

# BIOENERGETIQUE

## I.INTRO

Un **organisme** est une structure **complexe** qui doit **se conserver** et **se perpétuer**. Pour se conserver, il a besoin de **matière** et **d'énergie** c'est le rôle du **métabolisme**

Metabolisme= catabolisme ( dégradation) + Anabolisme

A)

## L'ENERGIE C'EST LA VIE PELO

Pour se conserver et survivre, **une cellule doit continuellement « travailler »** elle a donc des besoins continus en énergie.

Ce taff peut être:

- 1) **Mécanique** ( certaines cellules peuvent se mouvoir, se contracter (exemple: fibroblastes)).
- 2) **Transport transmembranaire**
- 3) **Chimique**: Produire des molécules ( métabolisme cellulaire).



Il existe 2 types de réactions:

Endergoniques	Exergoniques
Reactions qui ont <b>besoin de l'énergie du milieu biologique</b>	Reactions <b>libèrent de l'énergie dans le milieu biologique</b> . Et cette énergie sera <b>réutilisée</b> par les <b>réactions endergoniques</b> et cette énergie se nomme <b>l'énergie libre++</b>

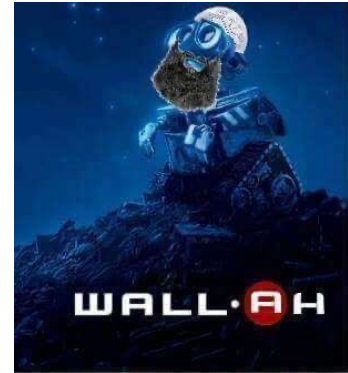
**Ily a un transport/ transfert d'énergie mais pas de matière+++**

La cellule peut vivre uniquement par le fait qu'elle puisse **coupler** de façon astucieuse **les réactions produisant de l'énergie (exergonique)** et les **réactions** nécessitant un **apport d'énergie (endergonique)**

Toute cellule vit et se développe grâce à ces **échanges ininterrompus de matière et d'énergie avec le milieu environnant++**

Pour réaliser ces "travaux" indispensables à sa survie, la cellule doit à tout moment :

- **Capter l'énergie du milieu extérieur** (mammifères : substrats carbonés)
- **Céder sous forme de chaleur** une partie de cette énergie au milieu extérieur
- **Utiliser le reste de cette énergie** pour réaliser les "travaux cellulaires"  
→ Notion de transport / transfert d'énergie



## B) NOTION DE SYSTEME.



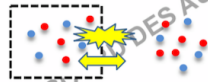
« Mais mortecouille qu'est ce qu'un système? »

C'est une **réunion de la matière** qui constitue un **ensemble cohérent**. Un système peut se limiter à une cellule, un organite, un organe.

La transformation observée dans un système peut s'accompagner :

d'échanges d'énergie et/ou de matière avec le système extérieur

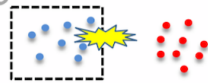
Système ouvert



→ La cellule

d'échanges d'énergie mais pas de matière avec le système extérieur

Système fermé



d'aucun échange d'énergie et de matière avec le système extérieur

Système isolé



La cellule est **système isotherme ouvert**, elle fonctionne à **pression et température constantes++**

Dans le monde vivant il existe deux Systèmes:

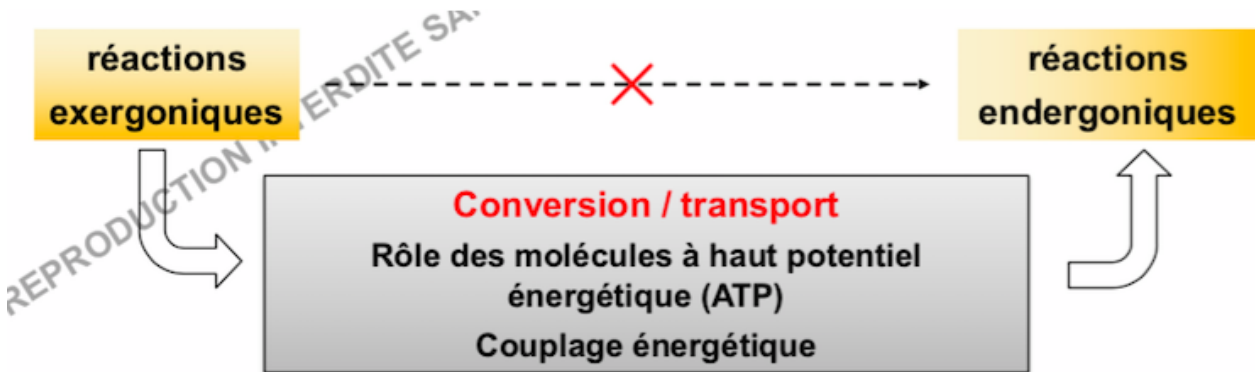
AUTOTROPHIE	HETEROTROPHIE
Les plantes acquièrent l'énergie de la lumière solaire absorbée pour synthétiser des macromolécules nutritives par <b>photosynthèse</b>	Les cellules animales utilisent: <ol style="list-style-type: none"> <li>1) des <b>nutriments</b> pour en <b>extraire l'énergie</b> qui sera soit <b>stockée</b> soit <b>utilisée</b> pour réaliser les <b>travaux cellulaires</b> -&gt; <b>C'EST LE CATABOLISME</b></li> <li>2) <b>l'énergie stockée dans les composés à haut potentiel énergétique</b> pour synthétiser les <b>macromolécules indispensables</b> -&gt; <b>C'EST L'ANABOLISME</b></li> </ol>

## II. BIOENERGETIQUE



**DEF:** étude de l'**approvisionnement**, du **transfert** et de l'**utilisation** de l'énergie par la cellule. C'est donc l'étude de:

- 1) La **Dégradation** des aliments pour en extraire de l'énergie en cassant les liaisons chimiques (**catabolisme**).
- 2) La **Conversion** sous forme de **stockage** et de **transfert** biologiquement utilisable de cette énergie : cela peut se faire grâce à l'**ATP**.
- 3) L'**Utilisation** de l'énergie pour réaliser des travaux ( **contraction musculaire**, **anabolisme**).



**ATTENTION: LES REACTIONS EXERGIQUES NE DONNENT PAS DE L'ENERGIE DIRECTEMENT AUX REACTIONS**

**ENDERGIQUES. +++++** Elle doit d'abord être **convertie** sous une certaine forme ( ex: sous forme d'ATP).



**RAPPEL:** des **réactions exergoniques** qui vont **libérer de l'énergie** et permettre l'exécution des **réactions endergoniques** qui **utilisent cette énergie**.

**A)**

### LE METABOLISME



**DEF:** C'est l'ensemble des réactions qui se déroulent dans une cellule.

Plusieurs centaines de réactions chimiques qui sont organisées en séquences distinctes ( $A \rightarrow B \rightarrow C$  etc):

Chaque séquence ( $A \rightarrow B \rightarrow C$  etc) correspond à **une voie métabolique**

Chaque intermédiaire (ex A) correspond à **un métabolite**

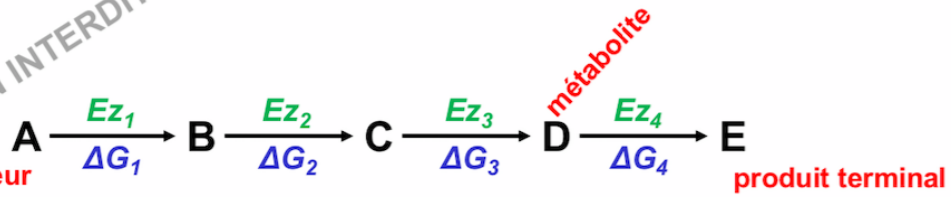


**DEF d'une voie métabolique:** C'est un ensemble de réactions chimiques qui vont d'un précurseur à un produit terminal.

Chaque enzyme d'une voie métabolique est **spécifique d'une réaction particulière** et **permet qu'elle se déroule**. Les enzymes sont des protéines qui **accélèrent spécifiquement chaque réactions**

L'**activité** des enzymes est finement **régulée** pour maintenir un **équilibre approprié** entre l'offre et la demande.

