BIOÉNERGÉTIQUE

Version finale

Hello les P1 j'espère que vous allez bien !! On se retrouve aujourd'hui non pas pour un cours de structu (ouffff on en pouvait plus de la structu) mais pour un cours que je trouvais beaucoup plus cool sur la bioénergétique. C'est moins un cours à par cœur mais plus à compréhension et ce n'est pas très compliqué vous allez voir. Comme d'habitude je reste avec vous tout au long de la fiche avec cette police. N'oubliez pas que vous êtes géniaux. Aller on attaqueeeee :

I-Introduction

Le concept d'énergie et de bioénergétique sont essentielles aux organismes vivants.

L'organisme a deux missions essentielles : **++**

- Se **conserver/vivre** il a donc des besoins de **matière** et d'**énergie**.
- Se **perpétuer**

Ces besoins de matière et d'énergie sont satisfaits grâce au métabolisme qui fournit à l'organisme de la matière et de l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

Le **métabolisme** regroupe **l'ensemble des réactions chimiques** ayant lieu à l'intérieur d'un être vivant et qui génère la matière et l'énergie pour maintenir l'organisme en vie. Il comprend :

- **Catabolisme =** dégradation
- ***L'Anabolisme =*** *biosynthèse*

Ça c'est super important on le répète dans pleins de cours donc c'est vraiment par cœur. D'ailleurs je vous rappelle les mnémos :

***Ca**tabolisme= **ca**sser les liaisons= dégradation et donc inversement anabolisme on construit = synthèse .*

ANABOLISME + CATABOLISME = METABOLISME *(par cœur !!)*

En considérant que l'énergie cellulaire est une énergie chimique, il existe 2 types de réactions :

- **EXERGONIQUE** : **libère** de l'énergie dans le milieu (= **réaction spontanée**)
- **ENDERGONIQUE : a besoin** d'énergie pour avoir lieu. (= **réaction non spontanée**)

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

Ptit mnémo :

__Ex__ergonique on renvoie l'énergie à l'__ex__térieur (on relâche de l'énergie dans le milieu)
En__d__ergonique (vous avez le __D__ de __d__ed__d__ans.) on fait rentrer de l'énergie dans la réaction (on la consomme) pour qu'elle ait lieu.

A) L'énergie c'est la vie !

Pour se conserver ou vivre, une cellule doit continuellement travailler, c'est-à-dire réaliser les réactions indispensables à sa survie : elle a donc des **besoins continus en énergie**.

Il faut de l'énergie libre pour réaliser un travail utile.

Au niveau cellulaire, l'énergie correspond à la **capacité de réaliser un travail**.

Celui-ci peut prendre différentes formes :

-**Mécanique** (mouvements d'organites, contraction musculaire).

-Transport transmembranaire (de molécules qui rentrent ou sortent de la cellule).

-Chimique (métabolisme cellulaire).

Ainsi :

-La cellule capte de l'énergie (sous forme de substrats carbonés pour les mammifères).

-Cède l'énergie (sous forme de chaleur).

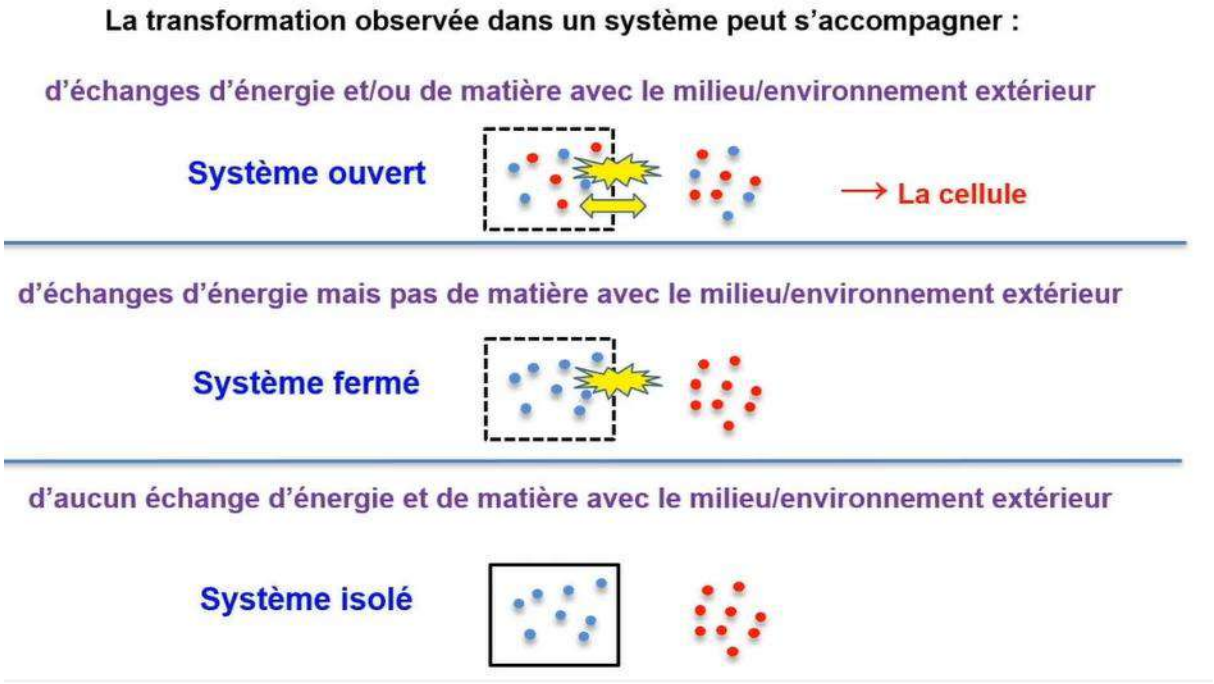
-Utilise de l'énergie (pour les travaux cellulaires). Pour utiliser l'énergie, celle-ci devra être transportée ou transférée vers l'endroit où elle sera utilisée.

