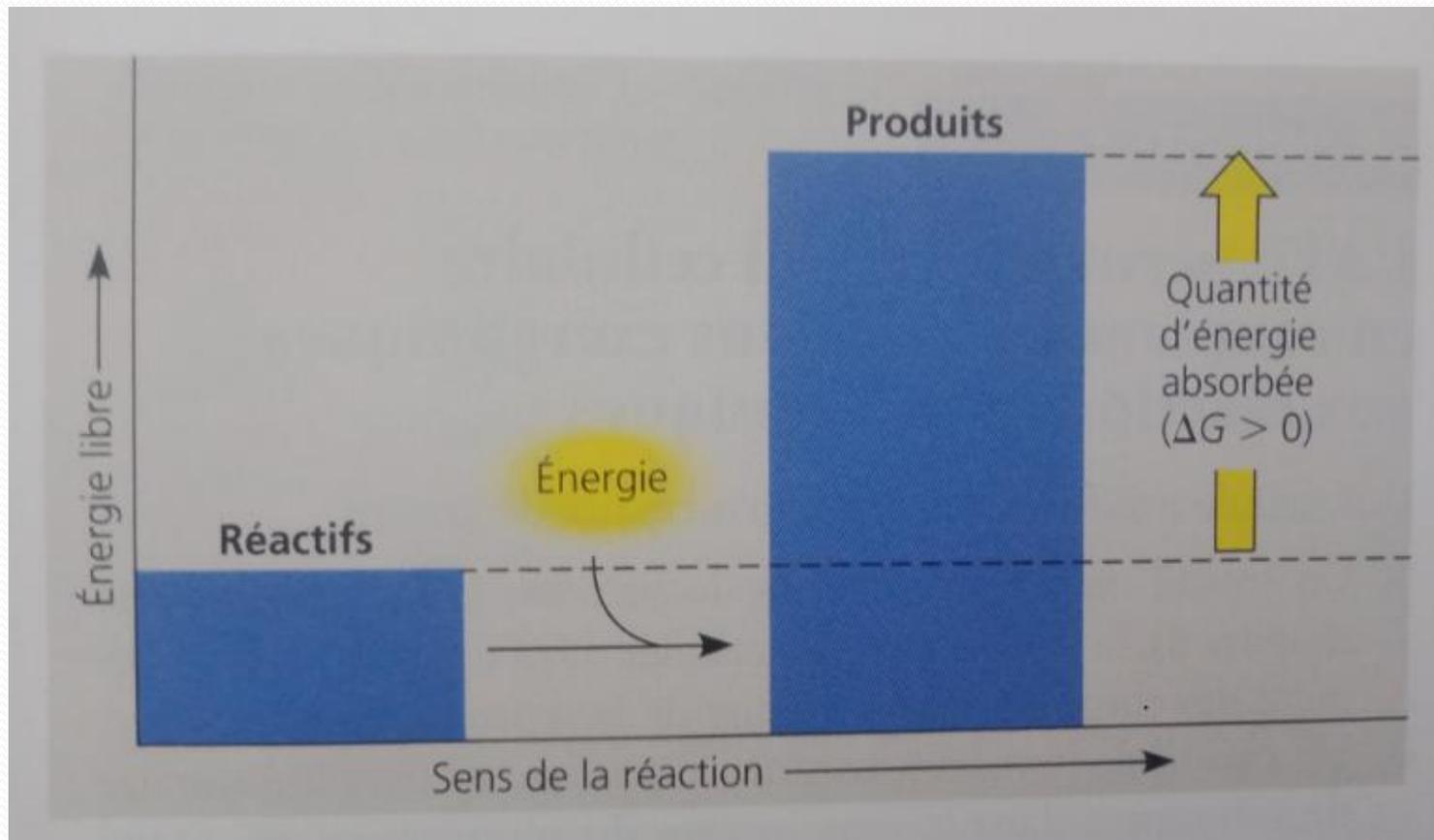


Fig.2. Réaction endergonique (énergie requise)

Il est important de noter que si une réaction, métabolique ou chimique, est **exergonique** dans un sens, elle est forcément **endergonique** dans le sens inverse, autrement dit, une réaction réversible ne peut libérer de ***l'énergie*** dans les deux directions.

Chapitre VI : La bioénergétique

2-l'énergie libre

2-3 Energie libre et métabolisme

2-3-2 Equilibre ou métabolisme stable

dans un système fermé



Les réactions métaboliques sont réversibles et équilibrées.