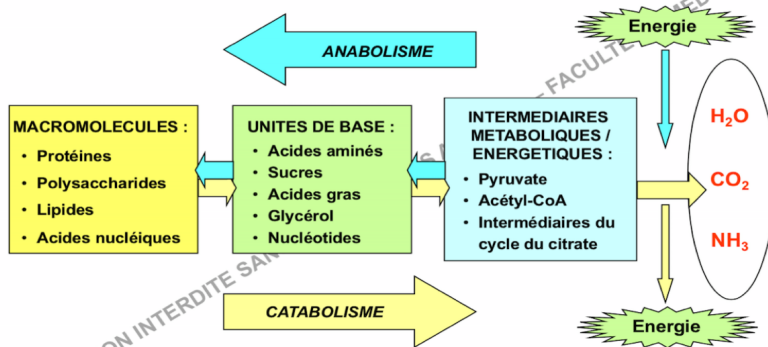
REPRODUCTION INTERDITE



$Ez_x$  : Enzyme

$\Delta G$  = Variation de l'énergie libre

**METABOLISME = ANABOLISME + CATABOLISME**

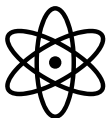


**Nécessité de relier les réactions du métabolisme aux lois physiques de la thermodynamique**

On a:

- Les **voies cataboliques** qui libèrent de l'énergie dans le milieu biologique en **dégradant des molécules complexes** en des **composés plus simples**.
- Les **voies anaboliques** qui consomment de l'énergie du milieu pour **synthétiser des molécules complexes** à partir de **composés simples**.

L'énergie libérée par les voies cataboliques sera utilisée pour le fonctionnement des voies anaboliques+++



**Explications:** L'apport extérieur (alimentation) est constitué de **macromolécules** (protéines etc) qui vont être dégradées en **unités de base** (pour les protéines ce sont les *Acides Aminés par ex*)

Ces **unités de base** vont pouvoir s'engager dans **des voies métaboliques** et être dégradées dans certains cas en molécules plus petites qui sont les **intermédiaires métaboliques** en **dégageant de l'énergie**.

Ces intermédiaires vont être soit dégradées complètement (**catabolisme**), on obtient les **molécules simples** ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$ ), soit être utiliser afin de produire des unités de base et des macromolécules (**anabolisme**)

Chaque nutriment que nous ingérons contient de l'énergie :

**Glucides = 4 kcal/**  
**Lipides = 9 kcal/g**  
**Protéines = 4 kcal/g**



**C'est le catabolisme qui génère de l'énergie à partir des unités de base sauf les acides nucléiques qui sont dégradés en nucléotides mais ne contiennent pas d'énergie++ !**



### B) Les principes de la Bioénergétique

- **1er principe:** L'énergie totale de l'univers **demeure constante**. L'énergie peut être transférée, transformée **mais jamais créée ou détruite**
- **2e principe:** L'**entropie** (=degré de désordre ou de hasard )de l'univers **augmente**.

Chaque **transfert ou transformation d'énergie** est associé à des réactions passant d'un état **ordonné à un état désordonné** sachant que l'état **désordonné est toujours plus probable**.

**ENERGIE:** toute forme de **travail** et de **chaleur**.



One year of PACES.  
@1YearOf

comment un paces voit un non paces qui se plaint de sa charge de cours



### C) La relation de GIBBS:



En bioénergétique on va décrire différentes énergies qui sont :

- **L'enthalpie total ( $\Delta H$ ) :** variation d'**enthalpie** du système
- **L'énergie entropique ( $\Delta S$ ) :** représente l'énergie du **désordre** du système
- **L'énergie libre ( $\Delta G$ ) :** variation d'**énergie libre** d'un système subissant une transformation

When you have a émotionnel breakdown in the middle of the night when you go boire au robinet de la salle de bain



La relation fondamentale qui lie ces différentes énergies a été établie par **Willard GIBBS** (relation de GIBBS) :

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

**$\Delta G$  = variation d'énergie libre**

- Energie disponible pour un travail
- Tend vers  $\rightarrow 0$  si équilibre
- Permet de prédire si la réaction est possible
- Exprimée en **kJ/mol**

**$\Delta S$  = variation d'entropie du système**

- Mesure l'état de désordre
- Ne permet pas de prédire le sens de la réaction.
- Exprimée en **kJ/mol x degré K**

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

**$\Delta H$  = variation d'enthalpie du système**


- Chaleur libérée ou absorbée lors de la réaction
- Ne permet pas de prédire le sens de la réaction
- Exprimée en **kJ/mol**

**T = température absolue**

- **T°K = T°C + 273**
- Exprimée en **°K**

PRESSION }  
TEMPERATURE } **CONSTANTES**

## E) L'énergie libre G

 **DEF:** L'énergie libre mesure l'énergie d'un système qui produit **un travail utile**. Il est lié à deux facteurs qui vont caractériser la réaction : l'**enthalpie** ( $\Delta H$ ) et l'**entropie** ( $\Delta S$ ).

Cependant ces 2 facteurs seuls **ne peuvent pas prédire le sens de la réaction thermodynamiquement favorable**.

**Seule la variation de l'énergie libre ( $\Delta G$ ) permet de déterminer le sens et l'importance de la réaction qui, d'un point de vue énergétique, est le plus favorable! +++**



### NOTIONS DE VARIATION D'ENERGIE LIBRE ( $\Delta G$ )

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

Tous les systèmes tendent spontanément vers un état d'équilibre, car cet état est le plus stable

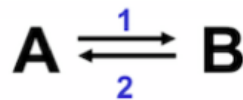
La capacité d'un système à fournir l'énergie utile pour réaliser un travail diminue au fur et à mesure que ce système se rapproche de son état d'équilibre

**En conséquence de cela,**

- A l'équilibre, le système ne peut plus fournir de travail  $\rightarrow \Delta G = 0$
- Quand  $\Delta G < 0$ , le système est **INSTABLE**  $\rightarrow$  la réaction se déroule spontanément
- Quand  $\Delta G > 0$   $\rightarrow$  il faut un apport d'énergie du milieu extérieur au système pour rendre ce terme globalement négatif et que le processus se déclenche

## BIOENERGETIQUE

Soit un système composé de A et B et représenté par la réaction suivante :



3 situations peuvent se présenter (réaction dans le sens 1) :

si  $\Delta G < 0$   $G_B < G_A$ , la réaction est **exergonique** : elle peut se faire spontanément dans le sens 1

si  $\Delta G > 0$   $G_B > G_A$ , la réaction est **endergonique** : elle ne peut se faire dans le sens 1 que si l'on fournit de l'énergie extérieure au système

si  $\Delta G = 0$   $G_B = G_A$ , la réaction s'effectue sans consommation d'énergie (réaction à l'équilibre)

(Je vous laisse le tableau que j'avais fait pour les PACES car il expliquait bien la notion de réaction endergo et exergonique).

