

# 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 ( degradation) + 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>

**Il y 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.



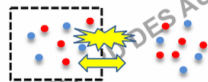
« Mais mortecouille qu'est ce qu'un système? »

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

La transformation observée dans un système peut s'accompagner :

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

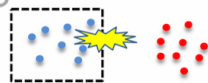
Système ouvert



→ 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:

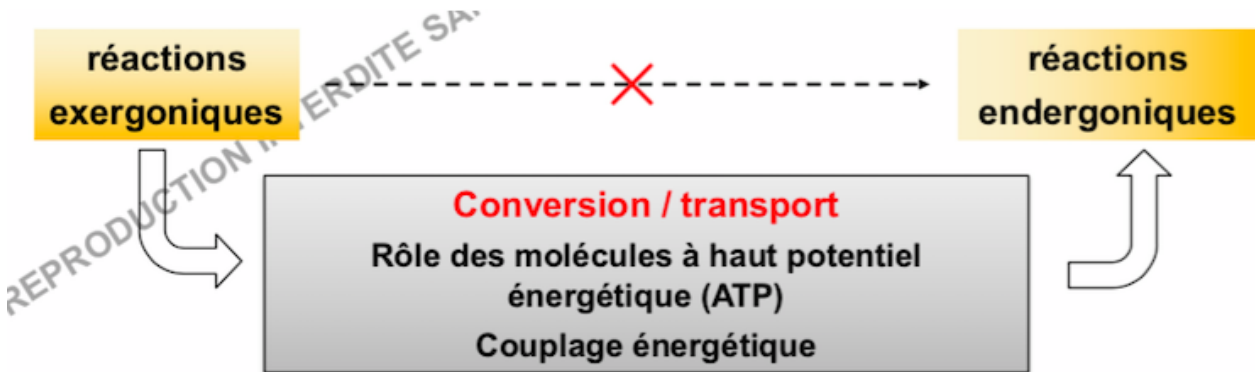
AUTOTROPHIE	HETEROTROPHIE
Les plantes acquièrent l'énergie de la lumière solaire absorbée pour synthétiser des macromolécules nutritives par <b>photosynthèse</b>	Les cellules animales utilisent: 1) des <b>nutriments</b> pour en <b>extraire l'énergie</b> qui sera soit <b>stockée</b> soit <b>utilisée</b> pour réaliser les <b>travaux cellulaires</b> -> <b>C'EST LE CATABOLISME</b> 2) <b>l'énergie stockée dans les composés à haut potentiel énergétique</b> pour synthétiser les <b>macromolécules indispensables</b> -> <b>C'EST L'ANABOLISME</b>

## 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.



## 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**.



One year of PACES.  
@1YearOf

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



## C) Les Objectifs de la Bioénergétique.

**1er:** **Etudier les réactions :** est ce que la réaction peut avoir lieu et si oui quel est son sens (de A vers E ou de E vers A) ?

( **Rappel:** réactions possibles sont facilitées par les enzymes qui sont des catalyseurs/faciliteurs)

**2e:** **Les bilans énergétiques :** combien de molécules d'ATP produites, combien de molécules de KJ ou de kcal produit au cours de la réaction?

## D) La relation de GIBBS:



En bioénergétique on va décrire différentes énergies qui sont :

- **L'enthalpie total ( $\Delta H$ ) :** c'est l'énergie totale contenue dans un composé brûlé entièrement dans un calorimètre.

- **L'énergie entropique ( $\Delta S$ ) :** représente l'énergie du désordre du système
- **L'énergie libre ( $\Delta G$ ) :** c'est la quantité totale d'énergie susceptible de fournir un travail au cours d'une réaction à température ( $T^\circ$ ) et pression (P) constante.

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

- $T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273$
- 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

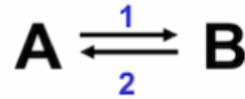
La capacité d'un système à fournir l'énergie utile pour réaliser un travail diminue au fur et à mesure que ce système se rapproche de son état d'équilibre

**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)

REACTION EXERGONIQUE	REACTION ENDERGONIQUE
<div style="text-align: center;"> <math>A \longrightarrow B</math> </div> <p style="text-align: center;">Déroulement de la réaction</p>	<div style="text-align: center;"> <math>A \longleftarrow B</math> </div> <p style="text-align: center;">Déroulement de la réaction</p>
<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>Cependant elle peut se dérouler spontanément dans l'autre sens (<b>B <math>\rightarrow</math> A</b>). (<i>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

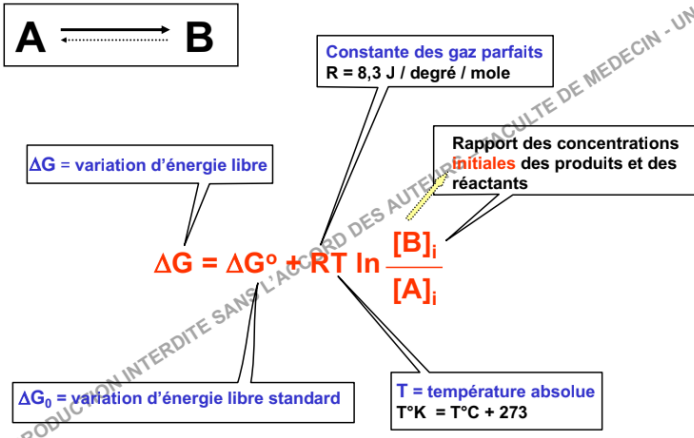
La mesure de l'énergie libre de Gibbs (ΔG) d'un système nécessite que l'on ait défini un état standard (ou état de référence)