Enfin, pour vivre et se développer, la cellule **échange en continu (échanges ininterrompus) de la matière et de l'énergie avec son milieu environnant ++** grâce à différents systèmes que nous allons étudier.

B)Différents systèmes appliqués à la bioénergétique

Un système = ensemble cohérent de matière considéré comme un tout. Il peut se résumer à une cellule, un organite, un organe.

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



Moi je me disais que l'énergie c'est invisible et donc plus petit que la matière donc dans un système fermé l'énergie peut quand même passer alors que la matière non.

Ce tableau il est super important +++ on apprend bien et surtout ***on fait la différence entre système isolé et fermé.***

Une cellule est un système **isotherme ouvert**+++ qui fonctionne à **température et pression constantes.**

L'hétérotrophie des cellules : contrairement aux plantes qui sont **autotrophes** (utilisent la lumière du soleil pour produire leurs macromolécules nutritives), les cellules animales sont **hétérotrophes** : elles utilisent des nutriments extérieurs qu'elles dégradent **(catabolisme)** pour libérer de l'énergie qui sera soit stocker soit utilisée pour des travaux cellulaires. L'énergie stockée dans les macromolécules énergétique *(qui vont être dégradées)* va permettre de recréer des macromolécules indispensables à l'organismes **(anabolisme)**.

C) Les grands principes de la bioénergétique

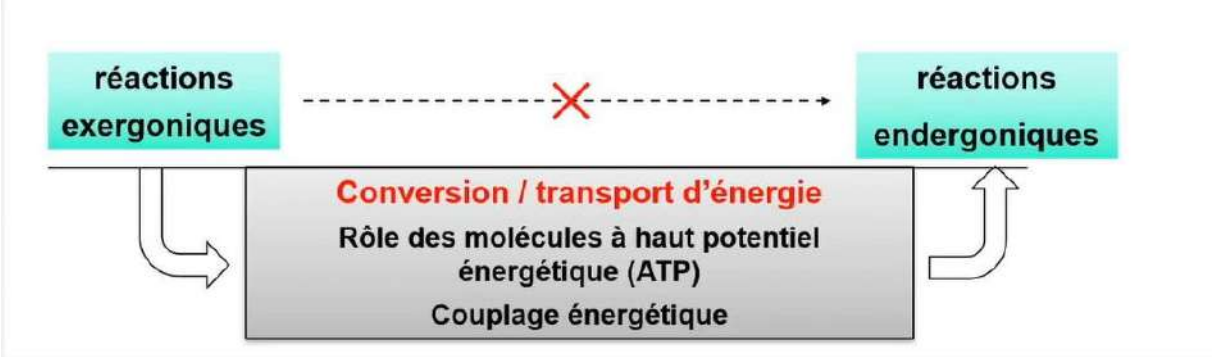
La bioénergétique : étude de l'approvisionnement, du transfert et de l'utilisation de l'énergie par la cellule.

Elle aborde l'étude de :
-La dégradation des aliments (polysaccharides, protéines, lipides) pour en extraire l'énergie par rupture des liaisons chimiques = correspond au catabolisme.
-La conversion de l'énergie dans les formes de stockage et de transfert biologiquement utilisables où l'ATP (Adénosine TriPhosphate) joue un rôle essentiel.
-L'utilisation de l'énergie pour effectuer des travaux divers (mouvements d'organites, contraction musculaire, anabolisme...)

D)Le couplage énergétique

Les réactions **exergoniques** produisent de l'énergie permettant le déroulement des réactions **endergoniques. ++** Il existe un **couplage énergétique** entre les deux types de réactions.

Cela implique des phénomènes de **conversion et de transport** d'énergie. Ces réactions ne sont possibles que grâce aux **molécules à haut potentiel énergétique** comme l'ATP.