REACTION EXERGONIQUE	REACTION ENDERGONIQUE
$A \longrightarrow B$	$A \longleftarrow B$
<p>Si <math>G_B &lt; G_A</math> : on retrouve une étape de transition (qui correspond à un <b>état d'activation</b>) mais le <math>\Delta G</math> entre A et B est négatif.</p> <p>La réaction <math>A \rightarrow B</math> se fait <b>spontanément</b>.</p> <p><i>Il faut s'imaginer ça comme un cheval face à un obstacle: si il avance de A vers B c'est facile pour lui de sauter (dsl pour l'image mdrrrr mais moi ça m'avait aidé) DONC réaction <math>A \rightarrow B</math> se fait spontanément.</i></p> <p>Mais Dans l'autre sens ( B vers A) c'est impossible l'obstacle est trop haut car <math>G_A &gt; G_B</math></p>	<p>Si <math>G_B &gt; G_A</math> : la réaction de A vers B ne peut <b>pas se faire spontanément</b>, il faut apporter de l'énergie, car le <math>\Delta G</math> entre A et B est positif.</p> <p><i>Cependant elle peut se dérouler spontanément dans l'autre sens (<math>B \rightarrow A</math>). ( revisualisez le cheval c'est pareil).</i></p>

**On peut donc prédire le sens de la réaction à partir de l'énergie libre (G) des composés initiaux et finaux ++**

### F) Notion d'Etat Standard

La mesure de l'énergie libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) d'un système nécessite que l'on ait défini un état standard (ou état de référence)



**DEF:** C'est l'état dans lequel un élément ou un composé est le plus stable à la température et à la pression ordinaire. L'énergie libre d'un composé dans son état standard est définie par le sigle  $\Delta G^\circ$

Les **chimistes** travaillent dans des tubes à essais (système fermé) **défini dans des conditions standards :**

- **Pression = 1 atm**
- **$T^\circ = 25^\circ C = 298^\circ K$**
- **Concentration des solutés = 1 mol.L<sup>-1</sup>**

$A \rightleftharpoons B$

$\Delta G = \text{variation d'énergie libre}$

Constante des gaz parfaits  
 $R = 8,3 \text{ J / degré / mole}$

Rapport des concentrations  
 initiales des produits et des  
 réactants

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[B]_i}{[A]_i}$$

$\Delta G^\circ = \text{variation d'énergie libre standard}$

$T = \text{température absolue}$   
 $T^\circ K = T^\circ C + 273$



+++++ A SAVOIR

**REACTIONS CHIMIQUES**

- Pas d'échanges avec l'extérieur  
→ systèmes indépendants
- On tend très souvent vers un état d'équilibre
- On peut travailler dans les conditions de "l'état standard"

Les différentes [ ] = 1 M

**REACTIONS DANS LA CELLULE**

- Système en interrelations continues avec d'autres systèmes
- Voies métaboliques irréversibles
- On ne peut pas travailler dans les conditions de "l'état standard"

**Problèmes :**

du pH  
de la [eau] | dans les cellules

Quand un patient avec un syndrome frontal te parle un peu trop facilement



*Remarque:* Quand on est dans une voie métabolique, et que l'on veut absolument aller de A vers E, il faut bien que la 1<sup>ère</sup> réaction soit irréversible pour que l'on soit "poussé" à former le produit final et que les concentrations entre le 1<sup>er</sup> substrat et le produits soient pratiquement équivalentes.

**G) Etat Standard et conditions physiologiques.**

Les réactions chimiques ne sont pas représentatives de la réalité d'une réaction dite « physiologique », il y a donc eu des adaptations pour que tout cela soit **compatible**.

Le  $\Delta G^\circ$  dans les réactions chimiques vaut 1M mais ce n'est pas viable donc:

→ Les réactions biochimiques s'effectuent avec **pH de 7**, pH standard alors que les **chimistes** travail avec un **pH = 0**

→ Ces réactions impliquent **souvent la formation ou utilisation H<sup>+</sup>**.



## Ainsi on a redéfini le $\Delta G^\circ$ qui devient le $\Delta G'^\circ$

**DEF  $\Delta G'^\circ$**  : il correspond à la modification de l'énergie libre standard dans des conditions standards:

- Concentration de tous les composants à 1,0 M (sauf pour le H<sup>+</sup>)
- T° physiologique de 25C°
- Pression atmosphérique constante
- pH de 7 standard : [H<sup>+</sup>] = 10<sup>-7</sup> mol/L

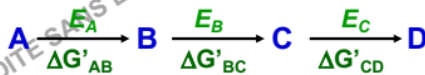
Ce  $\Delta G'^\circ$  va nous permettre de dire si une **réaction est possible** mais aussi de dire dans quelle **direction** va évoluer une réaction **pour atteindre l'équilibre** quand elle se produit dans des **conditions standards à PH=7**. On ignore toujours la présence de l'eau dans la formulation des constantes d'équilibre ainsi [eau] = constante.

## H) La nature additive de la variation de $\Delta G$

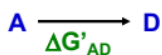
**Dans une cellule, aucune réaction n'est isolée.** Elle fait partie d'une chaîne d'évènements que l'on appelle **voies métaboliques**.

→ Le réactant (**substrat**) d'une enzyme conduit à un produit qui lui-même devient **substrat** d'une deuxième enzyme et ainsi de suite

On peut donc écrire une séquence de réactions :



La réaction globale est :



$$\Delta G'_{AD} = \Delta G'_{AB} + \Delta G'_{BC} + \Delta G'_{CD}$$

## I. Réactions couplées

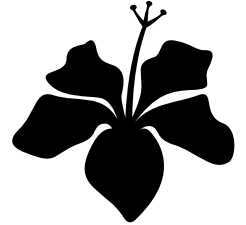
Certaines réactions du catabolisme ou de l'anabolisme **nécessitent un apport d'énergie** extérieur ce sont des réactions **endergoniques**.

A l'inverse on a des réactions qui **libèrent de l'énergie** : les réactions **exergoniques** mais **toujours liée** à une réaction qui a besoin d'énergie (**endergonique**).

D'un point de vue thermodynamique, **il suffit que l'énergie dégagée par la réaction exergonique soit en valeur absolue SUPERIEURE OU EGALE à l'énergie requise par la réaction endergonique** +++

Pour aller de A à D on passe par différentes **réactions intermédiaires (B et C)** qui utilisent chacune des **enzymes différentes**.

Le calcul de la réaction globale correspond à la



## Exemple: réaction de consommation de glucose

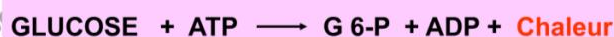
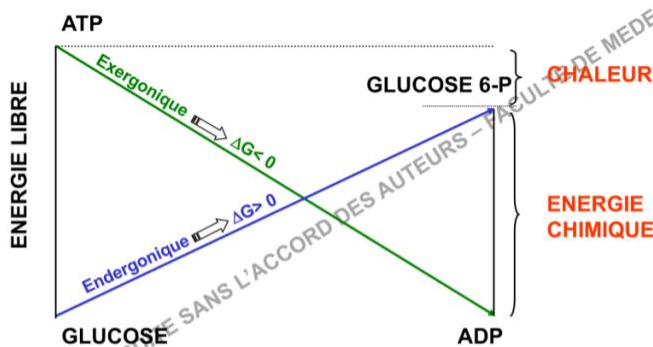


Cette réaction se déroule lorsque la **cellule a besoin d'énergie** ; le **glucose se transforme en G6P** grâce à l'**ATP** ( adénosine TRI-phosphate donc c'est une molécule a 3 phosphates) qui met **1** de ses **phosphate** sur le **C6 du glucose**. On obtient du **G6P**, l'ATP perd un phosphate et devient l'**ADP** ( adénosine DI-phosphate).

Pour résumer il y a 2 réactions couplées :

- **GLUCOSE -> G6P** : **endergonique** qui nécessite de l'énergie car elle ne peut PAS se dérouler spontanément à cause de son  $\Delta G > 0$
- **ATP -> ADP** : **exergonique** qui va libérer de l'énergie grâce à l'hydrolyse de l'ATP (3 molécules de phosphate) en ADP (2 phosphates). C'est une réaction très exergonique car le  $\Delta G < 0$  : l'**ATP est très riche en énergie libre**

Mais **thermodynamiquement**, la phosphorylation du glucose est **possible par couplage** direct à l'hydrolyse de l'ATP étant que le  $\Delta G'$  cumulé  $< 0$ .



L'excédent d'énergie 16 kJ sera libérée sous forme de chaleur.