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 ΔG°

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

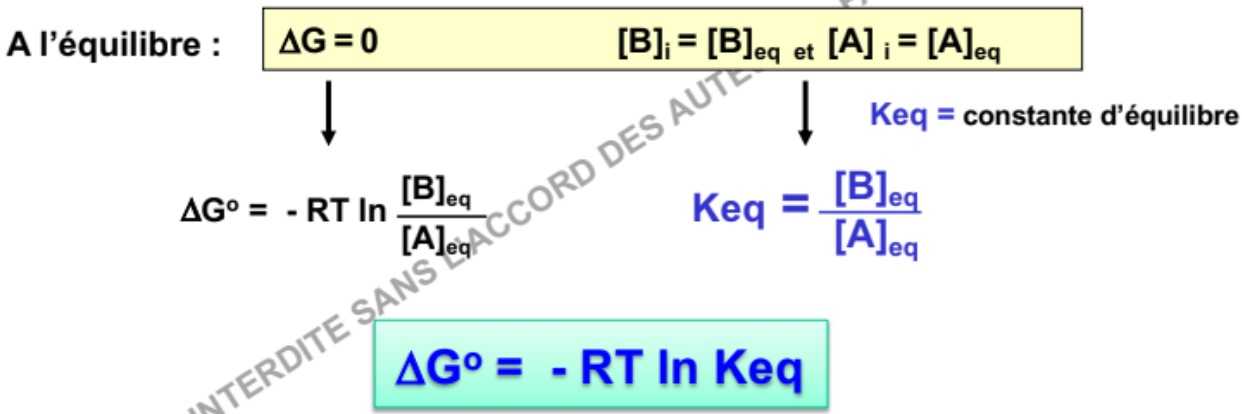
- Pression = 1 atm
- T° = 25° C = 298° K
- Concentration des solutés = 1 mol.L<sup>-1</sup>



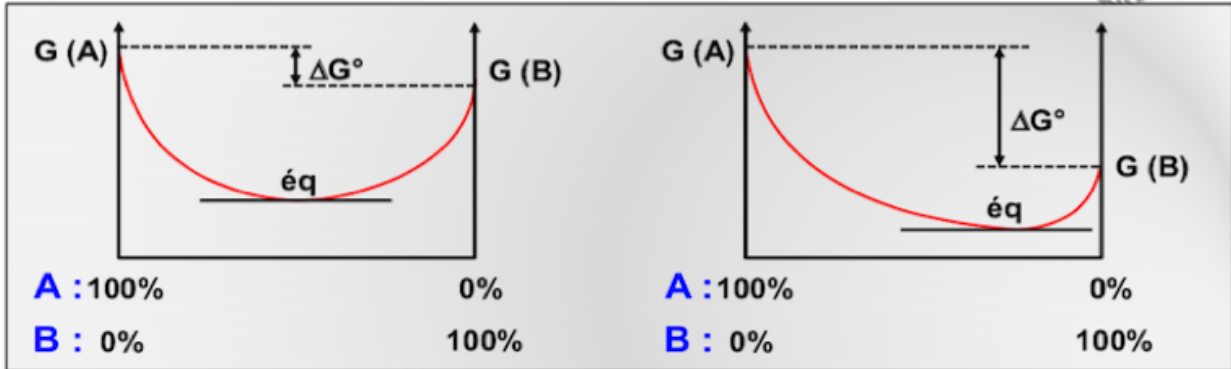
NB:

- Les concentrations des solutés sont celles à l'équilibre telles que : **Bi = Beq et Ai = Aeq**
- On peut donc calculer la constante d'équilibre Keq d'une réaction dans les conditions de l'état standard
- ΔG° nous informe sur l'état d'équilibre.

Lorsque que l'on est à l'équilibre, on ne bouge plus : ΔG = 0



Une réaction à l'équilibre ne signifie pas que les concentrations sont égales



Quelles que soient les concentrations de A et B ou la valeur de  $\Delta G^\circ$ ,

- la réaction évolue vers l'équilibre
- les conditions de l'équilibre sont indépendantes du sens de la réaction
- l'état d'avancement de la réaction au point d'équilibre dépend de  $\Delta G^\circ$ 
  - Si  $\Delta G^\circ$  est petit, l'équilibre est atteint pour  $[A] \sim [B]$  --> réversibilité
  - Si  $\Delta G^\circ$  est grand et négatif, réaction pratiquement totale et  $[B] \gg [A]$  --> irréversibilité

+++++ 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 | dans les cellules  
de la [eau]

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**

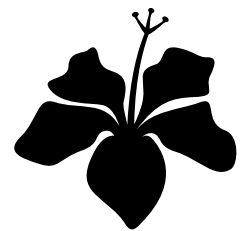
→ Ces réactions impliquent **souvent la formation où utilisation H<sup>+</sup>**.