E) Métabolisme = Anabolisme + Catabolisme

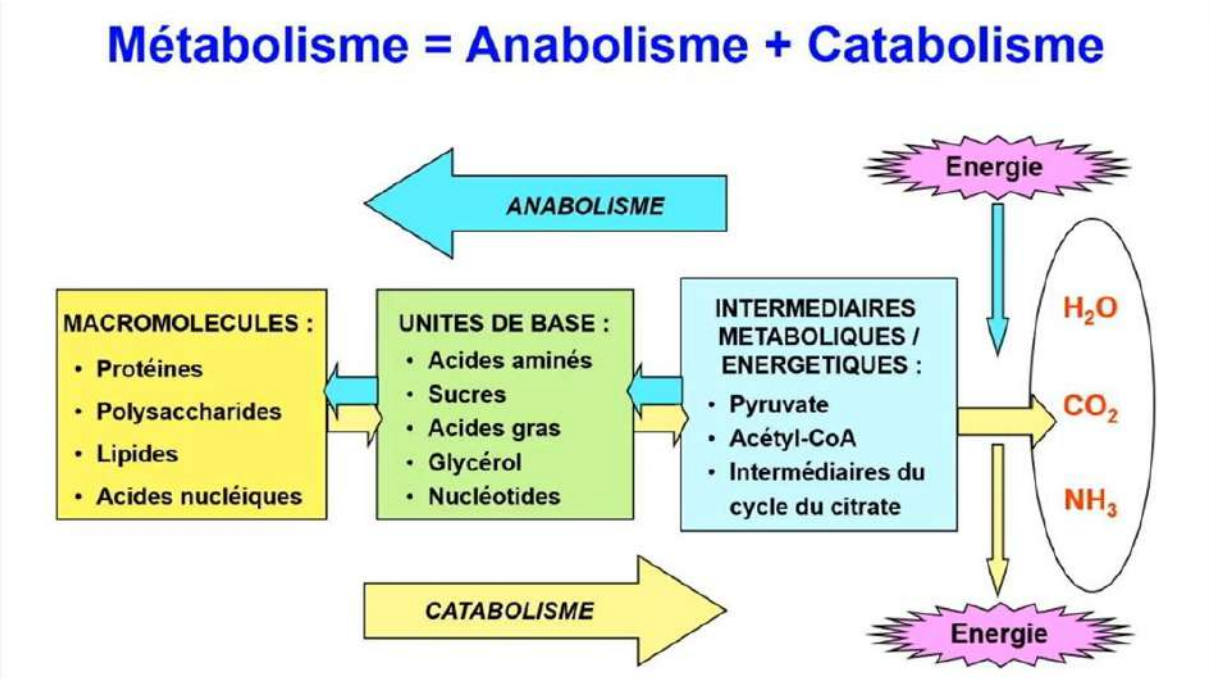
L'énergie nécessaire aux animaux provient de l'**alimentation** contenant des **macromolécules**. Ces macromolécules sont dégradées en **molécules de base**, elles-mêmes dégradées en **intermédiaires métaboliques et énergétiques.**

Au final, sont produits de l'eau (H2O), du CO2 et de l'ammoniac (NH3), avec libération d'énergie. **L'ensemble correspond au Catabolisme++**

Dans le sens inverse, la production de macromolécules à partir de molécules simples, en utilisant l'énergie libérée. **L'ensemble correspond à l'Anabolisme.++**

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

Retenez bien que les réactions cataboliques libèrent de l'énergie et les réactions anaboliques ont besoin d'énergie pour avoir lieu.



Tout ce qu'on a dit dans le paragraphe au-dessus est résumé dans ce schéma il est super important il faut bien le comprendre ++

Le professeur rajoute que la dégradation acides nucléiques ne libère pas beaucoup d'énergie contrairement aux autres macromolécules.

II-Bioénergétique et thermodynamique

Il y a une nécessité de relier les réactions du métabolisme aux lois physiques de la thermodynamique.

A) Généralités+ Définitions

Pour comprendre les voies de fonctionnement des voies métaboliques, il faut les relier aux **lois thermodynamiques**.

Les **lois de la thermodynamique** permettent d'expliquer les principes régissant les mouvements de la matière et de l'énergie entre les organismes et leur environnement, ainsi qu'au sein des organismes eux-mêmes. La bioénergétique n'est rien d'autre que l'application de ces lois aux réactions biochimiques.

Premier principe de la thermodynamique

« L'énergie totale de l'univers demeure constante »

Elle ne peut jamais être **créée ou détruite** mais elle peut être **transférée** et **transformée**. L'énergie totale d'un système et de son milieu extérieur demeure constante.

Second principe de la thermodynamique

« L'entropie de l'univers augmente »

Chaque transfert ou transformation d'énergie sont associés à des réactions passant d'un **état ordonné** à **un état désordonné.** L'état désordonné est toujours **plus probable.**

Tu ne sais pas ce que c'est l'entropie ? Attends deux secondes il y a une définition juste en dessous.

Ces principes sont vraiment à apprendre par cœur au mot près !!!

Et les définitions d'après également :

Définitions :

Energie : Toute forme de travail ou de chaleur

Entropie : Degré de désordre ou de hasard.

B) Relation de Gibbs

La relation de GIBBS relie la **variation d'énergie libre, l'enthalpie et l'entropie**. Elle permet de faciliter l'utilisation des 2 principes de la thermodynamique. La variation de l'énergie libre permet de définir **la direction** et l'**importance** de la réaction chimique.

Enthalpie totale **(H)** en kJ /mol : énergie totale contenue dans un composé brulé entièrement dans un calorimètre.

Energie libre **(G)** en kJ/mol : quantité d'énergie susceptible de fournir un travail au cours d'une réaction à température et pression constante.

Energie entropique **(S)** en kJ /mol/T : énergie du désordre du système. (différence entre H et G corrigée par T) *pas super important cette parenthèse mais c'est dans la diapo du professeur dons j'ai fait mes recherches et ça veut juste dire que ΔST = ΔH -ΔG*

La relation de WILLARD Gibbs :

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

Le signe Δ signifie une variation donc par exemple ΔG signifie la variation d'énergie libre.

Et dans cette formule T désigne la température en kelvin.

On retient cette formule c'est ++

Seul ΔG permet de prédire le **sens de la réaction** la plus favorable d'un point de vue énergétique *(pas le ΔS ou le ΔH isolés)*

Tous les systèmes tendent spontanément vers un **état d'équilibre** car cet état est le + stable.

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

Ainsi, on différencie 3 états du système :

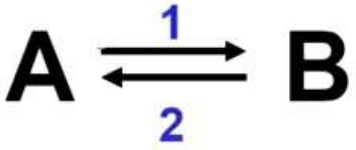
Equilibre : ΔG=O : Le système ne peut pas fournir de travail

Instable : ΔG<0 : Réaction spontanée du système libérant de l'énergie (réaction exergonique.) Elle peut donc fournir un travail.

Necessitant un apport d'énergie : ΔG>0 : réaction endergonique nécessitant un apport d'énergie extérieur pour se produire.