A l'équilibre, la ΔG est à son minimum ($\Delta G = 0$), le système ne peut pas fournir de travail.

Dans un système ouvert
(cellule dans un organisme animal)

Les réactions métaboliques sont irréversibles , n' atteignent jamais un état d'équilibre .



L'absence d'un état d' équilibre est une caractéristique vitale .



Exemple : enchainement des réactions métaboliques dans la respiration cellulaire :

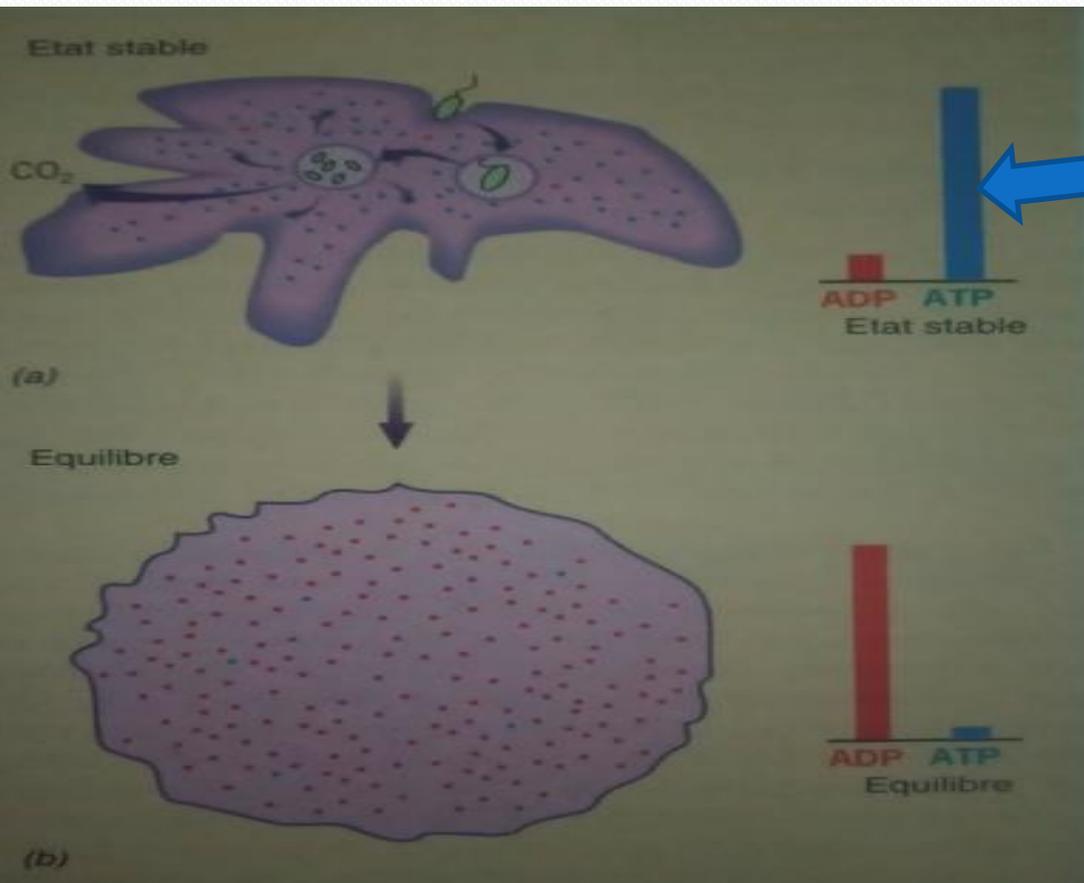
La dégradation du **glucose** se fait dans un enchainement de réactions **irréversibles** , dans ce processus , les produits d'une réaction seront les réactifs de celle qui suit . Elles ont lieu grâce a l'énorme différence d' **énergie** libre entre le **glucose** et CO₂ et l'H₂O, au terme du processus . Tant qu'elle reçoit un apport constant de **glucose** ou d'autres sources d' **énergie** et qu'elle peut rejeter les déchets dans son environnement , la cellule ne peut jamais atteindre un **équilibre** , elle continue a produire ce travail essentiel a la vie .

Alors , en absence d' équilibre , quel état peut atteindre un métabolisme Cellulaire ?



dans un système ouvert, le métabolisme se trouve dans un état **stable** (steady)

Vivante , l'amibe absorbe des sources d' **énergie** , et continue a produire de l'**ATP**



Quand l'amibe meurt, les concentrations en **ADP** et **ATP** se dirigent vers leur valeur d'équilibre.