Ainsi on a redéfini le  $\Delta G^\circ$  qui devient le  $\Delta G^{\circ\prime}$

**DEF  $\Delta G^{\circ\prime}$** : 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**



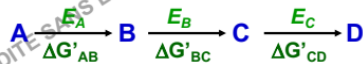
Ce  $\Delta G^{\circ\prime}$  va nous permettre de dire si une **réaction est possible** mais aussi de dire dans quelle **direction** va évoluer une réaction **pour atteindre l'équilibre** quand elle se produit dans des **conditions standards à PH=7**. On ignore toujours la présence de l'eau dans la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



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

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 **somme des  $\Delta G$  de chaque étape intermédiaire** (l'encadré en jaune).

## I. Réactions couplées

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

À 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 SUPÉRIEURE OU ÉGALE à l'énergie requise par la réaction endergonique** +++

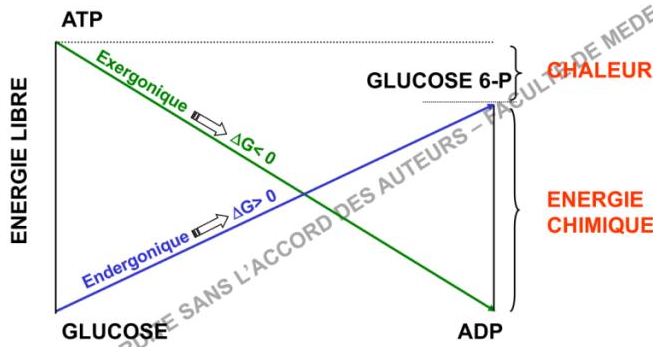
**Exemple: réaction de consommation de glucose**



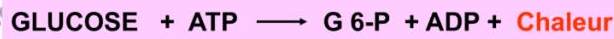
Cette réaction se déroule lorsque la **cellule a besoin d'énergie** ; le **glucose se transforme en G6P** grâce à l'**ATP** ( adénosine TRI-phosphate donc c'est une molécule a 3 phosphates) qui met **1** de ses **phosphate** sur le **C6 du glucose**. On obtient du **G6P**, l'ATP perd un phosphate et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



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



### III. BIOENERGETIQUE ET METABOLISME

A)

#### L'état stationnaire



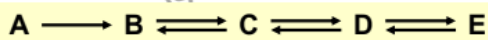
**DEF:** l'état d'un système est dit stationnaire si toutes les grandeurs qui le caractérisent restent constantes (stationnaires) au cours du temps.

Bon sinon c'est mimi depuis tout à 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

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.

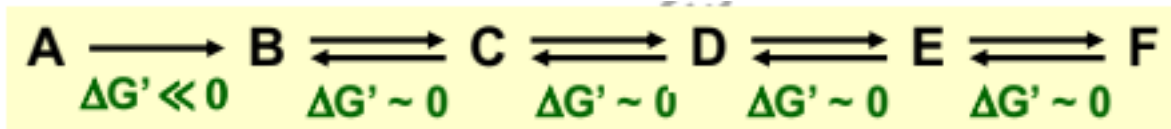
#### LA LOI DE CHATELIER:



**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. »

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

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

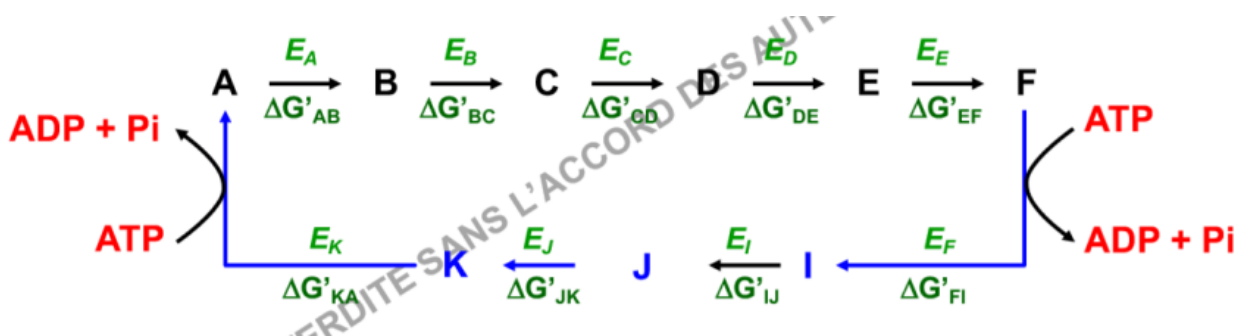
**Pour que la réaction aille bien dans le sens A -> F la cellule a intérêt à ce que la 1ere transformation de A -> B soit IRREVERSIBLE avec un  $\Delta G < 0$ +++ on le répète+++**

+++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 régularées 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 presente des molécules qui sont riches en énergie +++, qui, lorsqu'elles se **dégradent libèrent de l'énergie** ( Les liaisons riches en énergie sont représenter 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	$R-C(=CH_2)-O\sim P$	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+++

