

# BIOENERGETIQUE

## I. INTRODUCTION

- ❖ Un organisme vivant doit se conserver et se perpétuer : pour se conserver l'organisme a besoin de **matière et d'énergie** : on parle de **métabolisme** (**catabolisme** et **l'anabolisme**).
- ❖ Pour se conserver, une cellule doit **continuellement travailler**, d'où la nécessité d'un **besoin continu en énergie**. Ce travail possède divers aspects:
  - ✓ **Mécanique** (ex: *mouvements des cellules*)
  - ✓ **Transport membranaire** (ex: *faire rentrer/sortir des molécules pour ses besoins*)
  - ✓ **Chimique** : (ex : *métabolisme cellulaire*)

L'énergie cellulaire est une **énergie chimique**.



Il existe plusieurs types de réactions chimiques :

- \* **Exergoniques** : réactions **libérant** de l'énergie dans le milieu biologique
- \* **Endergoniques** : réactions **nécessitant** de l'énergie pour avoir lieu

La cellule capte de l'énergie mais doit aussi pouvoir la céder au milieu extérieur sous forme de chaleur. Il y a donc un **échange** important entre l'organisme vivant et le monde extérieur.

- ❖ **Définition énergie utile ou l'énergie libre** : énergie utilisée pour une réaction biochimique.
- ❖ **Définition d'un système** (*cellule, organite, organe ...*) : réunion de matière servant à constituer un ensemble cohérent.

Système <u>ouvert</u>	Système <u>fermé</u>	Système <u>isolé</u>
<p>Système ouvert</p>	<p>Système fermé</p>	<p>Système isolé</p>
Echange <b>d'énergie et/ou de matière</b> avec le système extérieur : <b>cellule</b> .	Echange <b>d'énergie</b> avec le système extérieur, mais <b>pas de matière</b> .	<b>Aucun échange</b> avec le système extérieur.

### Caractéristiques de la cellule :

- ✓ Elle vit en **rapport direct** avec l'environnement extracellulaire.
- ✓ **Système isotherme ouvert** : elle fonctionne à **température** et à **pression constantes**.

- ✓ La cellule peut réutiliser l'énergie stockée dans les composés à **haut potentiel énergétique** pour synthétiser les macromolécules indispensables, c'est l'**anabolisme**.
- ✓ Toute cellule vit et se développe par des échanges ininterrompus de matière et d'énergie avec l'environnement.

Cellules Végétales	Cellules animales
Peuvent fabriquer tout ce dont elles ont besoin en captant l'énergie solaire via <u>photosynthèse</u> → Elles sont <b>autotrophes</b> .	Peuvent pas tout fabriquer et utilisent donc des <u>nutriments</u> pour en extraire l'énergie qui sera ensuite stockée pour des travaux ou directement utilisée. → elles sont <b>hétérotrophes</b> .

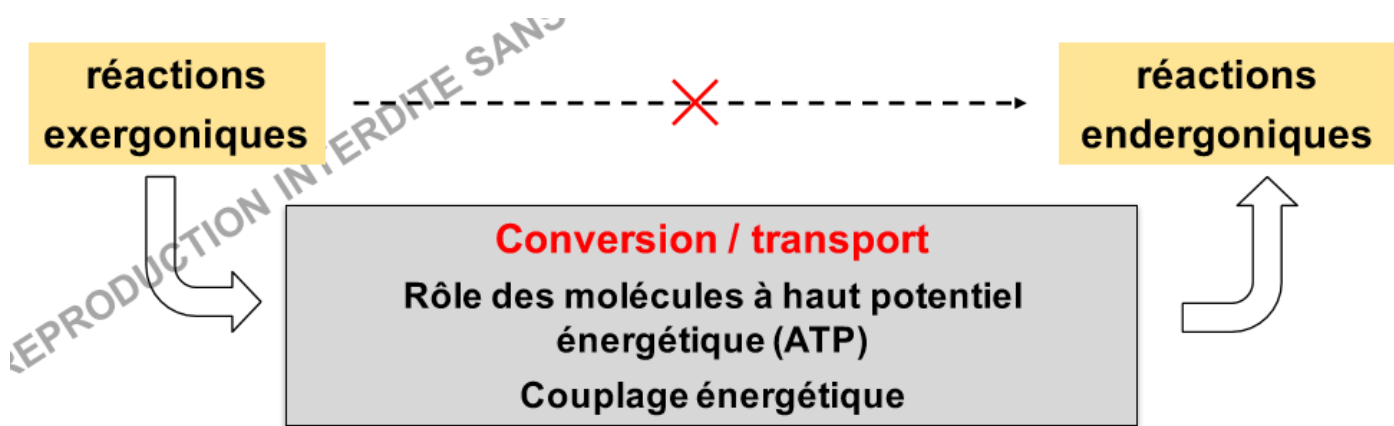
## I. BIOENERGETIQUE

### A ) LE METABOLISME

**Définition bioénergétique** : concerne la **captation d'énergie du monde extérieur** (*approvisionnement*), de **son transfert** dans le compartiment intracellulaire, puis de **son utilisation**.

Elle étudie la dégradation des aliments (pour en extraire l'énergie, la **conversion de cette énergie en ATP** (*forme de stockage et de transfert d'énergie*), et enfin l'utilisation de cette énergie pour effectuer des travaux (*contraction musculaire, anabolisme*).

Ceci peut se faire grâce, entre autre, à la **combinaison de réactions qui produisent de l'énergie**, c'est-à-dire des **réactions exergoniques**. Ces réactions vont donner de l'énergie à des réactions endergoniques qui ne peuvent pas avoir lieu spontanément.