Fig.3

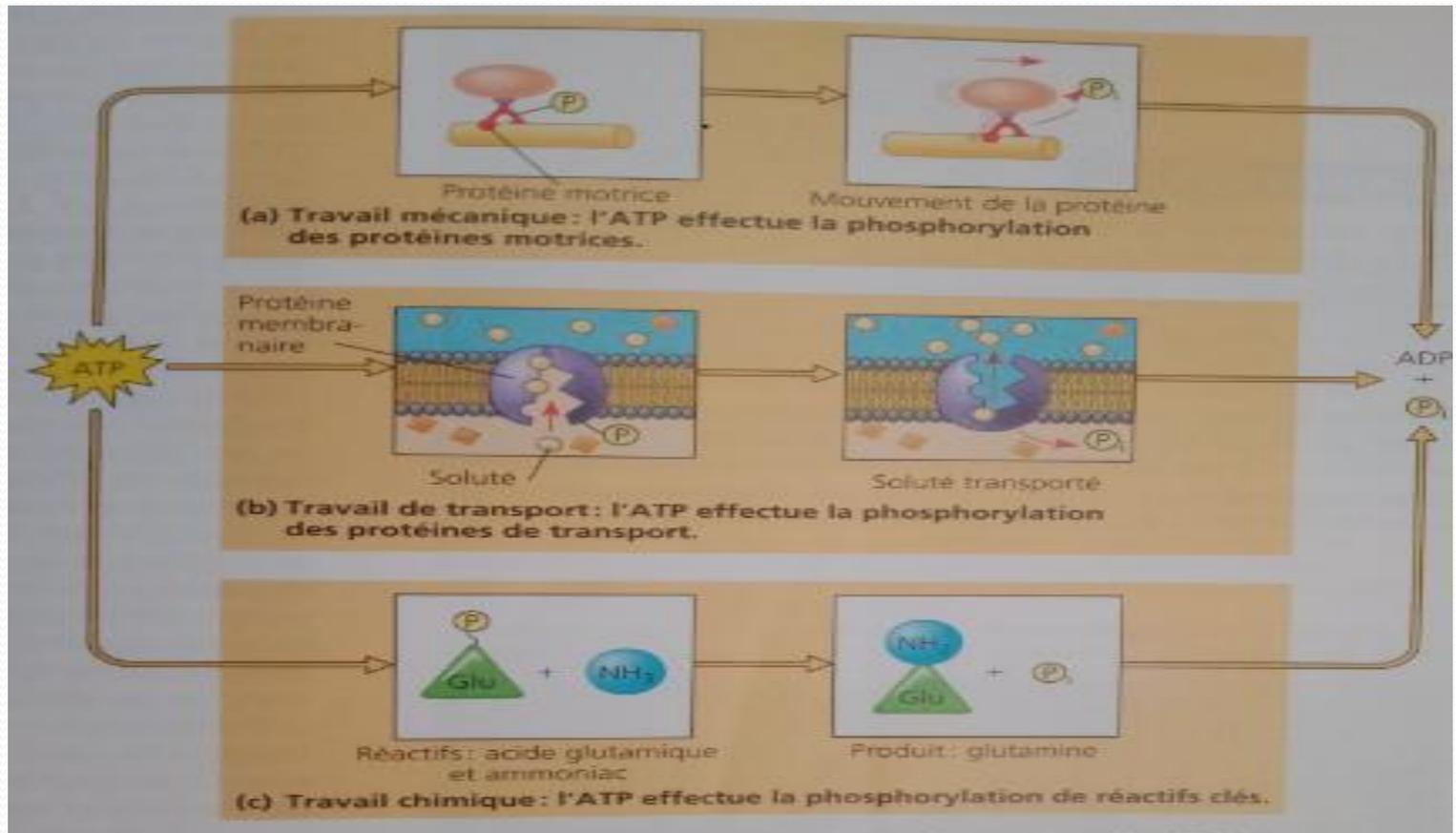
Chapitre VI : La bioénergétique

3-L'ATP

3-2 Structure et cycle de l'ATP

L'**ATP** est une molécule produite par la cellule vivante, permet le transfert d'**énergie** à l'intérieur du cytoplasme, c'est la source d'**énergie** directe, qui permet à la cellule de produire un travail.