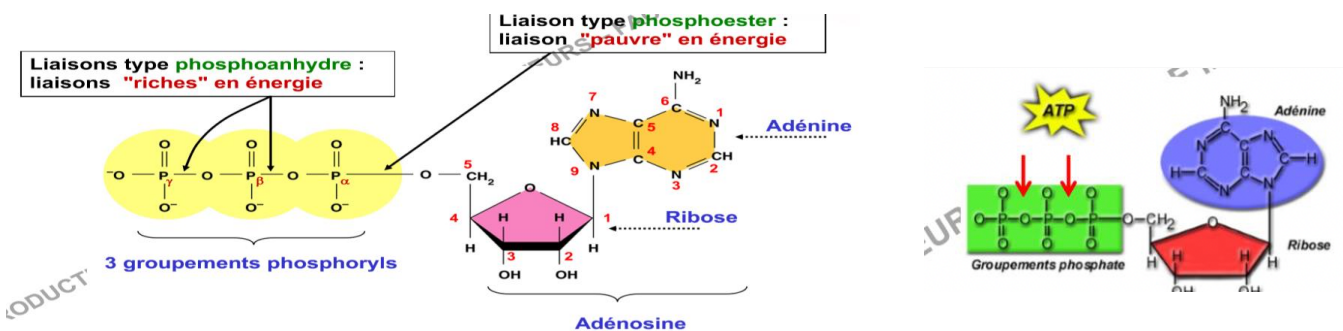
Présent dans toutes les **cellules** vivantes à concentration variable entre **10<sup>-3</sup> et 10<sup>-4</sup> mol/L**

**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 C<sub>5</sub>**, c'est la **liaison α** (en rouge tout petit sur le schéma) +++

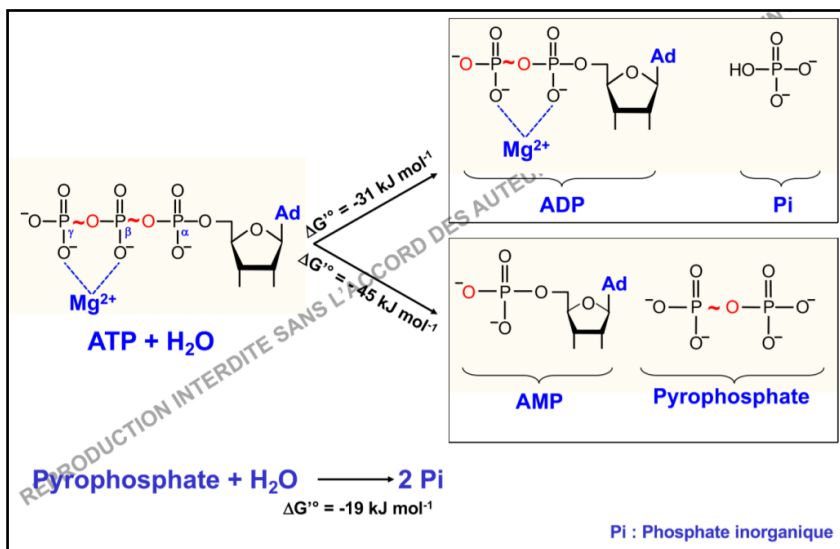
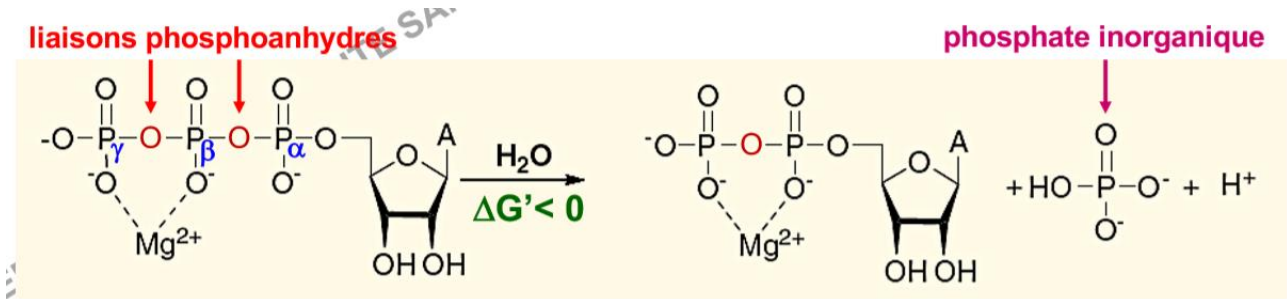
Puis les 3P sont reliés entre eux via deux **liaisons phosphoanhydres (γ et β** aussi en rouges) qui sont **riches en énergie**.

### 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 phosphoanhydride β** (entre α-β) ainsi que de la **liaison phosphoanhydride 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 -> 1 ADP+ 1 Pi + libération énergétique de 31 kJ/mol.