## III. BIOENERGETIQUE ET METABOLISME

A)

### L'état stationnaire



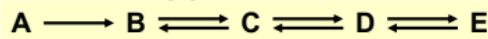
**DEF:** l'état d'un système est dit stationnaire si toutes **les grandeurs qui le caractérisent restent constantes** (stationnaires) au cours du temps.

Bon sinon c'est mimi depuis tout a l'heure mais c'est quoi une voie metabo?

Elle correspond à un **ensemble de réactions biochimiques** dont **chacune a pour substrat le produit de la réaction qui la précède**. -> Ces voies sont **ordonnées, régulées** donc **s'éloignent de l'état d'équilibre : c'est l'inverse de l'entropie**. L'apport constant du premier métabolite permet la production constante du dernier métabolite.

### Etat stationnaire

Soit la voie métabolique se déroulant au sein d'une cellule,



#### Etat stationnaire :

Vitesse formation de B à partir de A = vitesse transformation de B en C

[B, C, D] demeurent constantes  
[A] diminue  
[E] augmente

#### Conditions physiologiques:

apport constant du 1er métabolite A  
consommation constante du dernier D

Deux notions importantes :

-> État d'**équilibre** : les concentrations de A, B, C, D et E sont constantes.

-> État **stationnaire** : seules les concentrations de B, C et D sont constantes tandis que celle de A diminue et celle de E augmente.

**ET MAIS WSH C QUOI UN ETAT STATIONNAIRE? LA VIE DE OIM CA REND FOU MTN**

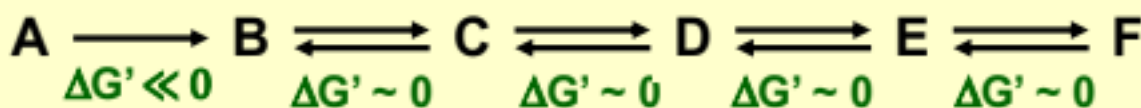
Bon déjà tu te détends t'es chiant et quand on **va de A à E** on a d'abord une **première étape de A à B qui doit être irréversible** pour dicter le sens de la réaction (rappel ça). Durant cette réaction **B, C et D** vont demeurer **constants** alors que **A va diminuer et E augmenter** -> cela nous amène à la **loi de Lechatelier**.

### LA LOI DE CHATELIER:



**DEF:** « toute modification d'un facteur d'un équilibre chimique réversible provoque, si elle se produit seule, un déplacement de l'équilibre dans un sens qui tend à s'opposer à la variation du facteur considéré. »

Soit une voie métabolique se déroulant au sein s'une cellule :



Du coup si l'on **ajoute du A**, on va **former plus de F**, ainsi on s'assure du sens de la réaction

**Pour que la réaction aille bien dans le sens A -> F la cellule a intérêt à ce que la 1ere transformation de A -> B soit IRREVERSIBLE avec un  $\Delta G < 0$ +++ on le répète+++**

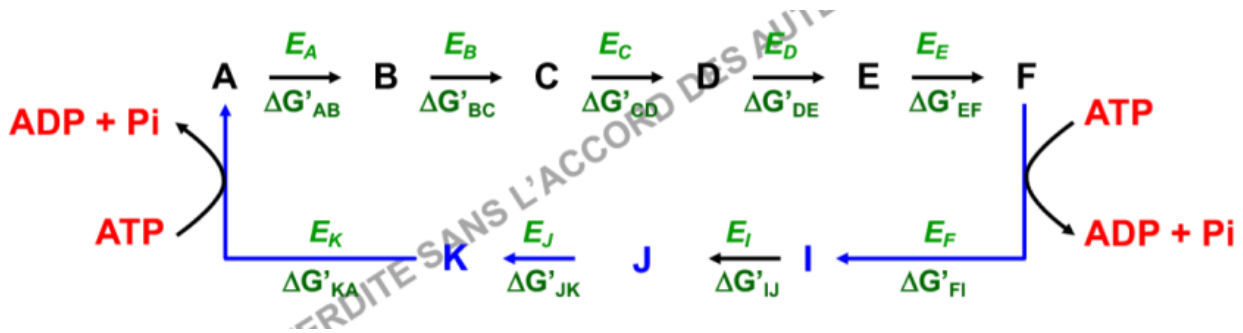
Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

+++Attention c'est **primordial pour que la réaction entière ait lieu**. Le **fonctionnement** ou non de la voie **dépend entièrement de la réaction irréversible**. Elle correspond à l'**étape limitante et essentielle** pour la régulation de la voie. C'est elle qui va **permettre de dire quel produit sera formé**. +++

A partir du moment où A se transforme en B de manière irréversible (étape limitante), **la cellule fait en sorte d'activer cette voie métabolique !**

## B) Bioénergétique et voies métaboliques

Les **voies métaboliques** ne sont **pas réversibles** d'un point de vue **thermodynamique** MAIS elles sont **réversibles** d'un point de vue **physiologique/biologique**+++



- > La conversion de **A en F** par la voie métabolique est **exergonique** donc **irréversible**.
- > L'organisme fait **rarement de réaction inverse**, ainsi si on veut aller de **F à A** on utilise une autre **voie métabolique dite réverse** qui **physiologiquement est possible** mais **thermodynamiquement** cette voie nécessite l'**apport d'énergie extérieur (hydrolyse de l'ATP)**

Les enzymes de chacune des voies seront régulées de façon différente, afin de n'avoir qu'une seule voie active ! Si on **active la voie de A vers F**, la **voie inverse de F vers A sera inhibée !**

### 1) Les liaisons riches en énergie

Ce tableau présente des molécules qui sont riches en énergie +++, qui, lorsqu'elles se **dégradent libèrent de l'énergie** (Les liaisons riches en énergie sont représentées avec une petite vague)

LIAISONS	FORMULES	EXEMPLES
AMIDINE-PHOSPHATES	$R-NH-C(=NH)-NH\sim P$	Créatine Phosphate
PHOSPHOANHYDRES	$R-O-P(=O)(O^-)-O-P(=O)(O^-)-O-P(=O)(O^-)-O^-$	XTP et XDP (X = A, G, C, U)
ACYL-PHOSPHATES	$R-C(=O)-O\sim P$	1,3 diphosphoglycérate
ENOL-PHOSPHATES	$R-C(=O)-CH_2-O\sim P$	Phosphoénolpyruvate
ACYL-THIOESTERS	$R-C(=O)-S-CoA$	Acétyl-CoA

### 2) L'ATP ( adenosine triphosphate)

Molécule **FONDAMENTALE** pour le métabolisme énergétique.

## A SAVOIR A PROPOS DE L'ATP+++

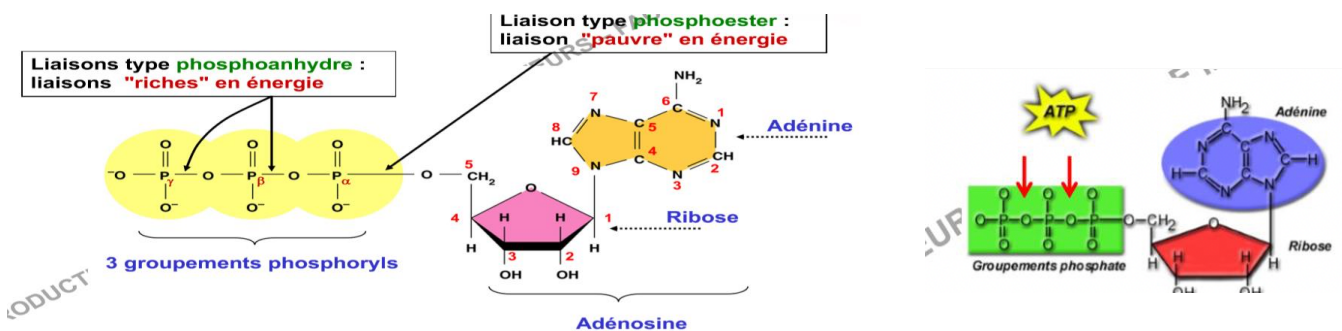
Présent dans toutes les **cellules** vivantes à concentration variable entre **10<sup>-3</sup> et 10<sup>-4</sup> mol/L**

**Repartition:** **10 molécules d'ATP pour 1 ADP** (cellule au repos)++++

Dans l'organisme on a une teneur en ATP de **75g**

Il y a peu d'ATP dans l'organisme (75g) mais la **quantité synthétisée et hydrolysée par jour correspond à 45Kg!** **Conséquence:** le renouvellement de cet **ATP est indispensable** +++++

L'ATP possède **3 phosphates** mais que **2 liaisons riches en énergie** +++++ (voir schéma ci-dessous)



Grâce au système adénylate l'ATP forme une belle famille :

- ATP : **3P** mais seulement **2 liaisons riches en énergie** (triphosphate)
- ADP : **2P** et **1 liaison riche en énergie** (diphosphate)
- AMP : **1P** et **aucune liaison riche en énergie** (monophosphate)

### Explications du schéma:

Vous avez ici un **ribose** ( sucre à 5C) relié à une **Adénine** (base purique) -> or **ribose+Adénine= Adénosine**.