trois types
principaux
de travail

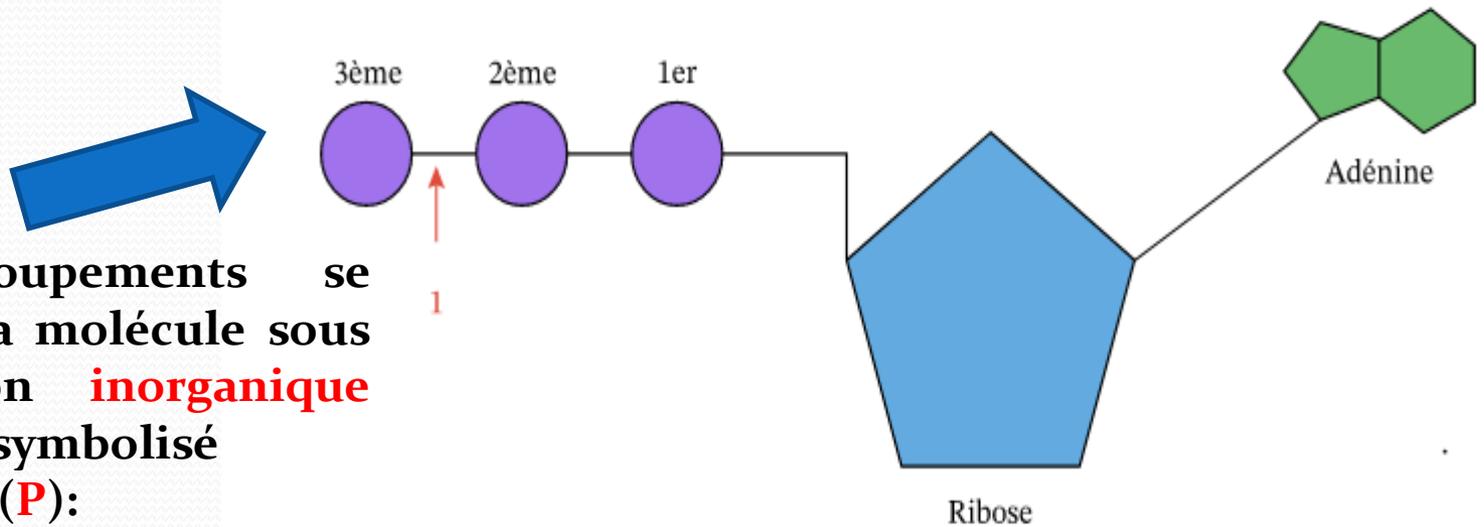


Chapitre VI : La bioénergétique

3-L'ATP

3-2 Structure et cycle de l'ATP

3-2-1 Structure de l'ATP



Un des groupements se sépare de la molécule sous forme d'ion **inorganique phosphate**, symbolisé par la lettre (**P**): de l'**énergie** requise est libérée

Fig.4 : schéma montrant la structure d'une molécule d'ATP dotée d'une base azotée, d'un sucre **ribose** à cinq carbones et de trois groupes **phosphate**.