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

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

On obtient -> 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 )

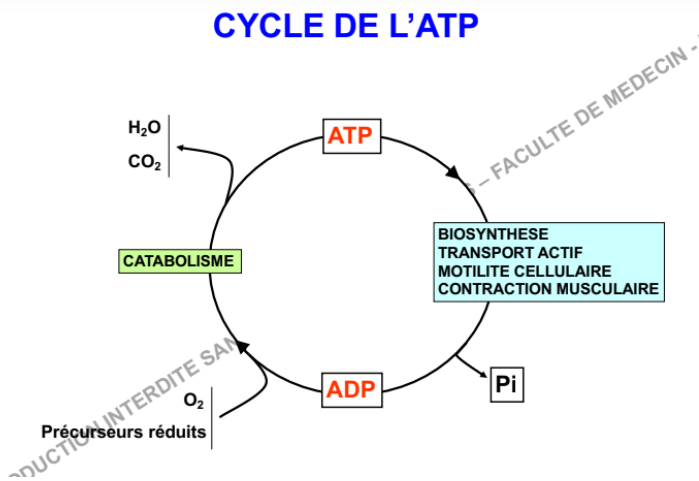
**Au final:**

- 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
		$A + ATP \longrightarrow A-P + ADP$

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



**Explications schéma:**

L'ATP ici comme on le voit sert à plusieurs choses: à la biosynthèse, le transports actif, la motilité cellulaire, et la contraction musculaire. Pour cela l'ATP est hydrolysé en ADP et rejette 1 Pi. Cet ADP peut ensuite ( par le biais d'une réaction catabolique ) récupérer des precurseurs réduits et de l'O<sub>2</sub> et rejeter de l'eau et du CO<sub>2</sub> pour reformer de l'ATP et recommencer un cycle.

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

**L'ATP peut être formé de différente 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.

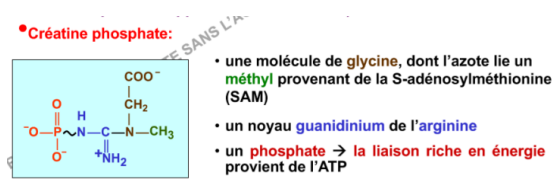
**4) La creatine Phosphate:**

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 ++++++

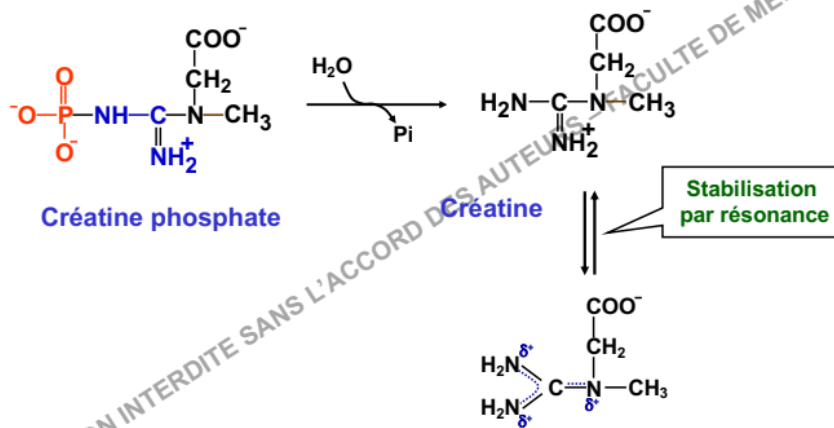
### Portrait de la CP:

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>
<b>50%</b> de la créatine provient de <b>l'alimentation</b> (viande/poisson)
<b>50%</b> de la créatine provient de la <b>synthèse d'Acide aminés</b> dans les cellules du Foie et des Reins
<b>Produit de la dégradation</b> : La <b>créatinine</b> permet d'apprécier la fonction rénale et quantifie la masse musculaire



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

### Réactivité de la CP:

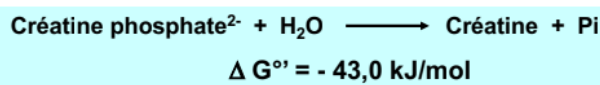


Amphithéâtre avant la covid

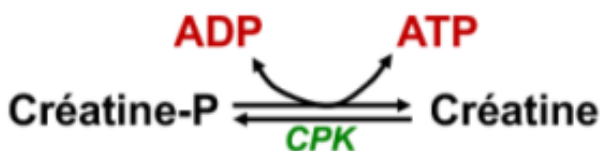


Amphithéâtre après la covid

IFMK, précurseur en distanciation sociale depuis 69 ans



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



1) La Créatine Phosphokinase (CPK)