En biochimie, en général, un **précurseur A** va donner lieu à une **voie métabolique** avec comme **produit final E**. Toutes ces réactions ont lieu grâce à l'intervention **d'enzymes spécifiques** à chaque réaction.

- En biochimie on étudie donc une voie métabolique qui comporte différents **intermédiaires**, que l'on appelle des **métabolites**, un **précurseur** et un **produit terminal**.

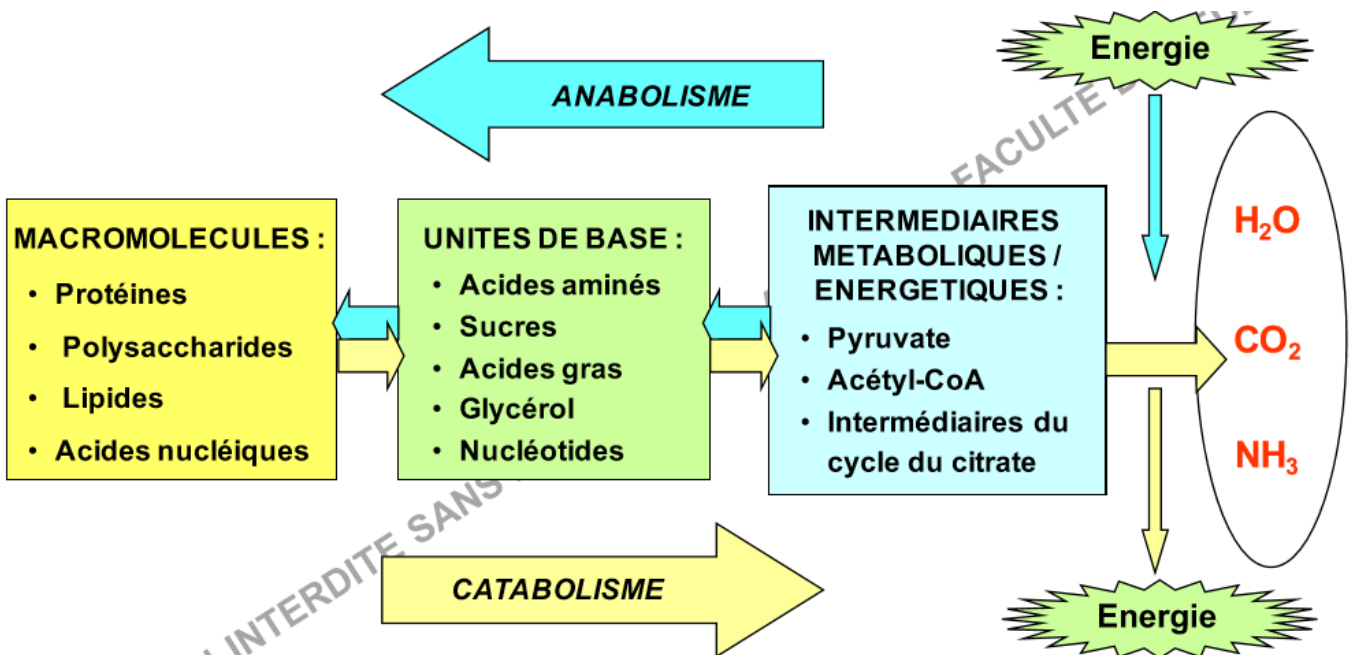


### Rappel des définitions :

- ❖ Les voies cataboliques : libèrent de l'énergie en dégradant de molécules complexes en composés simples
  - ❖ Les voies anaboliques : synthétisent des molécules complexes à partir de molécules simples. Elles ont besoin de l'énergie qui est libérée par les voies cataboliques.
- La régulation des voies se fait au niveau de l'activation/inhibition des enzymes (permettent d'augmenter la vitesse de réaction).

### RAPPELS :

- ✓ 1g de glucides = 4 kcal/g = 16.7 KJ/g -> Une grande partie de l'énergie provient des glucides, cependant le stockage sous forme de glucides est extrêmement limité.
- ✓ 1g de lipides = 9 kcal/g = 37.6KJ/g -> Contrairement aux glucides, le stockage sous forme de lipides est bien plus important.
- ✓ 1g de protéines = 4 kcal/g.



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

Notre alimentation contient des **macromolécules** (protéines, polysaccharides et lipides qui sont très énergétiques contrairement aux acides nucléiques qui ne peuvent qu'être fabriqués) qui vont être transformées en **unités de bases** (une 20aine d'AA, sucres, acides gras ...).

Ces unités de base, elles même transformées en **intermédiaires énergétiques/métaboliques** (Pyruvate, Acétyl-CoA ou intermédiaires du Cycle du Citrate). Puis ces intermédiaires peuvent être dégradés en **eau, Co<sub>2</sub> ou NH<sub>3</sub>** pour **recupérer l'énergie** qu'ils contiennent.

Cette énergie est ensuite récupérée par l'anabolisme qui fait l'inverse en reconstruisant des macromolécules.



Pour reconstruire les macromolécules, l'anabolisme fait l'inverse du catabolisme mais il utilise des voies différentes ! Les **voies métaboliques** sont **réversibles** mais **pas la réaction en soit**, on doit utiliser des **intermédiaires différents**.

## B. PRINCIPES DE BASE

La bioénergétique étudie les variations d'énergie qui permettent de prédire si une réaction aura lieu, dans quel sens et de façon spontanée ou non.

**1<sup>er</sup> principe** : L'énergie totale de l'univers demeure constante.

L'énergie peut être transférée, transformée, mais jamais créée ou détruite.