Je vais vous expliquer cette notion pour que vous compreniez bien tout :

La réactions réversibles (inverse d'une réaction totale) peuvent se produire dans les deux sens voir en dessous dans le sens 1 ou dans le sens 2. Un sens est le sens spontané et un autre est le sens non spontané.



Quand il y a autant de réactions spontanée et non spontanée dans un milieu on dit que le système est à l'équilibre.

Comment on connaît le sens de la réaction le plus favorable au système ? (la réaction spontanée)

Grâce au signe de ΔG uniquement.

Pour savoir si le sens 1 est le sens spontané on étudie le signe de ΔG :

ΔG = G fin-Gini = GB-GA

-Si ΔG < 0 cela signifie que GB < GA donc la réaction a libérée de l'énergie car le produit B a moins d'énergie libre que le produit A c'est une réaction exergonique donc la réaction spontanée est donc la réaction 1.

-Si ΔG > 0 GB > GA l'énergie libre du produit B est plus importante que du réactif A donc pour se transformer en produit les réactifs doivent prendre de l'énergie. Donc cette réaction est endergonique et non spontanée. Ainsi dans ce cas là la réaction spontanée serait la réaction 2.

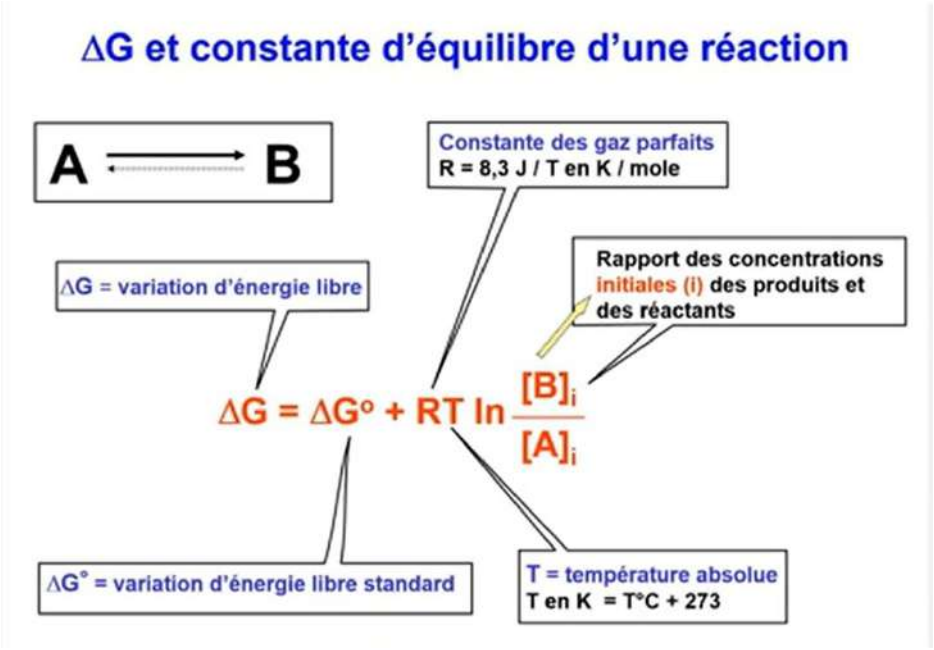
Si ΔG = 0, GA = GB l'énergie au début et à la fin de la réaction sont égales et donc le système n'a ni capté de l'énergie pour se réaliser ni libéré de l'énergie. La réaction est à l'équilibre. Aucun sens n'est privilégié et l'énergie libérée par les réactions exergoniques est égale à celle captée par les réactions endergoniques donc il n'en reste plus à libérer dans le milieu (c'est pourquoi il ne peut plus produire de travail.)

C'est vraiment juste pour votre compréhension si vous ne comprenez pas c'est pas grave apprenez par cœur c'est pas très compliqué.