• **Son portrait:**

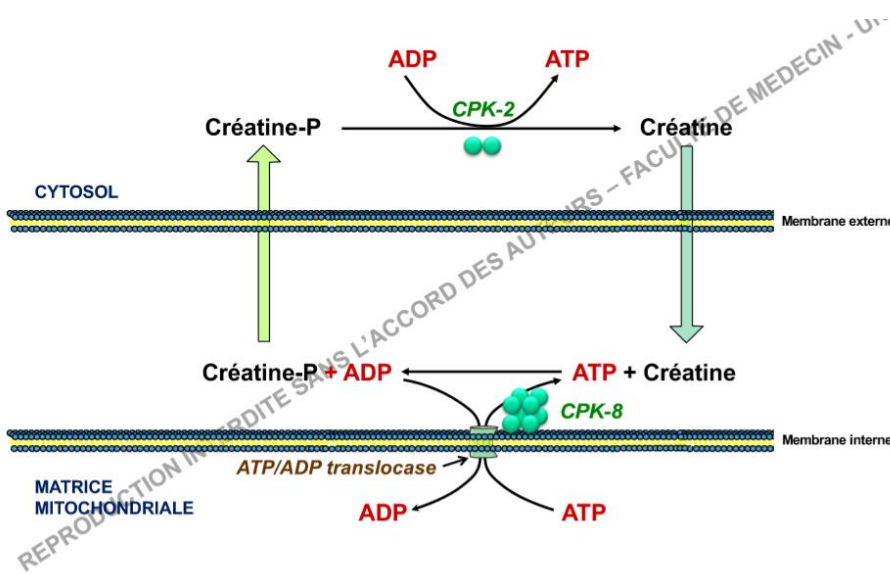
C'est une enzyme des vertébrés présente dans <b>le cerveau</b> , <b>les muscles</b> ainsi que <b>le cœur</b>
Catalyse l'hydrolyse de la liaison riche en énergie et synthétise un <b>ATP en transférant</b> directement l'énergie libérée ( <b>-43kJ/mol</b> ) et le phosphate sur l' <b>ADP</b>
Cette réaction couplée ne libère que <b>-13kJ/mol</b> 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 <b>dimère (CPK-2)</b> qui est présente dans <b>le cytoplasme</b> et <b>l'espace intermembranaire</b> des mitochondries	<b>forme octamère (CPK-8)</b> ancré à la <b>face externe de la membrane interne des mitochondries</b> en interaction avec l' <b>ATP/ADP translocase</b> .

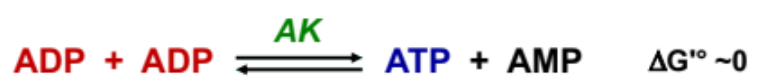


**Explications:** (je vous remets celle de l'année dernière pq elle est bien faite)  
 La **CPK-8** hydrolyse l'**ATP** provenant de la matrice mitochondriale pour transférer les **Pi** sur la **créatine**.

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) Adenylate kinase / Myokinase (AK):**

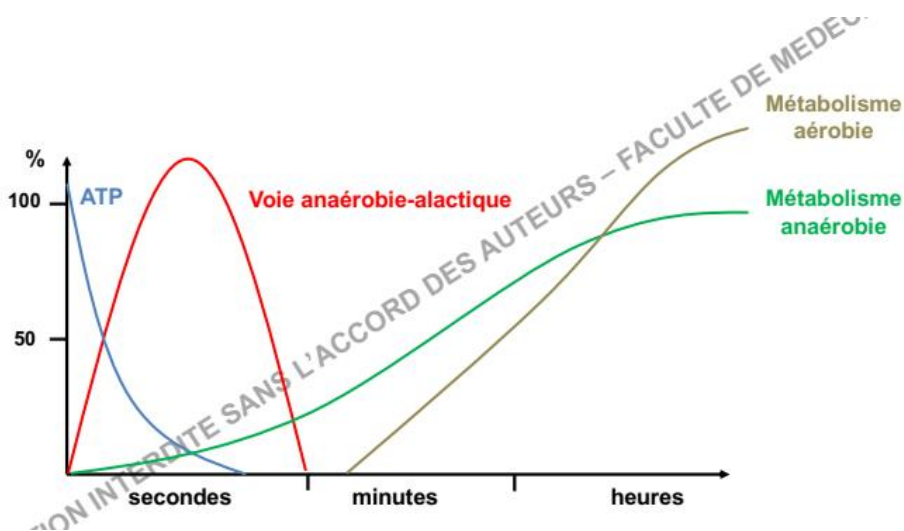
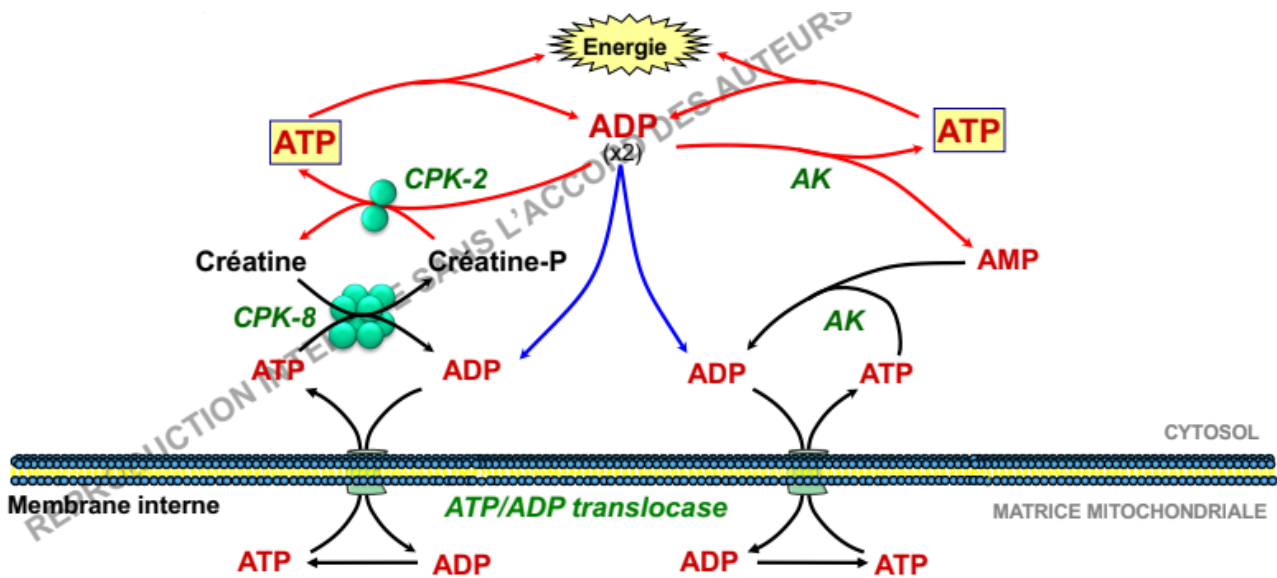