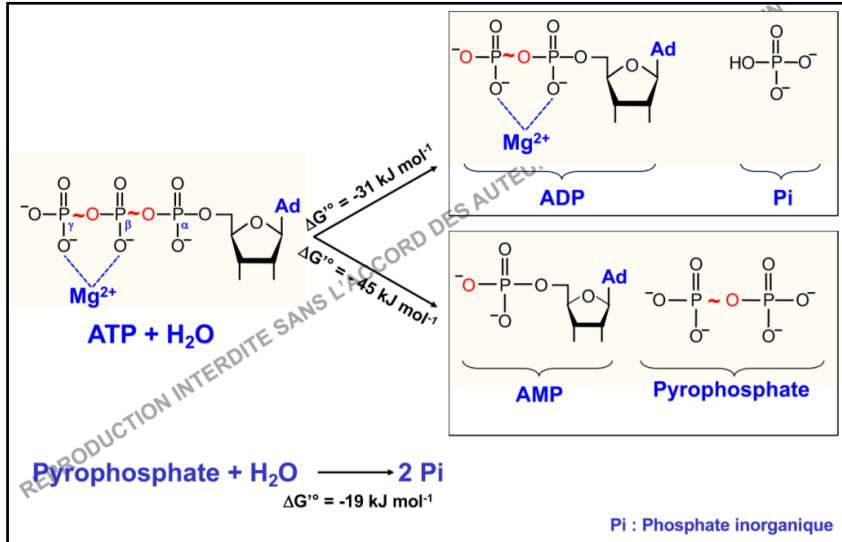
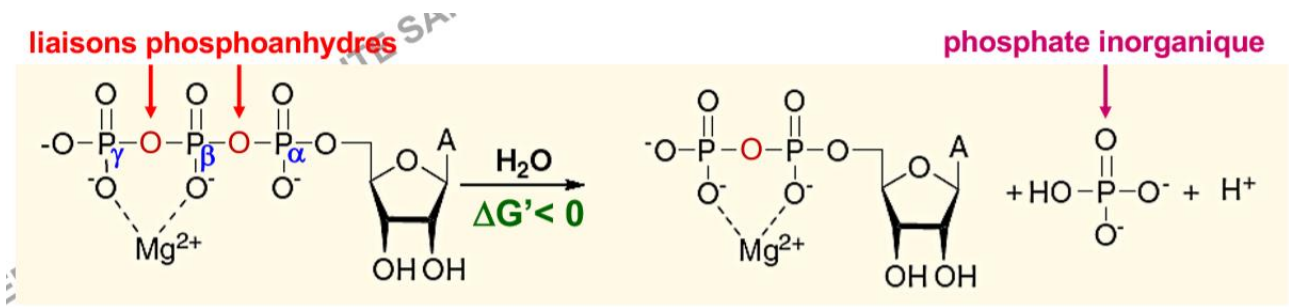
L'adénosine se lie ici à **3P** par une **liaison phosphoester** « pauvre en énergie » en **C5**, c'est la **liaison α** (en rouge tout petit sur le schéma) +++

Puis les **3P** sont reliés entre eux via deux **liaisons phosphoanhydres** (**γ et β** aussi en rouges) qui sont **riches en énergie**.

### Réactivité de l'ATP:

- L'hydrolyse d'une **liaison phosphoanhydre** libère un **phosphate inorganique (Pi)** et s'accompagne d'une **libération d'énergie utile pour un travail**.
- L'hydrolyse de la **liaison phosphoanhydre β** (entre α-β) ainsi que de la **liaison phosphoanhydre γ** (entre γ-β) libèrent autant d'énergie soit **31kJ mol<sup>-1</sup> !**

Par ailleurs l'ATP peut s'associer avec un cation divalent de **Mg<sup>2+</sup>** ce qui augmente la **vitesse d'hydrolyse de l'ATP** ++



Vous pouvez avoir 2 situations ici:

**1) L'Hydrolyse de l'ATP en ADP:**

On obtient  $\rightarrow$  1 ADP + 1 Pi + libération énergétique de 31 kJ/mol.

Cet ADP peut ensuite être hydrolyser en AMP et rebote  $\rightarrow$  libération d'1Pi et de 31 kJ/mol

**2) Hydrolyse de l'ATP en AMP directement** ( on coupe la liaison  $\beta$  ):

On obtient  $\rightarrow$  1 AMP + 1 pyrophosphate (qui se transforme en 2Pi qui libère 19 kJ/mol) + libération énergétique de 45 kJ/mol ( car on a libéré 2x 31kJ/mol )

**Au final:**

- Première situation: Bilan énergétique globale: **62 kJ/mol d'énergie** et 2 phosphate inorganique. (Pi)
- Deuxième situation: Bilan énergétique globale: **64kJ/mol d'énergie** et 2 phosphate inorganique.

L'ATP est **thermodynamiquement instable** et présente une grande aptitude à s'hydrolyser en ADP ou en AMP !

Cette instabilité peut lui servir pour:	Le transport d'énergie	Donner un groupement phosphoryle
	$A \xrightarrow{\text{ATP}} B$ $\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{Pi}$	$A + \text{ATP} \longrightarrow A\text{-P} + \text{ADP}$

**L'ATP, en apportant l'énergie nécessaire aux réaction endergoniques, permet à ces réactions de se dérouler spontanément !!!!+++**

**3) La formation de l'ATP:**

L'ATP peut être formé de différentes façons:

La première se passe dans le cytoplasme, en empruntant **la voie de synthèse des nucléotides puriques**

La deuxième est **la transformation de l'ADP en ATP qui peut se faire de 3 façon différente !**

**1. Voie de synthèse des nucléotides puriques (cytoplasme)**



**2. Transformation de l'ADP en ATP**

• **Oxydations phosphorylantes**

Au sein de la MIM → synthèse d'ATP à partir d'un gradient électrochimique (association CRM et PO) ; **Chez l'homme → 90% ATP**

• **Phosphorylation liée au substrat** (cellules exprimant **CPK**)



• **Adénylate kinase** → réaction essentiellement utilisée par le muscle strié



+++ La plus grande partie de l'ATP chez l'homme est formée dans la **mitochondrie** (membrane interne mitochondriale=**MIM**) par **oxydations phosphorylantes**, cela représente **90% de l'ATP en tout** +++

IMP:inosine monophosphate (base:hypoxanthine) / GMP: guanosine monophosphate / CRM:chaîne respiratoire mitochondriale / PO:phosphorylation oxydative / MIM:Membrane Interne Mitochondrie

Il existe plusieurs liaisons riches en énergies :

**Trois autres molécules très riches en énergie** peuvent attirer notre attention : le **PEP** (phosphoénolpyruvate) qui libère **63kJ/mol**, la **1,3 biphosphoglycérate (49kJ/mol)** et surtout la **créatine phosphate (43kJ/mol)** dont on va parler en détail.