**2<sup>ème</sup> principe** : L'entropie de l'univers augmente.

L'entropie reflète l'état de désordre, et l'état désordonné est plus probable que l'état ordonné.

∞ L'énergie = toutes les formes de travail et de chaleur,

∞ l'entropie = définit le degré de désordre ou de hasard.

## C) LA RELATION DE GIBBS

Il faut pouvoir étudier la possibilité d'une réaction, pour cela Gibbs a établi une relation fondamentale liant différentes énergies.

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

- ❖ **Energie libre (G)** : quantité d'énergie susceptible de fournir un travail au cours d'une réaction à température et pression constantes.
- ❖ **Enthalpie totale (H)** : énergie totale contenue dans un composé brûlé entièrement dans un calorimètre.
- ❖ **Energie entropique (S)** : énergie du désordre du système.

**$\Delta G$  = Variation d'énergie libre, exprimée en kJ/mol**

- ✓ Energie disponible pour un travail, **tend vers 0 lorsque l'équilibre est atteint**, et **permet de prédire si la réaction est possible**.
- ✓ Mesure l'énergie d'un système qui produit un travail utile (pas la chaleur qui est une perte d'énergie)

**$\Delta H$  = Variation d'enthalpie du système, exprimée en kJ/mol**

- ✓ Chaleur libérée ou absorbée lors de la réaction, ne permet pas à elle seule de prédire le sens de la réaction.

**$\Delta S$  = Variation d'entropie du système, exprimée en kJ/mol\*degré**

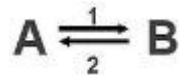
- ✓ Mesure l'état de désordre, ne permet pas non plus à elle seule de prédire le sens de la réaction.

Une réaction biologique **tend spontanément vers un état d'équilibre plus stable.**

→ Une certaine quantité d'énergie est nécessaire pour acquérir cette stabilité. Une fois à l'équilibre, la réaction est **figée** et le travail n'est plus possible. Ainsi la capacité à fournir l'énergie diminue plus on se rapproche de l'état d'équilibre.

- ❖  $\Delta G = 0$  Le système est à l'**équilibre**, la réaction s'arrête.
- ❖  $\Delta G < 0$  Le système est **instable**, la réaction **se déroule spontanément** pour atteindre l'état d'équilibre.
- ❖  $\Delta G > 0$  Le système a **besoin d'un apport d'énergie** du milieu extérieur pour déclencher la réaction. La réaction va être couplée à une autre réaction possédant un  $\Delta G < 0$  pour permettre que la réaction ait lieu, elle n'est donc pas spontanée.

**Exemple :**



Soit un système composé de A et B. Si on prend la réaction dans le sens 1, on peut avoir 3 situations différentes :

- ✓ Si  $\Delta G < 0$  et  $G_B < G_A$  : la réaction est **exergonique**, elle peut se dérouler **spontanément** dans le sens 1.
- ✓ Si  $\Delta G > 0$  et  $G_B > G_A$  : 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  $\Delta G = 0$  et  $G_B = G_A$  : la réaction est à l'**équilibre**.

Réaction <b>Exergonique</b>	Réaction <b>Endergonique</b>
$A \longrightarrow B$	$A \longleftarrow B$
<p>La molécule initiale A a une énergie libre supérieure à celle du produit final B (<math>G_B &lt; G_A</math> @ <math>\Delta G &lt; 0</math>).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Avant de donner B, la molécule <b>A doit être activée dans un état de transition</b> plus haut en énergie qui correspond à l'<b>énergie d'activation</b>.</li> <li>→ A ce moment, la réaction se fait <b>spontanément de A vers B</b>.</li> </ul>	<p>B ayant une énergie libre supérieure à celle de A (<math>G_B &gt; G_A</math>, <math>\Delta G &gt; 0</math>)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ la réaction est <b>impossible spontanément dans le sens A vers B</b>.</li> <li>→ Par contre elle est possible spontanément dans le sens B vers A.</li> </ul>

## D) LA NOTION D'ETAT STANDARD

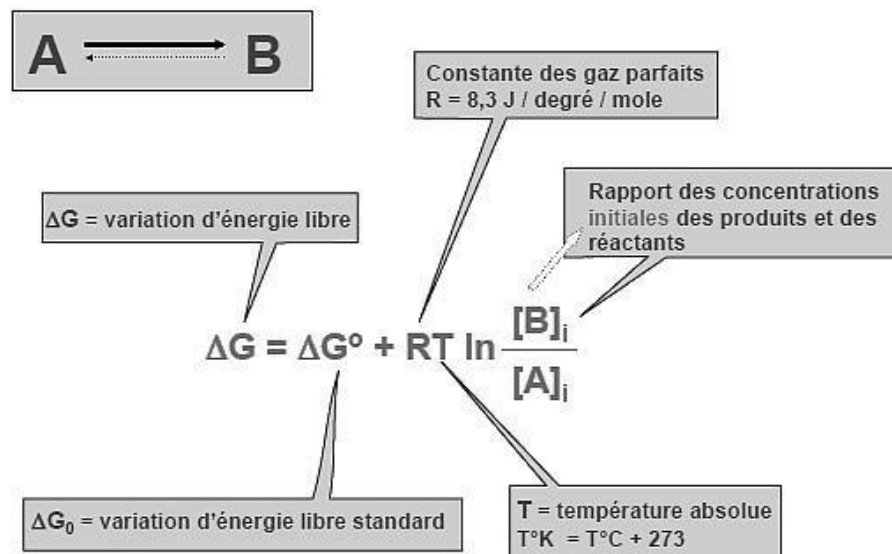
La mesure de l'énergie libre  $\Delta G$  d'un système nécessite que l'on ait défini un **état standard** (ou *état de référence*) où l'**énergie libre** est désignée par  $\Delta G^\circ$ .