- Son portrait:

L'adénylate kinase 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 **anaérobie**) et ne fabrique pas de lactate (**alactique**).  
C'est donc la voie :

### ANAEROBIE-ALACTIQUE



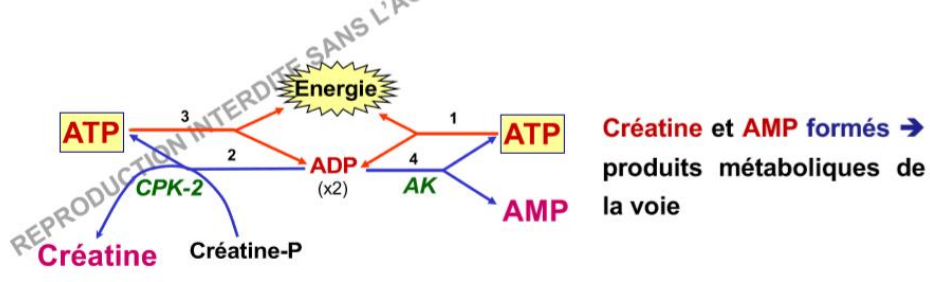
*On peut voir que cette voie est mobilisée très rapidement (quelques secondes) mais s'épuise très vite pour laisser place au voies métaboliques classique anaérobies et aérobie. Cette voie est donc d'un grand intérêt pour sa rapidité. Lors d'un besoin soudain en énergie nous faisons appel tout d'abord 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:

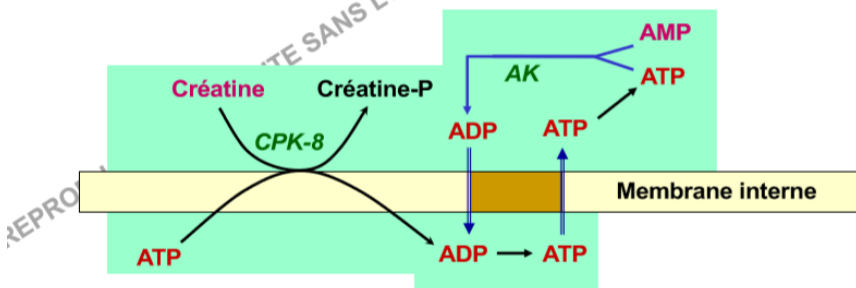
**Phase de récupération:**

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



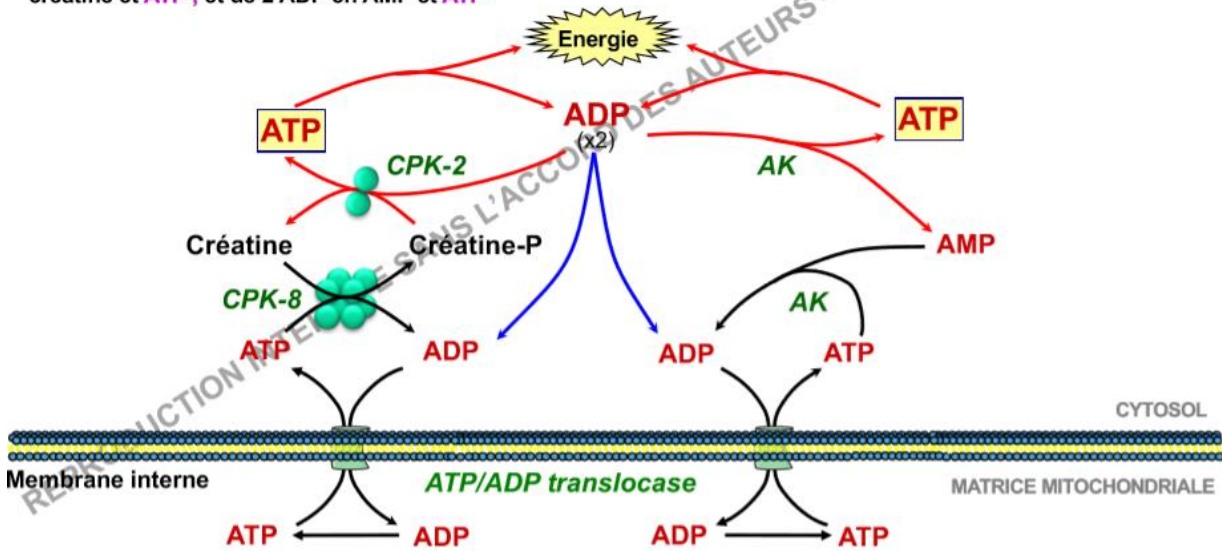
RECAP DE LA VOIE:

**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

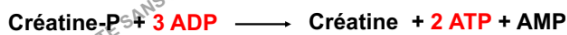
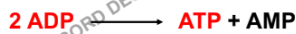


**Bilan énergétique:**

*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**.

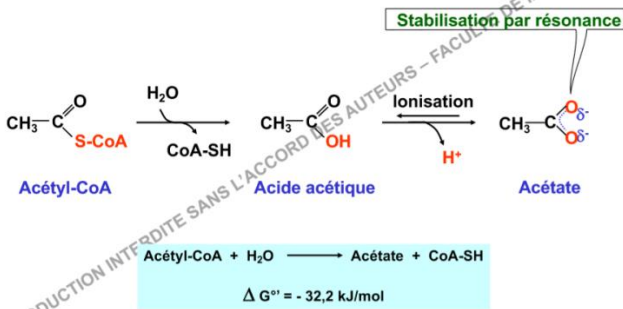
**En phase de récupération, la resynthèse de l'ATP et de la créatine phosphate est achevée au bout de 3 à 5 minutes**

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

- L'acetyl Coa

**L'acetyl 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

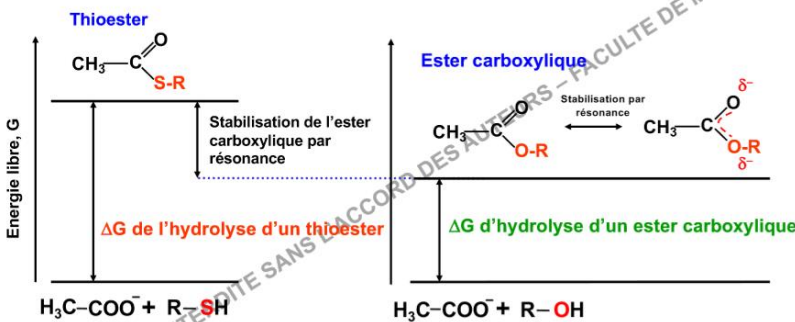


Lorsqu'il libère sa **LHE (liaison haute énergie)** contenue dans **la fonction thioester**, de l'énergie de l'ordre de **32kJ/mol** est libérée.

De plus, l'hydrolyse d'un thioester est **thermodynamiquement plus favorable** que celle d'un ester carboxylique.

**Energie d'hydrolyse d'un thioester / ester**

L'hydrolyse d'un **thioester** est thermodynamiquement plus favorable que celle d'un **ester carboxylique**



*Vous pouvez le voir avec ce graphique que le ΔG de la liaison thioester est plus important que le ΔG de l'ester carboxylique qui est plus faible du fait de la stabilisation par résonance.*

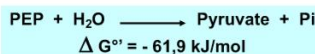
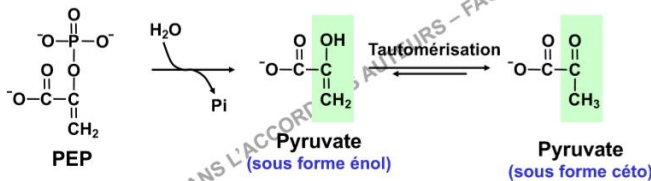
*De plus l'acétyle-S-CoA va permettre de transférer des groupement acétyle activé, tout comme l'ATP qui transfert des groupements phosphorylés activés !!*

L'**acétyl-S-CoA** a un fort potentiel de transfert de groupements acétyles parce que la réaction est très exergonique

L'**acétyl-S-CoA** permet le transfert d'un acétyle activé, tout comme l'ATP permet le transfert de groupements phosphorylés activés

- 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<sup>-</sup> cédé vont aller réduire le composé accepteur, qui lui a une action oxydante (c'est donc l'oxydant). (*Ok je sais ça partait un peu compliqué comme ça mais au fur et à mesure on capte les réactions d'oxydo-red*)

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

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

#### 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
 
$$\begin{cases} AH_2 \rightarrow A + 2e^- + 2H^+ \\ B + 2e^- + 2H^+ \rightarrow BH_2 \\ \hline AH_2 + B \rightarrow A + BH_2 \end{cases}$$
- Transfert via l'ion hydrure [H<sup>-</sup>]
- Transfert via une réaction directe de l'oxygène → incorporation covalente de l'oxygène dans une molécule organique

#### 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**



- $E_A$  : potentiel redox du couple Aox/Ared en Volt (V)
- $E_A^\circ$  : potentiel redox standard (V)
- $R$  : constante des gaz parfaits (8,314 J/mol<sup>o</sup>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)

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) ++**