4) La creatine Phosphate:

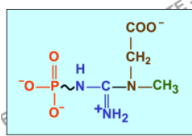
La créatine phosphate est **une forme de réserve énergétique dans les muscles des vertébrés**. Son énergie provient de **l'ATP mitochondrial** et permet de générer très rapidement de l'ATP au niveau du cytosol.

**→ La CP est donc la réserve d'énergie la plus immédiatement disponible pour les muscles avec le pool d'ATP ++++++**

Portrait de la CP:

<p>Pour un individu de 70kg, <b>120g de créatine dont 95% sont stockés dans le muscle squelettique/lisse et parmi ces 95%, 70% sont sous forme de CP.</b></p>
<p><b>50%</b> de la créatine provient de <b>l'alimentation</b> (viande/poisson)</p>
<p><b>50%</b> de la créatine provient de <b>la synthèse d'Acide aminés</b> dans les cellules du Foie et des Reins</p>
<p><b>Produit de la dégradation : La créatinine</b> permet <b>d'apprécier la fonction rénale et quantifie la masse musculaire</b></p>

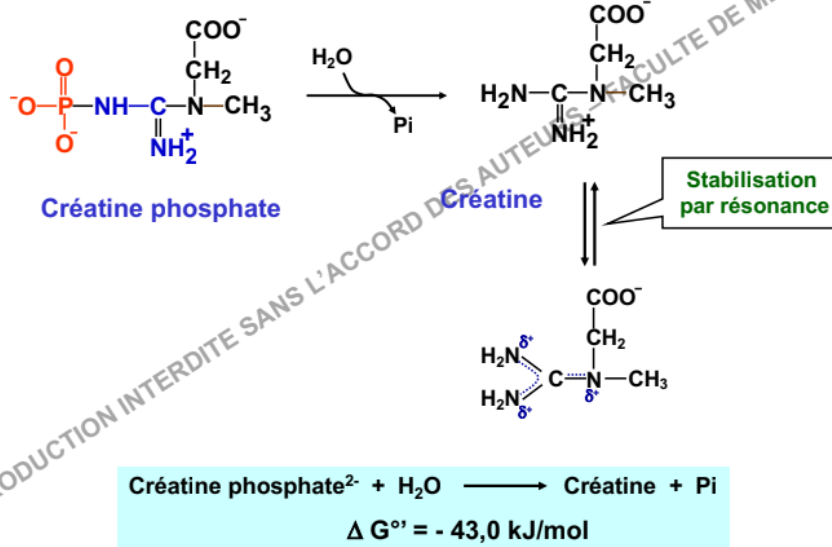
• **Créatine phosphate:**



- une molécule de **glycine**, dont l'azote lie un **méthyl** provenant de la S-adénosylméthionine (SAM)
- un noyau **guanidinium** de l'**arginine**
- un **phosphate** → la **liaison riche en énergie** provient de l'ATP

C'est une molécule tripartite donc en 3 parties : **glycine + arginine + phosphate**

## Réactivité de la CP:



Amphithéâtre avant la covid



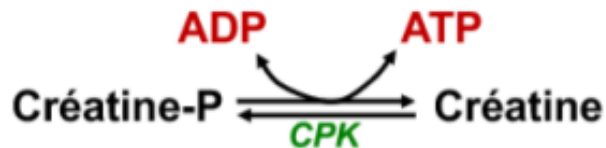
Amphithéâtre après la covid

IFMK, précurseur en distanciation sociale depuis 69 ans

L'hydrolyse de la CP : → Réaction très **exergonique**

## 5) Les Enzymes (la CPK, AK) et la voie anaérobie alactique

### 1) La Créatine Phosphokinase (CPK)



#### • Son portrait:

C'est une enzyme des vertébrés présente dans le **cerveau**, les **muscles** ainsi que le **cœur**

Catalyse l'hydrolyse de la liaison riche en énergie et synthétise un **ATP** en transférant directement l'énergie libérée (**-43kJ/mol**) et le phosphate sur l'**ADP**

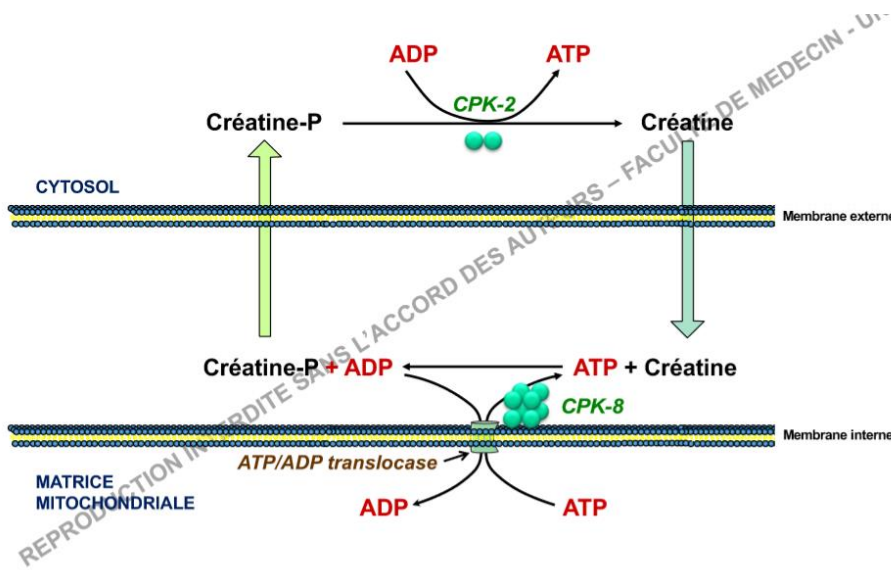
Cette réaction couplée ne libère que **-13kJ/mol** dans le milieu sous forme de chaleur

#### • Cette réaction est à double sens (=REVERSIBLE+++):

Au repos	A l'effort
Le <b>muscle est riche en ATP</b> et stocke cette énergie sous forme de <b>Créatine Phosphate</b>	Le muscle est <b>pauvre en ATP</b> et/ou à besoin d'ATP, on va <b>hydrolyser la Créatine phosphate</b> afin de <b>restituer l'énergie</b> mise en réserve sous forme <b>d'ATP</b>

- Dans le muscle strié squelettiques, la **CPK** est présente sous 2 formes fonctionnellement différentes:

La forme cytosolique	La forme mitochondriale
Forme dimère ( <b>CPK-2</b> ) qui est présente dans le cytoplasme et l'espace intermembranaire des mitochondries	forme octamère ( <b>CPK-8</b> ) ancré à la face externe de la membrane interne des mitochondries en interaction avec l'ATP/ADP translocase.

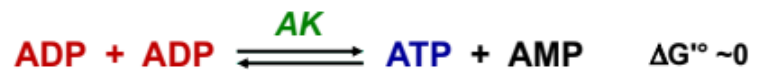


**Explications:** (je vous remets celle de l'année dernière pq elle est bien faite)  
 La **CPK-8** hydrolyse l'**ATP** provenant de la matrice mitochondriale pour transférer les **Pi** sur la **créatine**.

L'**ADP** retourne dans la matrice alors que la **créatine-P** diffuse à travers la membrane externe (qui est poreuse) et rejoint le cytoplasme.