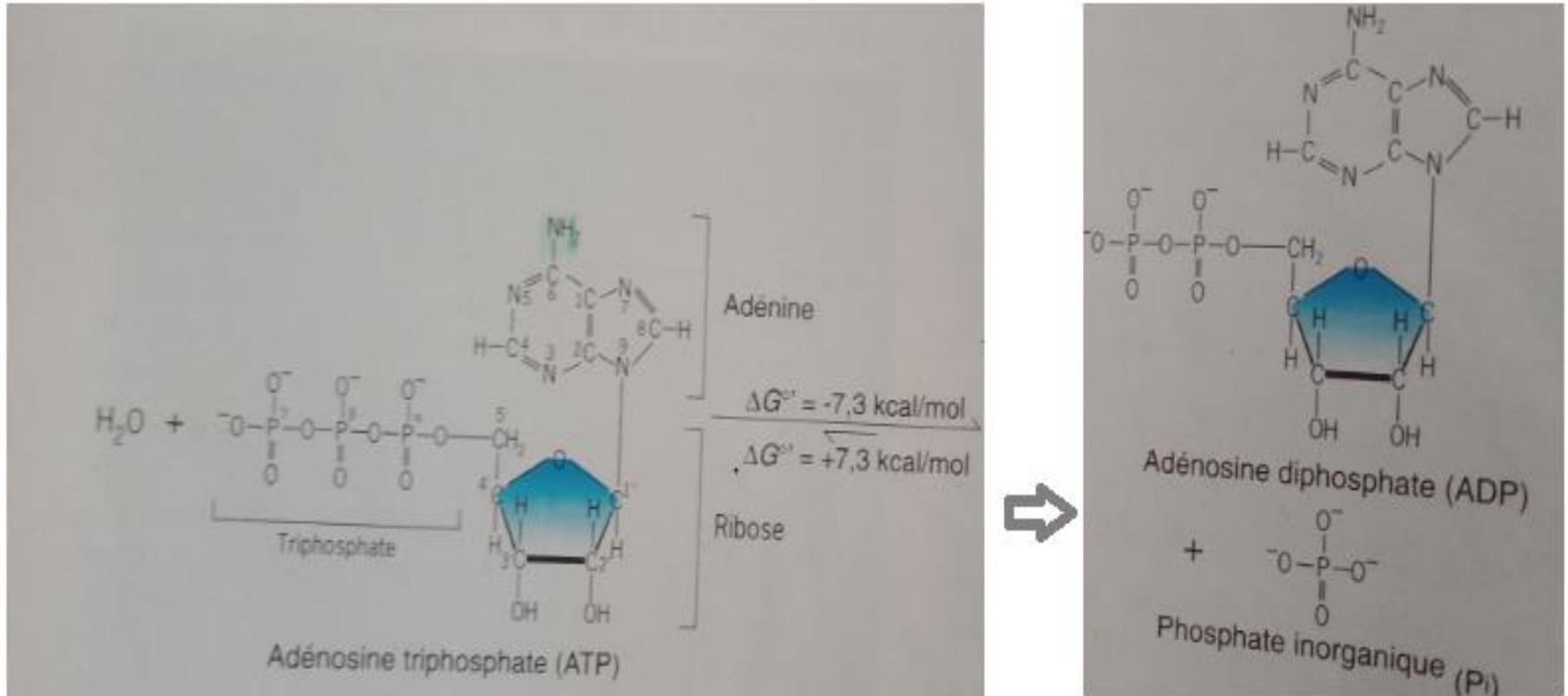
Chapitre VI : La bioénergétique

3-L'ATP

3-2 -2 cycle de l'ATP

3-2-2-1 hydrolyse de l'ATP. Fig.4

l'eau est fractionnée, la libération d'un atome d'hydrogène (H⁺) et un groupe hydroxyle (OH⁻).



L'hydrolyse de l'ATP est **exergonique** ; dans les conditions normales (standard), elle dégage **30,5KJ d'énergie** par mole d'ATP . Elle tend vers un rapport [ADP]/[ATP] élevé .