C) Notion d'Etat standard

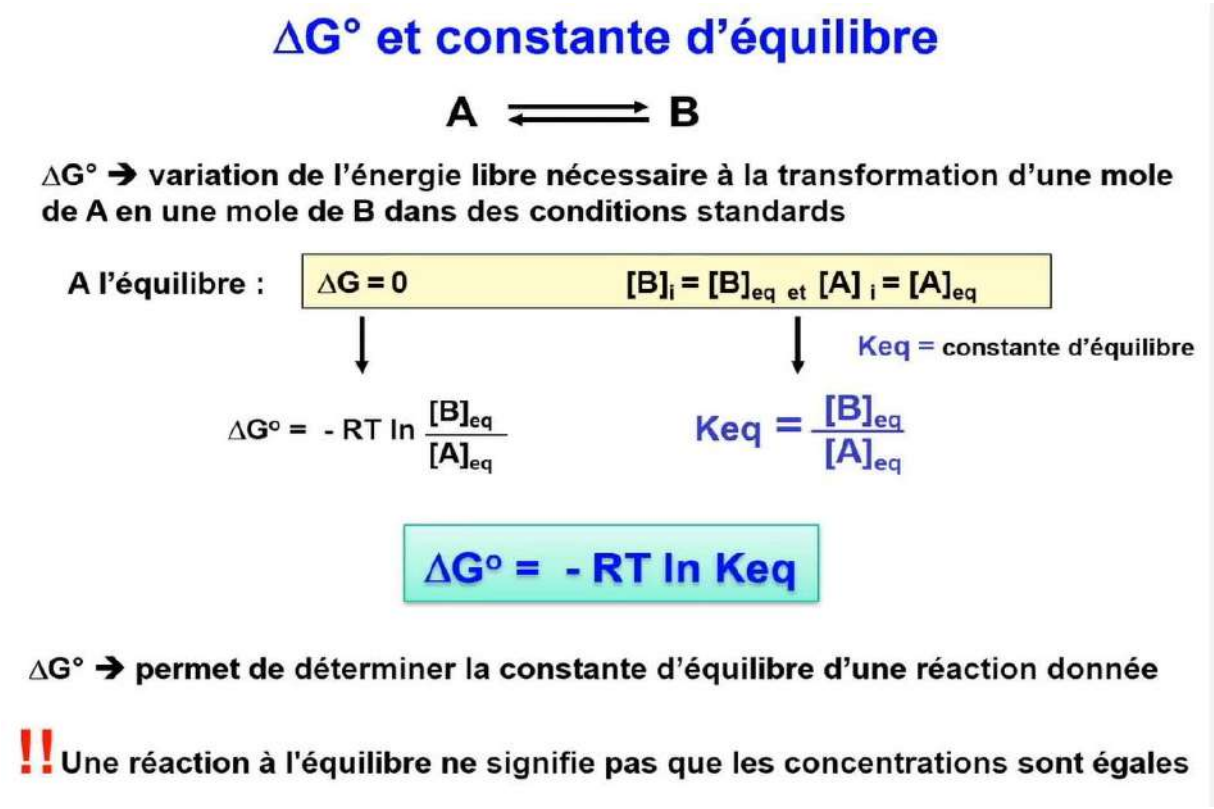
Pour pouvoir comparer différentes situations dans lesquelles on veut mesurer l'énergie libre de Gibbs d'un système, il faut définir **un état standard** ou dit de référence. L'énergie libre d'un système dans son état standard se note **ΔG°.**

Cet **état standard** est celui dans lequel un élément ou un composé est **le plus stable à température et pression ordinaires** *(vu juste après).*



Je vous mets cette formule parce qu'elle est sur la diapo du professeur ce n'est pas la formule la plus importante mais si vous pouvez retenez-la.

Idem pour celle qui suit :



Attention !!: Une réaction à l'équilibre ne signifie pas que les concentrations sont égales cela signifie juste que la concentration de B a atteint son état d'équilibre et pareil pour A.

Peut importe la valeur de ΔG°ou des concentrations initiales de A et de B :

-le système évolue toujours vers l'état d'équilibre

-les conditions de l'équilibre sont indépendantes du sens de la réaction

- D) Conditions physiologiques de l'état standard

Jusqu'à maintenant on considérait l'état standard en chime avec un pH de 7.

-Milieu aqueux à un **pH = 7** (seule différence des conditions standard en chimie où pH = 0)

-Concentration initiale de tous les composants de **1.0 M** (M = molaire) (sauf H+) et concentration de l'eau qui n'est pas prise en compte.

-Température de **25°C**

-Pression constante de **1 atm**

On note l'énergie libre dans des conditions physiologiques **ΔG°'** *(ΔG° c'était pour le pH de 0 (conditions standard en chimie))*

III-Bioénergétique et métabolisme

Le métabolisme regroupe l'ensemble des **réactions biochimiques** permettant aux êtres de vivre, de se développer et de se reproduire.

Une **voie métabolique** est une suite de réaction biochimique. Le substrat s'une enzyme devient ensuite produit qui sera le substrat de l'enzyme de la réaction suivante. coucou thoraxel (qui vous fait le cours sur les enzymes*). C'est assez logique ça juste pour dire que les produits d'une réaction au sein d'une voie métabolique deviennent réactifs de la réaction suivante.*

$$A \xrightarrow[\Delta G'_{AB}]{E_A} B \xrightarrow[\Delta G'_{BC}]{E_B} C \xrightarrow[\Delta G'_{CD}]{E_C} D$$

- **Variation globale de ΔG :**

La réaction globale est :

$$A \xrightarrow[\Delta G'_{AD}]{} D$$

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

Et du coup la variation d'énergie libre de la voie métabolique correspond à la somme des variations d'énergie libres des réactions chimiques qui composent cette voie.

L'activité de ces enzymes est régulée pour maintenir l'homéostasie (l'équilibre) en fonction des molécules dont l'organisme a besoin on ne va pas faire fonctionner les mêmes réactions et donc les mêmes enzymes.

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

A)Les réactions couplées

Les **réactions endergoniques** n'ont pas lieu spontanément et ont besoin d'un apport en énergie pour se dérouler. On émet l'hypothèse que cette énergie est fournie par le **couplage direct à une réaction exergonique**. L'énergie dégagée par la réaction exergonique doit, en valeur absolue, être **≥** *(supérieure ou égale)* **à l'énergie requise par la réaction endergonique**. *C'est logique parce que si elle est inférieure elle ne libèrera pas assez d'énergie pour permettre à la réaction endergonique de se faire.*

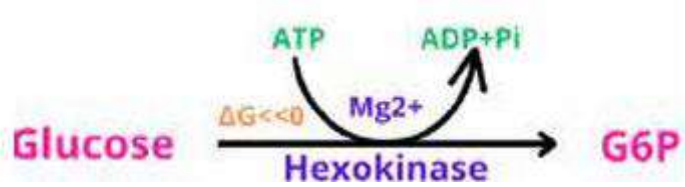
Exemple de ma vieille : Phosphorylation du glucose en G6P

L'hydrolyse de l'ATP en ADP + Pi est une réaction fortement **exergonique** avec un **ΔG'<0** elle a lieu **spontanément** *on va revoir cette réaction juste après et plus la détailler*