**Définition état standard :** état est l'état dans lequel un élément ou un composé est le plus stable à la température et à la pression ordinaire dans un **système fermé**.

Pour les chimistes les conditions définissant l'état standard sont :

- ✓ Pression = **1 atmosphère**
- ✓ Température = **25°C (soit 298 °K)**
- ✓ Concentration des solutés = **1 mole/litre**
- ✓ **pH = 0** © incompatible avec la vie

!/ \  $\Delta G$  représente la variation d'énergie libre, et  $\Delta G^\circ$  la variation d'énergie libre **dans les conditions standards**.



Le  $\Delta G^\circ$  permet également de déterminer la **constante d'équilibre** d'une réaction donnée. Lorsque  $\Delta G$  est égal à 0, le  $\Delta G^\circ$  est à l'équilibre.

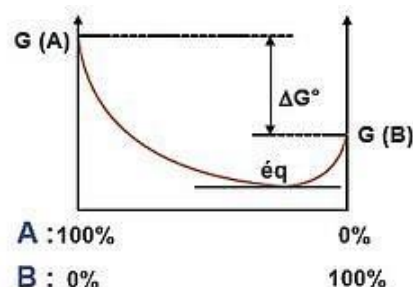
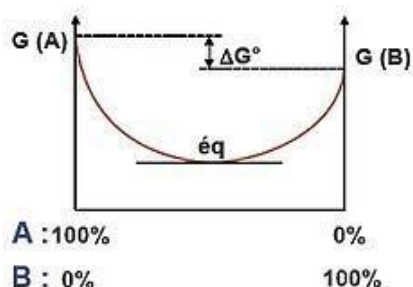
$$\Delta G^\circ = - RT \ln K_{eq}$$

$$K_{eq} = \frac{[B]_{eq}}{[A]_{eq}}$$

!/ \ A l'équilibre, les concentrations des réactifs **ne sont pas forcément égales** !!

$\Delta G^\circ$  informe sur l'état d'équilibre de la réaction  $A \rightarrow B$ . Quelles que soient les concentrations de A et de 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  $[A] \approx [B]$  et la réaction est **réversible**
  - Si  $\Delta G^\circ$  est **grand** et négatif, la réaction est pratiquement totale et **irréversible dans le sens de A à B** avec  $[B] \gg [A]$ .



Réactions chimiques	Réactions cellulaires
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Système isolé</li> <li>- Tend vers l'équilibre</li> <li>- Conditions standards</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Système ouvert</li> <li>- Vers des voies métaboliques irréversibles</li> <li>- Pas dans les conditions de "l'état standard"</li> </ul>

## E) ETAT STANDARD ET CONDITIONS PHYSIOLOGIQUES

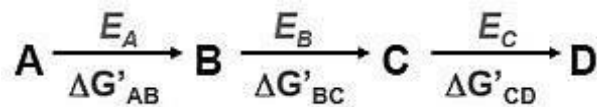
En chimie il n'y a pas d'échange avec l'extérieur et on peut travailler dans les conditions de l'état standard. En biochimie, on travaille avec des **systèmes en relations continues avec l'extérieur**, on **ne peut donc pas utiliser les conditions de l'état standard**.

On a donc défini des conditions compatibles avec la physiologie, ainsi on utilise un  $\Delta G'$  qui correspond à la modification de l'énergie libre standard à **pH = 7,0**, il permet de prédire dans quelle direction va évoluer la réaction dans les conditions standard physiologiques :

- ✓ Concentration initiale de tous les composants = **1 mole/litre**
- ✓ Température = **25°C**
- ✓ Pression constante = **1 atmosphère**
- ✓ **pH = 7,0**

! L'eau qui est une constante n'est plus prise en compte dans l'expression des constantes d'équilibres.

Dans une cellule, les réactions vont de A à D plutôt que de A à B. Le **réactant/substrat** d'une enzyme conduit à un **produit** qui lui-même devient substrat d'une deuxième enzyme (*etc.*).



Chaque réaction va donner lieu à un  $\Delta G'$ . Grâce à lui on peut **déterminer si telle réaction est possible ou non**. Par contre on ne considère pas individuellement le  $\Delta G'$  d'une réaction, mais à **la somme de tous les  $\Delta G'$  des réactions se déroulant entre le substrat initial et le produit terminal**.

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

## F) REACTIONS COUPLEES

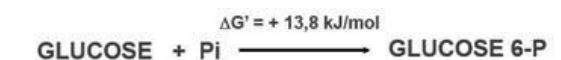
Les réactions endergoniques (*aussi bien du catabolisme que de l'anabolisme*) **nécessitent un apport d'énergie**. Cette énergie peut être **fournie par une réaction exergonique**, il suffit que l'énergie **dégagée par cette réaction soit  $\geq$  à l'énergie dont la réaction endergonique a besoin**

**Exemple :** Glucose



- 1) Le Glucose **entre dans la cellule grâce à des transporteurs très spécifiques** en fonction de la cellule.
- 2) Une fois dans la cellule, le Glucose est **phosphorylé par l'ATP en Glucose 6-Phosphate** ainsi il **ne peut plus sortir de la cellule** (*car le phosphate supplémentaire n'est pas pris en charge par les transporteurs*).
- 3) La transformation du Glucose en Glucose 6-Phosphate ne se fait pas seule, elle a **besoin de l'ATP**.