Dans le cytoplasme, la **CPK-2** hydrolyse la **créatine-P** afin de régénérer un **ATP cytoplasmique**

**2) Adénylate kinase / Myokinase (AK):**

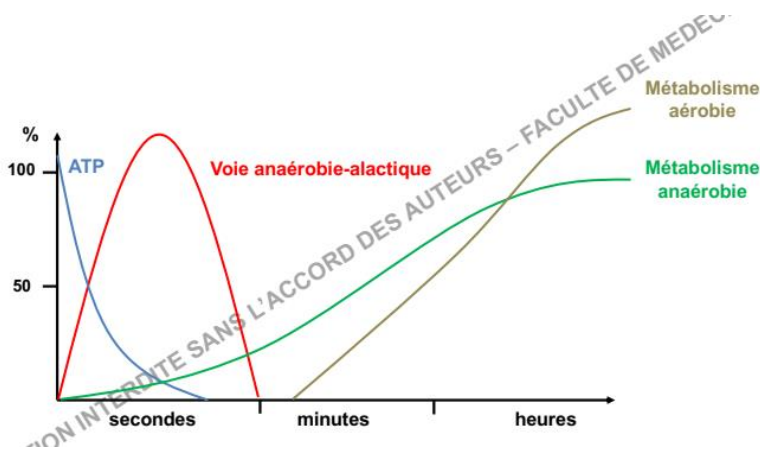


•Son portrait:

L' <b>adénylate kinase</b> est une <b>enzyme</b> présente dans <b>toutes les cellules</b>
Réaction totalement réversible du fait que le $\Delta G^\circ = 0$
L' <b>AK</b> permet la récupération d'une liaison riche en énergie supplémentaire <b>en réactivant un ADP en ATP</b>
L'autre <b>ADP est hydrolysé en AMP</b>

Avec l'interaction des ces deux enzymes, que ce soit la CPK ou l'AK, le **muscle dispose d'une voie métabolique courte capable de fournir immédiatement de l'énergie**. Cette voie ne requiert pas d'**O<sub>2</sub>** (elle est donc **anaérobique**) et ne fabrique pas de **lactate (alactique)**.  
 C'est donc la voie :

# ANAEROBIE-ALACTIQUE



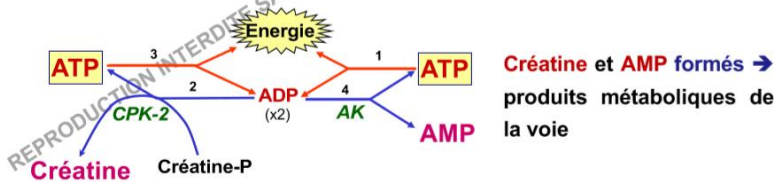
*On peut voir que cette voie est mobilisée très rapidement (quelques secondes) mais s'épuise très vite pour laisser place au voies métaboliques classique anaérobies et aérobie. Cette voie est donc d'un grand intérêt pour sa rapidité. Lors d'un besoin soudain en énergie nous faisons appel tout d'abord à notre pool d'ATP stocké qui s'amenuise rapidement et dans les secondes qui suivent on utilise cette voie anaérobie- alactique.*

- Phase de debut d'effort:

### Au début de l'effort:

L'ATP présent dans le cytoplasme est hydrolysé en ADP

- ⇒ L'ADP est aussitôt rephosphorylé à partir de la créatine phosphate. Cette réaction est catalysée par l'isoenzyme CPK dimère cytoplasmique
- ⇒ L'ADP peut céder une liaison riche en énergie à un autre ADP qui est retransformé en ATP (Ez : AK) et donner de l'AMP



Grâce à nos deux enzymes (CPK et AK) le muscle crée deux molécules d'ATP : une provenant de la CP avec l'aide des deux isoenzymes CPK et l'autre avec deux molécules d'ADP grâce à l'AK

- Phase de recuperation:

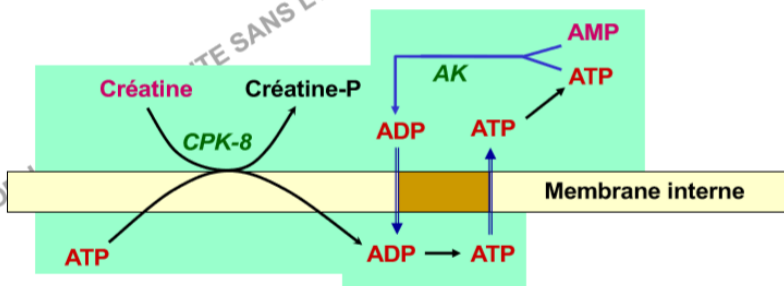
### Phase de récupération:

La cellule recharge créatine et AMP en énergie à partir des ATP produits par les mitochondries

La chaîne respiratoire mitochondriale phosphoryle les ADP en ATP

Cet ATP sert à rephosphoryler l'AMP en ADP (AK)

L'isoenzyme CPK octamère mitochondrial utilise aussi l'ATP pour "activer" la créatine en créatine phosphate



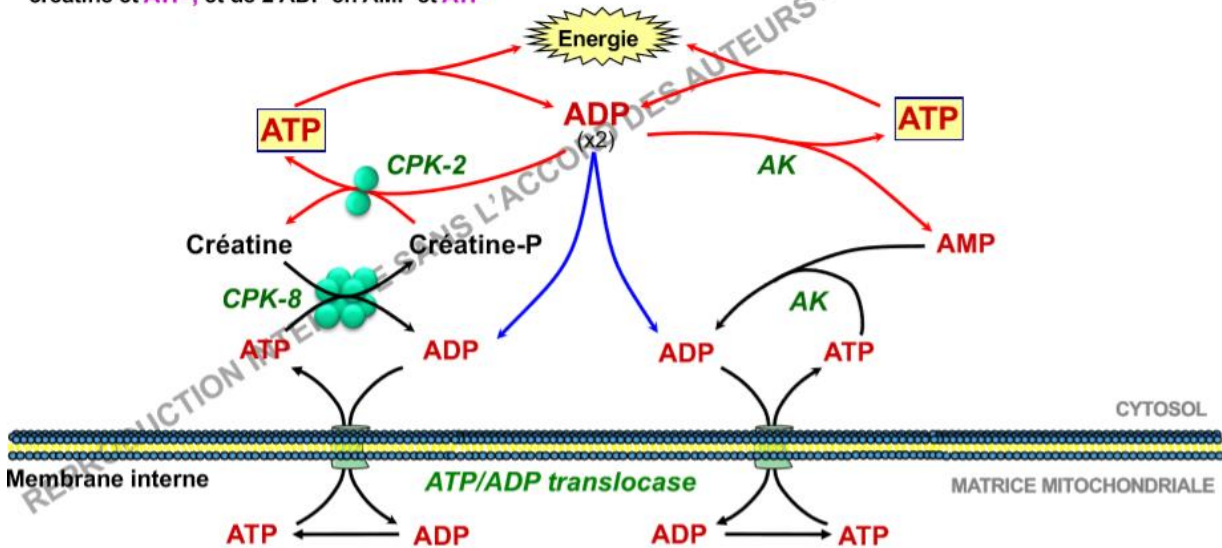
RECAP DE LA VOIE:

**Début de l'effort** : le muscle utilise l'ATP présent dans le cytoplasme car  $[ATP]/[ADP]$  est très élevée → La concentration d'ADP augmente rapidement

La créatine-P est hydrolysée pour fournir une liaison riche en énergie (CPK-2)

L'ADP est hydrolysé pour fournir une liaison riche en énergie (AK)

Le muscle dispose ainsi de **deux liaisons riches en énergie**, grâce à la transformation de la créatine-P en créatine et ATP, et de 2 ADP en AMP et ATP

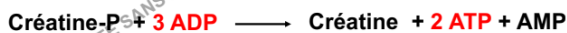
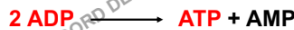


Bilan énergétique:

*Créatine PhosphoKinase (CPK)*



*Adénylate Kinase (AK)*



**Grâce à ces deux voies orchestrées parfaitement et l'intervention de ces 2 enzymes, le muscle dispose donc de deux liaisons fortes en énergie rapidement !**

6) ATP/ CP dans le muscle:

-> Dans le muscle on retrouve près de **5 mmoles d'ATP** par Kg de muscle

-> L'ATP a un **fort pouvoir énergétique mais de faible durée** (2 à 3 secondes). L'organisme possède **75g** d'ATP maximum

-> Également l'ATP est une molécule qui est **produite localement** ! L'ATP ne circule pas dans la voie **sanguine**, ni **entre les tissus**. Chaque cellule des muscle produit sont **propre ATP**

-> Dans le muscle on retrouve près de **15 mmoles de Créatine-P (CP)** par Kg de muscle

-> La créatine phosphate est **immédiatement disponible** après le pool d'ATP déjà présent dans la cellule au moment de l'effort pour une durée d'environ **3 à 10-15 secondes**.