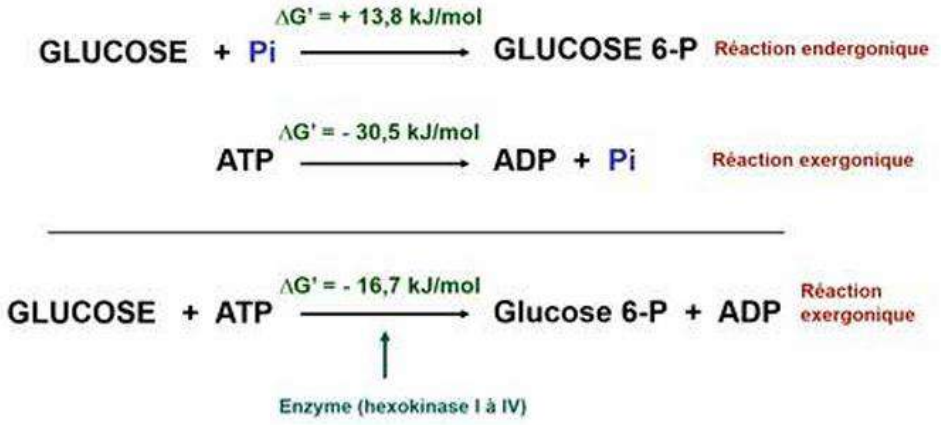
L'ajout d'un phosphate sur le glucose pour former du glucose-6-P est **endergonique** avec un **ΔG'>0** : elle n'a **PAS lieu spontanément.**

Pourtant la réaction de phosphorylation du glucose est possible **par couplage direct** à l'hydrolyse de l'ATP sachant que le **ΔG' cumulé est négatif (<0)**

Le schéma suivant c'est juste pour illustrer la réaction il ne faut pas le connaître pour ce cours là mais pour les autres cours de métabo vaut mieux la connaître haha sinon mes co-tuts vont pas être contents.



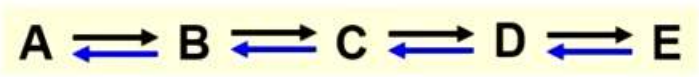
Avec le schéma ci-dessous on retrouve bien l'idée de ΔG cumulé et de couplage des réactions. Si on ajoute les ΔG des deux réactions qui ont lieu simultanément on se retrouve avec un ΔG négatif et donc la réaction finale est exergonique (libère de l'énergie) et donc possible (spontanée).



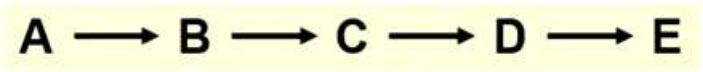
B)Etat d'équilibre stationnaire

Une voie métabolique correspond à un ensemble de réactions biochimiques dont chacune a pour substrat la production de la réaction précédente. *On se répète beaucoup donc c'est bien pour vous ça rentre plus facilement*. Ainsi différents états sont possibles :

- **Etat d'équilibre** : les concentrations **A,B,C,D et E sont constantes**



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



A est simplement consommé (donc diminue) B C E et D sont produits et consommé à la même vitesse donc constants et E est simplement produit donc augmente.

Les voies métaboliques dans les cellules de notre corps s'éloignent de l'état d'équilibre et sont surtout à l'**état stationnaire**. En s'éloignant de l'état d'équilibre elles s'ordonnent et diminuent l'entropie. (puisque l'état d'équilibre favorise l'entropie/ le désordre.)

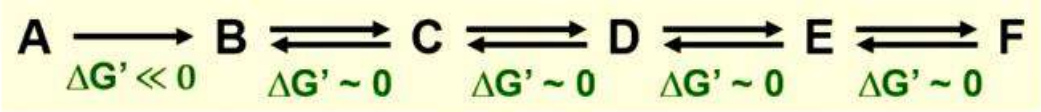
Loi de Lechatelier : « Toute modification d'un facteur d'un équilibre chimique réversible provoque, si elle se produit seule, un déplacement de l'équilibre dans un sens qui tend à s'opposer à la variation du facteur considéré » +++

On va prendre des exemples pour illustrer cette phrase assez difficile à comprendre.

En résumé, la Loi de Le Chatelier dit que si un facteur d'un système chimique en équilibre est modifié, le système réagit en se déplaçant dans la direction qui tend à annuler cette modification.

Analogie avec la fièvre→ la température normale du corps humain est de +37°C (à l'équilibre), si elle augmente de +1°C alors l'équilibre sera déplacé et mon corps se défendra pour ramener la température à 37°C.

Analogie avec l'élastique ->un élastique est à l'équilibre dans son état de repos, mais si je l'étire (= modification du facteur d'équilibre) alors il fera tout pour revenir dans sa position de repos (= déplacement dans le sens opposé).



A-->B est une réaction irréversible due au ΔG'<<0 *si le ΔG est très éloigné de 0 réaction irréversible (totale) (elle ne se fait que dans un seul sens) mais si il est juste un peu inférieur à 0 elle est réversible et évolue dans le sens spontané (ça c'est ce qu'on a vu tout à l'heure avec les réactions exergoniques).*

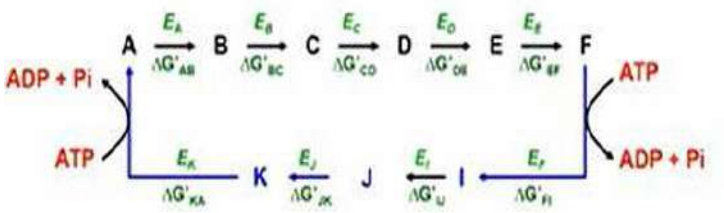
Les réactions suivantes ont un ΔG' autour de 0 et sont donc réversibles.