→ Le  $\Delta G$  de la première réaction est positif (*endergonique*), c'est pourquoi il faut coupler cette réaction à l'ATP dont la **conversion en ADP + Pi a un  $\Delta G$  négatif**. De plus, ce  $\Delta G$  étant supérieur au premier, leur couplage permet de rendre la réaction exergonique. La différence d'énergie qui n'est pas utilisée pour la phosphorylation du Glucose (*soit 16,7 kJ/mole*) sera **évacuée en chaleur**.



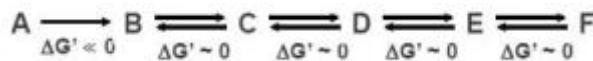
## G) APPLICATIONS AU METABOLISME

**Définition voie métabolique** : ensemble de réactions biochimiques dont chacune a pour substrat le produit de la réaction qui la précède.

**Important ++** : L'état d'un système est dit **stationnaire** si **toutes les grandeurs qui le caractérisent restent constantes** au cours du temps.

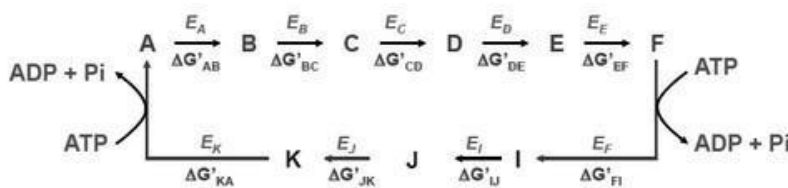
→ Quand on veut s'assurer qu'on voie donne lieu pour un produit, il faut s'assurer que toute la voie fonctionne du début à la fin. A l'état stationnaire, **quand [A] diminue et [E] augmente, [B, C, D] demeurent constantes**.

**Loi de Lechatelier** : 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**.



→ Si [A] augmente, la réaction va être irréversible afin que la réaction dans le sens inverse soit impossible. Ensuite [B] augmente et ainsi de suite pour permettre la production de F.

En général la nature est telle que le  **$\Delta G'$  de la première réaction est franchement négatif** pour **assurer l'irréversibilité de la réaction**. Cette première réaction est l'**étape limitante** et essentielle pour la régulation de la voie.



LES VOIES METABOLIQUES SONT **REVERSIBLES** d'un point de vue **PHYSIOLOGIQUES** mais **IRREVERSIBLES** d'un point de vue **THERMODYNAMIQUE**.

- F le produit final de la voie catabolique va être réutilisé pour produire du A. **La voie métabolique reverse** qui permet cette transformation est physiologiquement possible mais elle a **besoin d'un apport d'énergie**. De plus, cette voie est différente de la voie où A est transformé en F, elle utilise des **enzymes et des intermédiaires différents**.
- Les enzymes de chacune des voies seront régulées de manière différente afin de n'avoir qu'une **seule voie active** (Si A @ F est active, F @ A est inhibée).

## II. MOLECULES ET LIAISONS RICHES EN ENERGIE

### A) GENERALITES

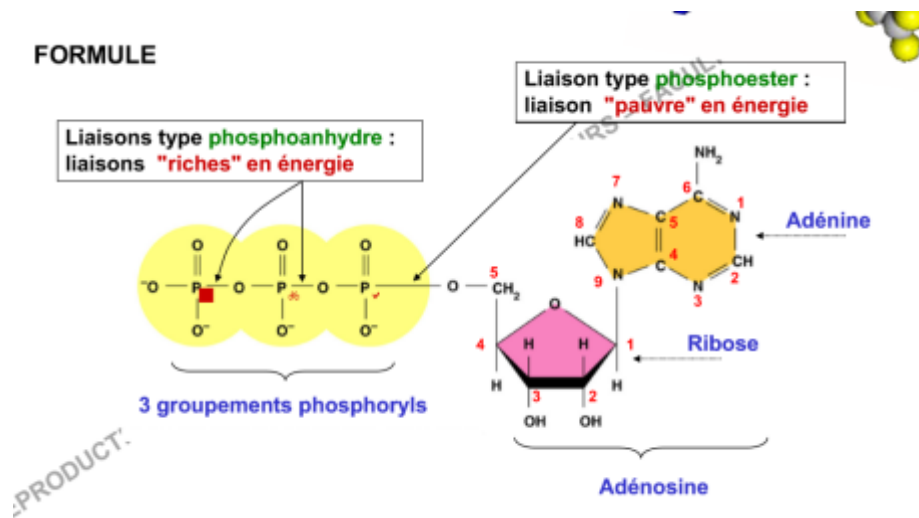
Certaines molécules contiennent des **liaisons riches en énergie** afin de pouvoir faire les réactions vues précédemment. La rupture de ces liaisons libèrera l'énergie nécessaire aux réactions endergoniques pour avoir lieu. Parmi les liaisons riches en énergie on trouve les liaisons :

- ❖ **Amidine-Phosphates** : Créatine Phosphate
- ❖ **Phosphoanhydres** : ATP, l'ADP, le GTP, le GDP, l'UTP, l'UDP (généralement dans les triPhosphates ou diP).
- ❖ **Acyl-Thioesters** : Acétyl-CoA
- ❖ **Acyl-Phosphates** : par exemple dans le 1,3 DiPhosphoGlycérate
- ❖ **Enol-Phosphates** : contenue dans le PhosphoEnolPyruvate