Mg^{++}

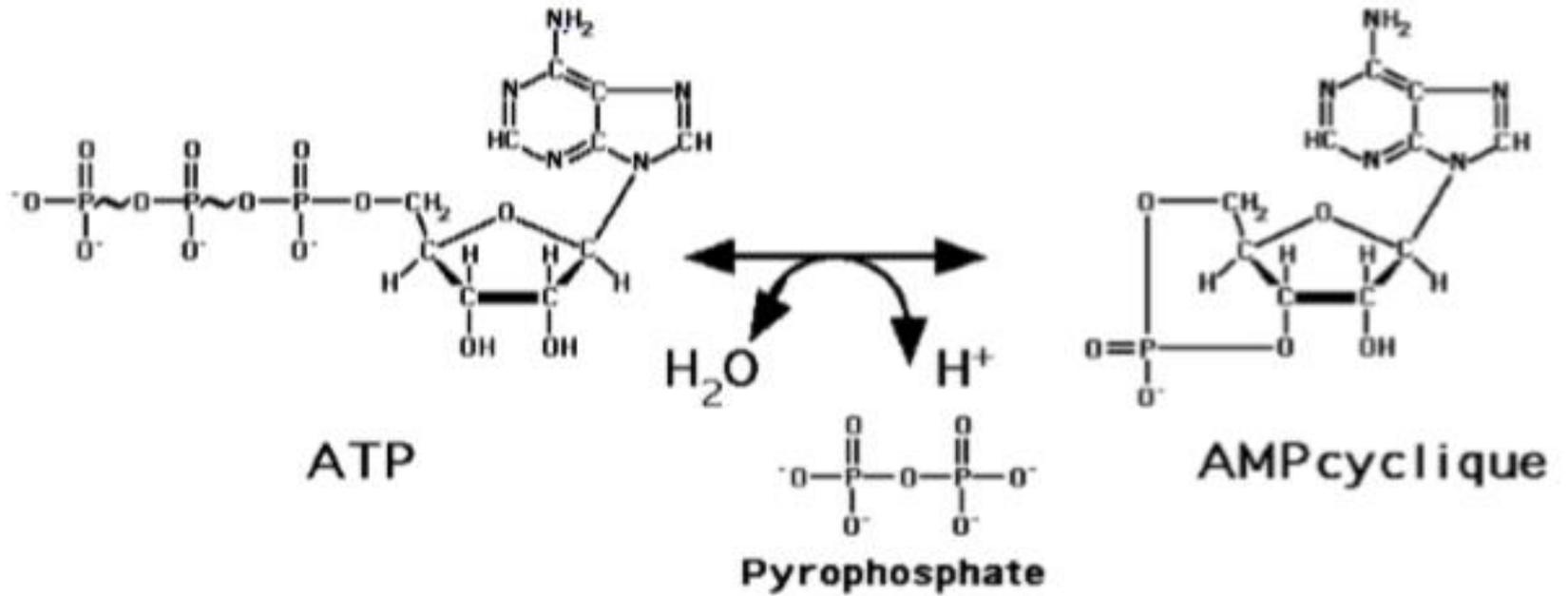


Fig.5 : conversion de l'ATP directement en AMPc

Chapitre VI : La bioénergétique

3-L'ATP

3-2 -2 cycle de l'ATP

3-2-2-2 Régénération de l'ATP

C'est la **phosphorylation** de l'**ADP** = Réaction de **condensation** ;



elle est **endergonique** ; $\Delta G = +30,5 \text{KJ/mol}$, soit $7,3 \text{Kcal/mol}$.



C'est le **cycle** de l'**ATP** en son absence : un organisme vivant doit consommer quotidiennement une quantité d'**ATP** équivalant a sa masse corporelle.



la cellule musculaire au travail renouvelle la totalité de son **ATP** en moins d'une minute : cela représente 10 millions de molécules d'**ATP** utilisées et **régénérées** /seconde.

Chapitre VI : La bioénergétique

4-Couplage de réactions endergoniques et exergoniques

4-1 Hydrolyse de l'ATP et processus endergonique

ROLE DES **KINASES** CYTOPLASMIQUES



Ces enzymes transfèrent un groupement phosphate (**P**) de l'**ATP** à une autre molécule qui est alors **phosphorylée**. Cette molécule phosphorylée subit un changement de **conformation** qui produit du travail (mécanique, transport et chimique)

Cet **intermédiaire** phosphorylé, est plus réactif (moins stable) , il constitue la clé du **couplage** des réactions endergoniques et exergoniques .



Chapitre VI : La bioénergétique

4-Couplage de réactions endergoniques et exergoniques

4-1 Hydrolyse de l'ATP et processus endergonique

exemple, la synthèse d'un acide aminé, la **glutamine** à partir de l'acide glutamique et de l'ammoniac,

on dit , que la production de la **glutamine** est **couplée** à l'hydrolyse de l'**ATP** :

1^{ère} réaction : Acide glutamique + **ATP** \longrightarrow glutamylphosphate + **ADP**.

2^{ème} réaction : Glutamyl**phosphate** + NH_3 \longrightarrow glutamine + **Pi**

La Réaction globale :

Acide glutamique + **ATP** + NH_3 \longrightarrow glutamine + **ADP**+ **Pi**.

$$\Delta G^\circ = -3,9 \text{ Kcal /mol}$$

Chapitre VI : La bioénergétique

4-Couplage de réactions endergoniques et exergoniques

4-2 Couplage et production de travail dans la cellule



active les processus biologiques, **endergoniques** de la cellule :
la **séparation** de charge à travers une biomembrane, la **concentration** de soluté, le **mouvement** des filaments dans une cellule musculaire.



Dans ces réactions couplées, le groupement phosphate (**P**) est transféré de l'**ATP** à un accepteur comme ; un **acide** aminé (acide glutamique), un **sucré** et une **protéine**, puis il est enlevé au cours d'une deuxième étape. Exemple (cycle de transport par la **pompe** Na⁺-KATPase).