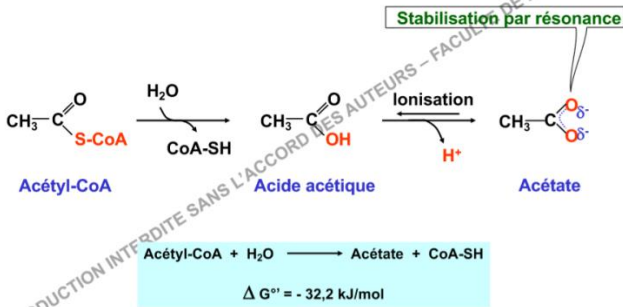
**En phase de récupération, la resynthèse de l'ATP et de la créatine phosphate est achevée au bout de 3 à 5 minutes**

**7) Exemple de molécules riches en énergie:**

- L'acetyl Coa

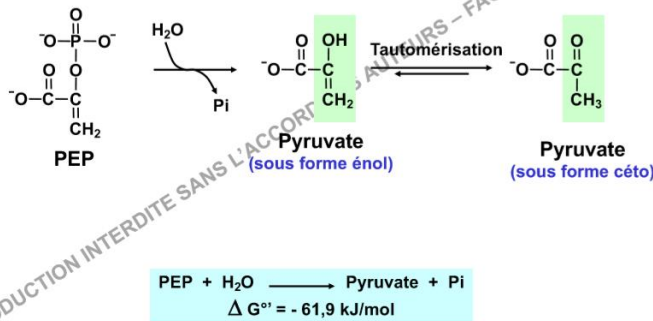
**L'acétyl CoA (CoA= Coenzyme A) est un thioester. Il peut se transformer en acide acétique qui peut lui-même via une stabilisation par résonance donner de l'acétate (plus stable)**

Formule et réactivité



- Le phosphoénolpyruvate (PEP)

Formule et réactivité



Le PEP est le métabolite de la dernière réaction de la glycolyse, en perdant sa LHE, il **peut se transformer en pyruvate**, qui n'est pas très stable sous la forme énol. Par **tautomérisation**, le pyruvate passe de la **forme énol à la forme céto plus stable**

En perdant sa LHE, le PEP va libérer **une très grande quantité d'énergie**, soit près de **61kJ/mol**, ce qui fait d'elle, **la molécule la plus énergétique !**

**Les molécules à haut potentiel énergétique vont donc avoir un rôle de :**

Transferts et stockage d'énergie	Transfert de groupements
ATP + PPI (pyrophosphate) + CreatineP	ATP + CoenzymeA + ACP

**C) REACTIONS D'OXYDO-REDUCTION.**

Les oxydations cellulaires sont des **mécanismes très importants**, et mettent en jeu des molécules d'**hydrogènes ainsi que des électrons**. L'**accepteur final est l'oxygène**.

- Une oxydation est une **perte d'hydrogène ou d'électron**
- Une réduction est **un gain d'hydrogène/d'électron**.

Le composé donneur s'oxyde, il devient donc réducteur, car l'hydrogène ou l'e- cédé vont aller réduire le composé accepteur, qui lui a une action oxydante (c'est donc l'oxydant). ( Ok je sais ça paraît un peu compliqué comme ça mais au fur et à mesure on capte les réactions d'oxydo-red)

- Les oxydations cellulaires: suite de réactions mettant en jeu des hydrogènes et / ou des électrons (e-)

L'accepteur final des hydrogènes ou des électrons est l'oxygène

- On distingue : **oxydation** = perte d'hydrogènes ou d'électrons

**réduction** = gain d'hydrogènes ou d'électrons

Mais les 2 sont toujours liées d'où « réactions d'oxydoréductions »!!

- Les électrons cédés par le composé **donneur** (qui s'oxyde) sont récupérés par le composé **accepteur** (qui se réduit)

Le composé donneur est un **réducteur**

Le composé accepteur est un **oxydant**

### Réactions d'oxydo-réduction dans les systèmes biologiques

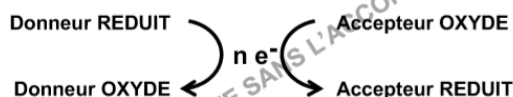
Le **transfert d'électrons** d'une molécule (donneur d'électron) vers une autre molécule (accepteur d'électron) se réalise selon l'une de ces voies :

- Transfert direct d'électrons  $Fe^{2+} + Cu^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + Cu^+$
- Transfert via la molécule d'hydrogène
  - $AH_2 \rightarrow A + 2e^- + 2H^+$
  - $B + 2e^- + 2H^+ \rightarrow BH_2$
  - $AH_2 + B \rightarrow A + BH_2$
- Transfert via l'ion hydrure [ :H- ]
- Transfert via une réaction directe de l'oxygène → incorporation covalente de l'oxygène dans une molécule organique

Tout cela pur vous montrer la **relation entre l'énergie libre ΔG** (qui indique si la réaction aura spontanément / dans quel sens) **et delta E (ΔE) le potentiel redox. Pour avoir lieu spontanément, le delta E doit être positif (à l'inverse de delta G) +**

### En découle une nouvelle formule de l'énergie libre :

- Relation entre ΔG et ΔE



$$\Delta G = - n F \Delta E$$

n: nombre électrons  
 F: constante Faraday  
 ΔE: différence entre potentiel redox du donneur versus accepteur

- Une réaction d'oxydoréduction se déroulant spontanément entraîne :

- une variation de potentiel REDOX **positive** (ΔE>0)
- une variation d'énergie libre **négative** (ΔG<0)

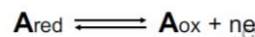
**Les phosphorylation et les mécanismes RedOx sont vraiment les deux réactions fondamentales dont nos organismes ont besoin au quotidien.**

Ce transfert d'e- génère une force électromotrice permettant à certaines réactions de transduction d'énergie d'aboutir.

### POTENTIEL D'OXYDOREDUCTION

L'aptitude d'un composé à perdre ou à recevoir des électrons est caractérisée par son **potentiel redox** (E) qui est une **force électromotrice**

Le **potentiel redox** (d'oxydoréduction) est donné par la formule de **NERNST**



$$E_A = E_A^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[A_{ox}]}{[A_{red}]}$$

- EA : potentiel redox du couple Aox/Ared en Volt (V)
- EA° : potentiel redox standard (V)
- R : constante des gaz parfaits (8,314 J/mol°K)
- T : température en degré Kelvin (°K)
- n : nombre d'électrons échangés
- F : constante de Faraday (96 485 coulombs ou J/V.mol)



Prix Nobel de chimie (1920)

Variation potentiel redox:  $\Delta E = E_B - E_A$

Si  $E_B > E_A \rightarrow \Delta E > 0$  : réaction spontanée avec électrons allant de A (plus réducteur et donneur d'électrons) à B (accepteur d'électrons)

Si  $E_B < E_A \rightarrow \Delta E < 0$  : réaction nécessite de l'énergie

FINNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNN

Voila encore une fiche assez longue désolée

Si vous avez des questions à poser c'est sur le forum 😊  
( j'avais des memes plus sales mais je suis resté humble )

Je fais juste une dédicace pour mes fillots sur cette fiche:  
Léonie Clotilde Célian Arthur Eva et Mylena

Vous allez tous réussir ce pour quoi vous travaillez, j'ai foi en vous ❤️



Namek237  
@namek237

- Il doit sûrement penser à son ex  
- Si Je fais du trafic d'organes je  
peux payer en plusieurs foie ?