## B) ADENOSINE TRI PHOSPHATE (ATP)

### Caractéristiques :

- ✓ base des réactions biochimiques
- ✓ il y en a **très peu dans les cellules** (concentration de  $10^{-4}$  à  $10^{-3}$  mole/L) -> la répartition cellulaire à l'état basal est de **10 ATP pour 1 ADP**
- ✓ La teneur en ATP dans l'organisme est de **75g** (alors que la quantité synthétisée et hydrolysée quotidiennement est de 45 kg), d'où le **renouvellement très important**.
- ✓ **l'ATP ne circule pas** : La production est faite **localement** et utilisés localement (par la même cellule ou le même organe).
- ✓ **thermodynamiquement instable** et s'hydrolyse facilement en ADP ou en AMP -> cela lui permet de servir à la voie de **transporteur d'énergie** et de **donneur de groupement phosphoryle**



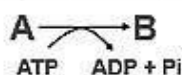
**Définition ATP** : formée d'une **Adénosine** composée d'une **Adénine** et d'un **Ribose**. L'ATP fonctionne à travers le **système adénylate** qui comprend :

- ❖ **ATP** : forme TriPhosphate comportant **deux liaisons riches en énergie** de type **Phosphoanhydres** en  $\beta$  et  $\gamma$  (le plus à l'extérieur de la structure), en plus d'une **pauvre en énergie** de type **Phosphoester** en  $\alpha$ .
- ❖ **ADP** : forme DiPhosphate avec **une liaison riche en énergie** (Phosphoanhydre) et **une pauvre en énergie** (Phosphoester).
- ❖ **AMP** : pas de liaison riche en énergie.

C'est l'hydrolyse des deux liaisons riches en énergie de l'ATP qui vont permettre la libération d'énergie nécessaire aux réactions.

- \* L'hydrolyse de la **2<sup>ème</sup> liaison Phosphoanhydre (liaison  $\alpha^* \beta$ )** libère autant d'énergie que la **1<sup>ère</sup> liaison (liaison  $\beta^* \gamma$ )**, soit **31 kJ/mol**.
  - \* L'association d'un cation divalent, le **Mg<sup>2+</sup>** à une molécule d'ATP **augmente la vitesse d'hydrolyse de l'ATP en rendant l'ATP plus stable**.
- Si on transforme l'ATP en **ADP** on libère un  $\Delta G'^{\circ}$  de **-31 kJ/mol**,
- Si on le transforme en **AMP** (on casse deux liaisons) on libère **-45 kJ/mol** + une molécule de **Pyrophosphate** qui contient une liaison riche en énergie, et l'hydrolyse de celle-ci libère : **2 Phosphates inorganiques** +  $\Delta G'^{\circ}$  de **-19 kJ/mol**.

transporteur de l'énergie



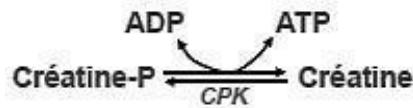
donneur de groupement phosphoryle





- un **noyau guanidinium** de l'Arginine
- un **Phosphate**.

Cette molécule est stabilisée par **résonance**. En se transformant en Créatine, la Créatine Phosphate **libère – 43 kJ/mol**, il s'agit donc d'une molécule à **haut potentiel énergétique**.



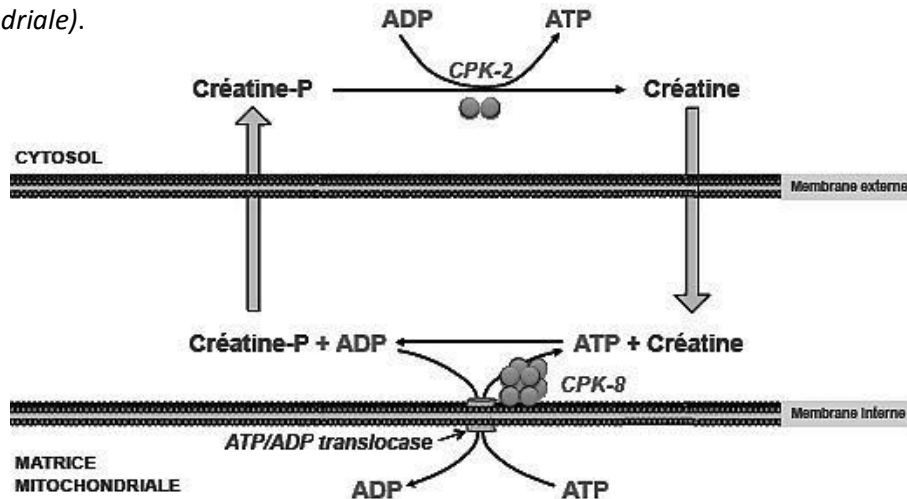
**La Créatine Phosphokinase (CPK)** : enzyme présente dans les **muscles** mais aussi dans le **cerveau** et le **cœur**. Elle catalyse l'**hydrolyse de la liaison riche en énergie de la Créatine Phosphate** et synthétise de la Créatine et un ATP en transférant directement l'énergie libérée (**- 43 kJ/mol**) et le Phosphate sur l'ADP

Cette réaction est **réversible**, ainsi quand le muscle est :

- ❖ **Riche en ATP** : l'énergie est récupérée pour faire de la **Créatine Phosphate**.
- ❖ **Pauvre en ATP et/ou l'ATP devient nécessaire (effort musculaire)** : l'hydrolyse de la Créatine Phosphate **restitue l'énergie** mise en réserve sous forme d'ATP.