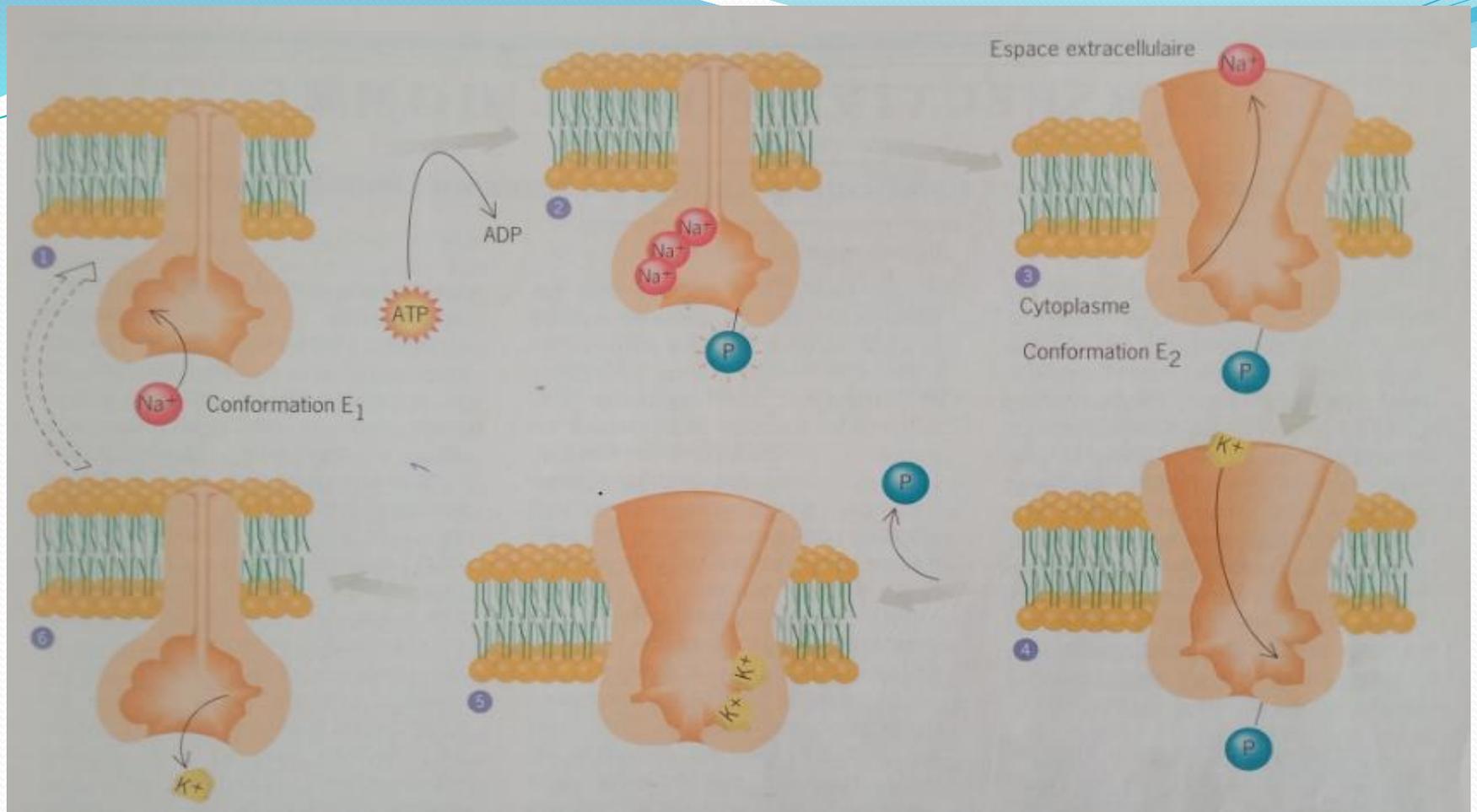


Fig.5 : schéma du cycle de transport Na⁺/K⁺ATPase. Les ions de sodium s'unissent à la protéine à l'intérieur de la membrane (1), hydrolyse de l'ATP et transfert du Pi à la protéine (2) qui change de conformation et expulse les ions de Na⁺ vers l'extérieur (3), les ions K⁺ s'unissent à la protéine (4) Le phosphate est enlevé (5) ce qui permet à la protéine de retrouver sa conformation initiale (6) et déplacement des ions K⁺ à l'intérieur de la cellule .