Si A augmente, la réaction évolue dans le sens de la production irréversible de B, cette augmentation de B induit une cascade de réactions en aval permettant au final la production du produit F.

Le fonctionnement ou non de la voie métabolique dépend de la réaction irréversible qui est l'étape limitante et essentielle pour la régulation de la voie considérée.

D'un point de vue thermodynamique, les voies métaboliques ne sont pas réversibles. D'un point de vue physiologique, elles le sont. ++

Puisque dans le corps les réactions non spontanées / endergoniques peuvent avoir lieu par couplage avec une réaction exergonique (hydrolyse ATP par exemple).



Ici, la voie F-->A est physiologiquement possible mais elle nécessite un apport d'énergie.

Afin d'avoir au même moment qu'une seule voie active et pas toutes les voies qui fonctionnent dans tous les sens, les enzymes de chacune des voies sont régulées de façon opposée. (Si A->F activée impose F->A inhibée).

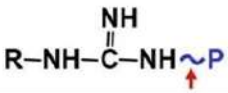
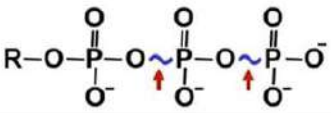
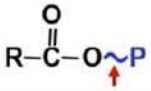
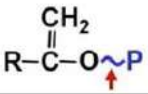
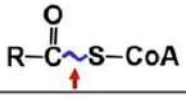
IV-Molécules implqués dans la bioénergétique

L'énergie est stockée dans **les liaisons entre 2 atomes**. Pour libérer cette énergie, il faudra **casser ces liaisons.** Les liaisons riches en énergie sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Celles qu'on retrouve le + sont les **liaisons phosphoanhydrides** entre 2 phosphates. Les liaisons riches en énergie sont pointées par les flèches.

Dans le tableau page suivante je vous conseille d'apprendre quel type de liaison va avec quelle molécule (mais n'apprenez pas par cœur la formule chimique)

Molécules contenant des liaisons riches en énergie

LIAISONS	FORMULES	EXEMPLES
AMIDINE-PHOSPHATES		Créatine Phosphate
PHOSPHOANHYDRES		XTP et XDP (X = A, G, C, U)
ACYL-PHOSPHATES		1,3 diphosphoglycérate
ENOL-PHOSPHATES		Phosphoénolpyruvate
ACYL-THIOESTERS		Acétyl-CoA

Exemple : Nucléotides triphosphates (TP) qui possèdent 3 phosphates mais seulement 2 liaisons riches en énergie comme l'ATP , l'UTP ou encore le Diphosphatequi n'en n'a qu'une.

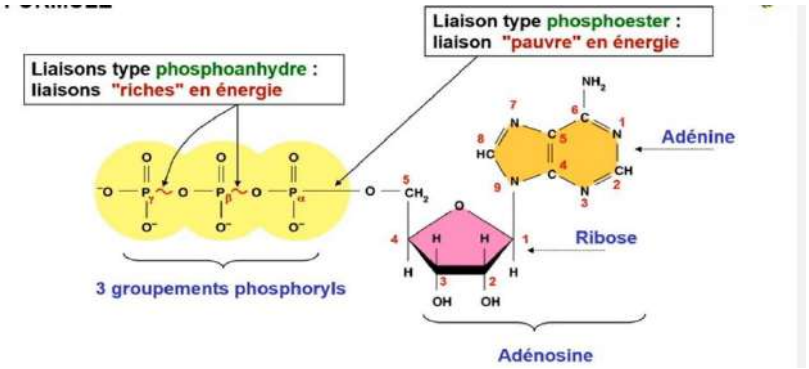
A) Généralités sur l'ATP (adénosine triphosphate)

L'ATP est constitué de :

-une adénine (base azotée)

-un sucre (ribose)

-3 phosphates (alpha bêta gamma)



Vous voyez bien que le groupement phosphate alpha est celui relié au ribose.

Dans l'ATP, on retrouve :

- Une liaison du **phosphate alpha** sur le **ribose** de type **phosphoester**, **pauvre en énergie.**

La liaison entre le ribose et le phosphate alpha n'est pas une liaison phosphoanhydre donc elle est faible en énergie.

- Deux liaisons au niveau des **phosphates distaux** : *(la liaison entre le phosphate alpha et bêta) (la liaison entre le phosphate bêta et gamma) : des liaisons* ***phosphoanhydrides*****, riches en énergie.**

C'est l'hydrolyse de l'ATP au niveau des groupes phosphates béta et gamma qui libère de l'énergie.++ (on casse les liaisons avec à l'aide de molécules d'eau)

Chiffres importants à connaître +++ :

Concentration cellulaire d'ATP dans le corps : 1 à 10 mmol/kg de tissu.

Répartition cellulaire à l'état basal : 10 ATP pour 1 ADP. (*on va voir tout de suite ce que c'est l'ADP)*

Teneur dans l'organisme : 75g mais synthèse de 45 Kg par jour.