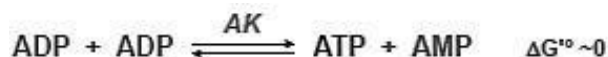
Dans les **muscles striés**, la CPK existe sous deux formes fonctionnellement différentes :

- ❖ **Cytosolique CPK-2** : forme **dimérique** présente dans le cytoplasme et l'espace inter-membranaire des mitochondries.
  - ➔ Utilise la Créatine Phosphate cytoplasmique pour **régénérer l'ATP cytoplasmique** en formant de la Créatine.
- ❖ **Mitochondriale CPK-8** : forme **octamérique** ancrée à la face externe de la membrane interne des mitochondries en interaction avec **l'ATP/ADP Translocase**. **Hydrolyse l'ATP provenant de la matrice mitochondriale** pour transférer les Pi sur la Créatine afin de **former de la Créatine Phosphate** qui diffuse à travers la membrane externe de la mitochondrie pour aller dans le cytosol (*l'ADP formé retourne dans la matrice mitochondriale*).



## D) ADENYLATE KINASE

L'Adénylate Kinase est présente **dans toutes les cellules** (*la Myokinase est la forme spécifique du muscle*). L'AK catalyse le **transfert d'un phosphate** et de sa liaison riche en énergie d'un ADP vers un autre ADP afin de former une molécule d'ATP et une molécule d'AMP.



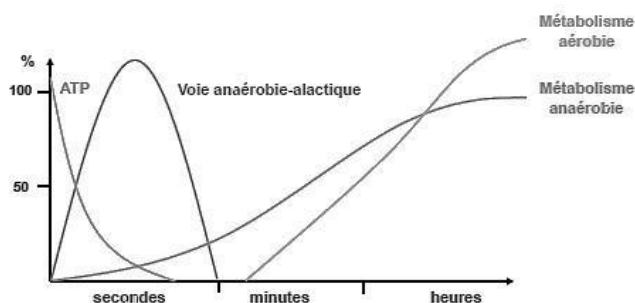
Cette réaction possède un  **$\Delta G'^{\circ}$  environ égal à 0**, c'est-à-dire que la réaction est à l'équilibre et peut s'effectuer dans les

deux sens, elle est donc réversible.

Avec la **CPK** et l'**AK**, le muscle dispose d'une **voie métabolique courte** et capable de **fournir immédiatement de l'énergie (ATP)** utilisable pour l'effort.

De plus, cette voie métabolique n'utilise **pas d'oxygène** et ne produit **pas de Lactate**, on l'appelle donc **voie anaérobie-alactique**.

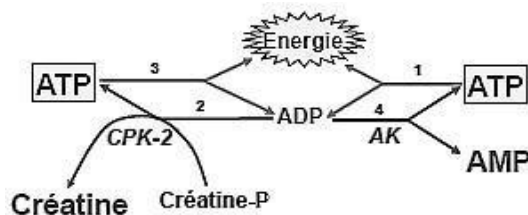
Quand on étudie un muscle qui se contracte, on voit que **l'ATP est épuisé très vite**. Mais **immédiatement la voie anaérobie-alactique se met en marche** et permet d'être utile les premières secondes de l'effort avant que le métabolisme anaérobie ne prenne le relais.



→ La voie **anaérobie-alactique** ne peut donc servir que durant une très courte période.

Au début de l'effort dans la voie anaérobie-alactique :

- 1) **l'ATP présent dans le cytoplasme est hydrolysé en ADP** (réaction 1),
- 2) Cet ADP est aussitôt **rephosphorylé en ATP** grâce à la **Créatine Phosphate** et à la **CPK-2** cytoplasmique (réaction 2).
- 3) L'ATP va ensuite être hydrolysé pour donner de l'énergie (réaction 3), et **l'ADP formé peut céder une liaison riche en énergie à un autre ADP** qui est retransformé en ATP et en AMP par action de **l'AK** (réaction 4).

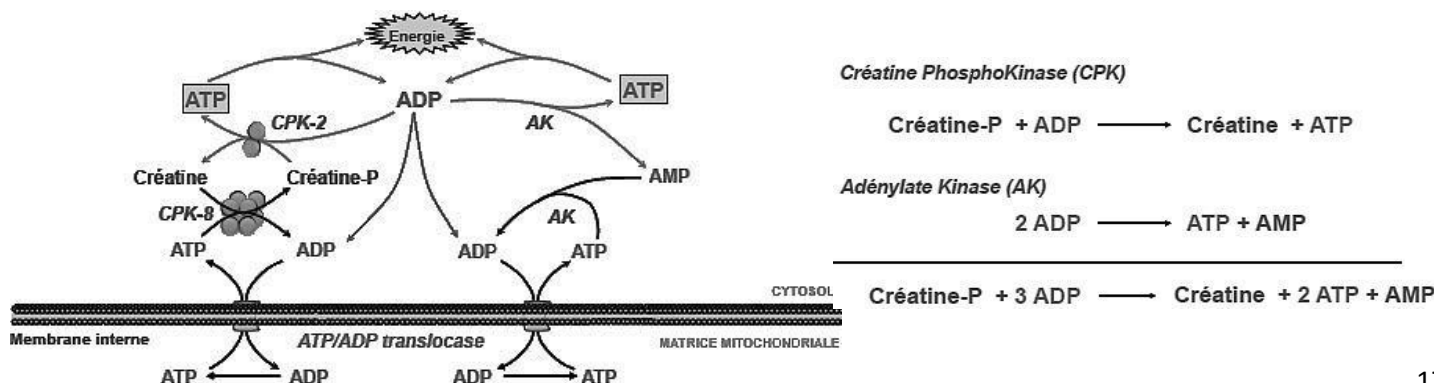


Après l'effort, la cellule se recharge en énergie en **transformant l'AMP et la Créatine** en **ADP et Créatine Phosphate** à partir des ATP produits par les mitochondries. Ensuite la chaîne respiratoire mitochondriale **phosphoryle les ADP en ATP (voie majeure)** qui servent à :

- ✓ Rephosphoryler l'AMP en **ADP** via **l'AK**.
- ✓ Activer la Créatine en **Créatine Phosphate** par action de la **CPK-8 octamérique**.

### **RESUME DE LA VOIE ANAEROBIE-ALACTIQUE :**

Au début de l'effort le muscle **utilise l'ATP cytoplasmique** ( $[ATP]/[ADP]$  élevée) augmentant ainsi rapidement la concentration d'ADP. De plus la liaison riche en énergie de la **Créatine Phosphate est hydrolysée par la CPK-2** (formation de Créatine) et celle de l'ADP par **l'AK** (formation d'ATP via le transfert d'une liaison riche en énergie d'un ADP sur un autre ADP) © Le muscle dispose alors de deux liaisons riches en énergie, donc de **2 ATP**.



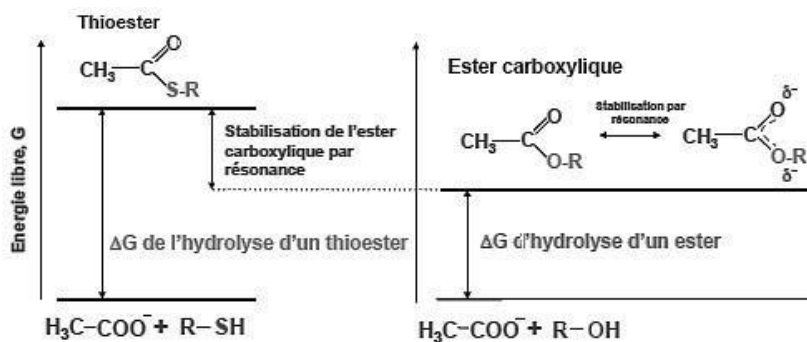
Par soucis relativement redondant, le muscle dispose de **5 mmoles/kg d'ATP** et **15 mmoles/kg de Créatine Phosphate**

- l'énergie est **plus stockée sous forme de Créatine Phosphate**.
- C'est pourquoi l'**ATP** présent dans le cytosol :
  - ❖ A un fort pouvoir énergétique mais de **faible durée** (*consommé en 2 à 3 s*)
  - ❖ N'est pas fourni aux muscles par le sang ou d'autres tissus, d'où sa **resynthèse continue** par les cellules musculaires.

## E) ACETYL-COA

Caractéristiques :

- ✓ **Thioester** riche en énergie.
- ✓ Transformable en **Acide Acétique** puis en **Acétate** qui peut être stabilisé par résonance.
- La transformation d'Acétyl-CoA en Acétate donne lieu à un  $\Delta G^\circ$  de **-32,2 kJ/mol**.
- ✓ Il s'agit donc d'une molécule à **haut potentiel énergétique**.
- ✓ L'hydrolyse d'un Thioester est **thermodynamiquement plus favorable** que celle d'un Ester Carboxylique.
- Le  $\Delta G$  de l'hydrolyse d'un Thioester libère plus d'énergie que le  $\Delta G$  d'hydrolyse d'un Ester car ce dernier est plus stable grâce à la résonance.



- ✓ De par sa réaction très exergonique, l'Acétyl-S-CoA a un **fort potentiel de transfert de groupements acétyles activés**

## F. PHOSPHOENOLPYRUVATE (PEP)

Caractéristiques :

- ✓ Le PhosphoEnolPyruvate contient une liaison riche en énergie
- ✓ peut être transformé en **Pyruvate sous forme énol** puis en **Pyruvate sous forme céto** par tautomérisation (*déplacement d'une double liaison*).
- ✓ Cette molécule libère énormément d'énergie de par son  $\Delta G^\circ$  de **-61,9 kJ/mol** => il s'agit de la molécule la plus Énergétique.

### III. POTENTIEL D'OXYDOREDUCTION

Les oxydations cellulaires sont des suites de réactions mettant en jeu des **hydrogènes et/ou des électrons**. 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

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** et le **composé accepteur** est un **oxydant**.

Le transfert d'énergie libre se fait en partie par **transfert d'électrons** lors de réactions d'oxydoréduction dans la mitochondrie.

- **L'oxygène** est le **plus fort accepteur d'électrons** et l'**agent oxydant intracellulaire le plus puissant** de par sa très forte électronégativité.

Les électrons voyagent d'une molécule à l'autre de différentes façons :

- ✓ Transfert direct d'**électrons**
- ✓ Transfert via une molécule d'**hydrogène**
- ✓ Transfert via l'**ion hydrure H-** (*plus rare*)
- ✓ Transfert direct via l'**oxygène** qui s'incorpore de façon covalente dans une molécule organique

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

**Définition potentiel Rédox** : force électromotrice.

Le potentiel redox est donné par la **formule de Nernst**, quand on parle d'une molécule réduite avec la libération de n électron(s).



**E<sub>A</sub>** : potentiel redox du couple A<sub>ox</sub>/A<sub>red</sub> en Volt (V)

**E<sub>A</sub><sup>°</sup>** : 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 (96 500 coulombs)

Il y a un lien entre **cette formule et le ΔG**. La seule notion à retenir ici, c'est qu'une réaction d'oxydoréduction qui se déroule **spontanément** entraîne une variation :

- ❖ **Positive** du **potentiel redox** -> **ΔE > 0**
- ❖ **Négative** de l'**énergie libre** -> **ΔG < 0**

$$\Delta G = -nF\Delta E$$

**Plus la différence entre les potentiels redox (ΔE) est élevée plus l'énergie libre (ΔG) libérée par la réaction d'oxydoréduction sera forte.**