B) Hydrolyse de l'ATP

L'ATP contient 2 liaisons phosphanhydrides riches en énergie (β et γ) qui peuvent être hydrolysées *(on vient de le voir).*

L'hydrolyse de l'ATP au niveau **du phosphate γ** libère une molécule d'ADP et du phosphate inorganique*.(=pi =phosphate tout seul)*

Qu'est ce que l'ADP (adénosine diphosphates) ? c'est juste l'ATP mais avec seulement deux phosphates et non pas trois. On enlève le phosphate gamma en coupant sur la liaison gamma.(celle entre le phosphate gamma et bêta)

Ensuite l'**ADP** peut être **hydrolysé** pour donner de l'**AMP** et du phosphate inorganique. *Et même principe l'AMP (adénosine monophosphate) est la molécule d'ATP avec une seule molécule de phosphate. On enlève le phosphate bêta en coupant la liaison bêta. (celle entre le phosphate alpha et bêta)*

L'hydrolyse de la première liaison phosphoanhydride (γ) de l'**ATP** et de la deuxième à partir de l'**ADP** (β) libère la même énergie soit : **-32 kJ.mol-1**

L**'ATP** peut être aussi **hydrolysé** au niveau du phosphate β directement libérant de l**'AMP** et du **pyrophosphate libérant une énergie de -45 kJ.mol-1** (2 phosphates = pyrophosphate = Ppi). Ce processus est moins fréquent que celui qu'on a décrit avant *(quand on casse une liaison pour former l'ADP puis on recasse pour former l'AMP)*

Si on hydrolyse le pyrophosphate et qu'on le sépare en deux phosphates inorganiques on libère une énergie de **-19 kJ.mol-1**.

L'association d'un cation divalent **Mg2+** à une molécule d'ATP le stabilise et facilite la **libération/le transfert d'énergie.**

L'ATP est thermodynamiquement instable. Ainsi il possède une grande aptitude à s'hydrolyser en ADP ou en AMP .

Cette instabilité lui permet à la fois d'être :



Il permet de rendre les réactions **endergoniques** possibles en libérant de l'énergie.

Ce cours n'est pas complet dans la prochaine partie on va voir qu'il y a d'autres molécules énergétiques en plus de l'ATP.

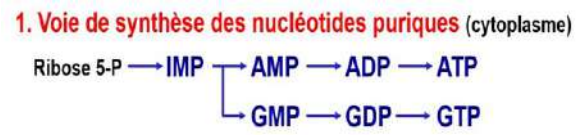
Dédis dans la prochaine partie.

Hello les loulous ! On se retrouve pour finir le cours sur bioénergétique. Dans cette deuxième partie on va décrire plusieurs molécules énergétiques comme on a commencé à décrire l'ATP.

Mais d'abord on va finir avec l'ATP en décrivant ses différents modes de formation :

C) Formation de l'ATP

L'**ATP** a un rôle **crucial** sa synthèse peut se faire de plusieurs façons :

Synthèse de nuovo à partir d'acide purique (dans le cytoplasme)	**Synthèse à partir de la transformation d'ADP en ATP**
-**Le Ribose 5-P** contribue à la synthèse de l'Inosine Monophosphate **(IMP)**, précurseur de l'**AMP** (adénosine monophosphate) et du **GMP** (Guanine monophosphate). -L'**AMP** est ensuite converti en **ADP** puis en **ATP**, (idem pour le GMP) 	- **Par phosphorylation oxydative** : au sein de la membrane interne mitochondriale → synthèse d'ATP à partir d'un gradient électrochimique, représente **90% de la production d'ATP chez l'Homme.** - **Par phosphorylation** liée au substrat *(cellules exprimant la CPK= créatine phosphokinase)*  - **Par l'adénylate kinase** → réactions essentiellement utilisées par le muscle strié. 

D) D'autres molécules riches en énergie ou enzymes permettant de libérer cette énergie

- **Créatine Phosphate (CP)**
- **Créatine Phosphokinase (CPK)**
- **Adénylate kinase (AK)**
- **Acétyl-CoA**
- **Phosphoénolpyruvate**

A) Créatine Phosphate (CP)

-C'est la forme de **réserve énergétique des muscles** chez les vertébrés.

-Son énergie provient de **l' ATP mitochondrial**.

-Son **hydrolyse** permet de régénérer la charge énergétique de **l'ATP cytoplasmique** dans le muscle. *(vous comprendrez ces deux derniers points après avec la CPK)*

Elle constitue la réserve d'énergie la plus immédiatement disponible pour le muscle en exercice juste après l'épuisement du pool d'ATP existant +++.

Chez un homme d'environ 70kg, il existe un pool de **120g de Créatine** :

- **95%** de ces 120g sont stockés dans le muscle squelettique/lisse
- **70%** de ces **95%** sont sous forme de Créatine Phosphate

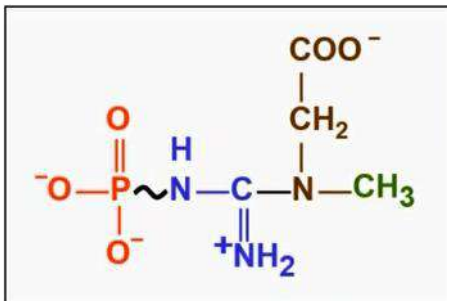
La Créatine Phosphate provient à : **50% de l'alimentation** (viande et poisson) les autres **50%** sont synthétisés dans **le foie et les reins** à partir d'AA.

L'**hydrolyse** de la Créatine Phosphate par les reins donne lieu à une molécule de **Créatine** et un **phosphate inorganique** (Pi).

La **Créatine** est dégradée en **Créatinine** au niveau **des reins** est éliminée par excrétion urinaire. Le dosage de la **Créatinine** permet d'apprécier la **fonction rénale**, ainsi que le reflet de la **masse musculaire**.

Une diminution de la **Créatinine** dans les urines couplée à une **augmentation dans le sang** peut suggérer **une atteinte rénale**.

Structure de la Créatine Phosphate

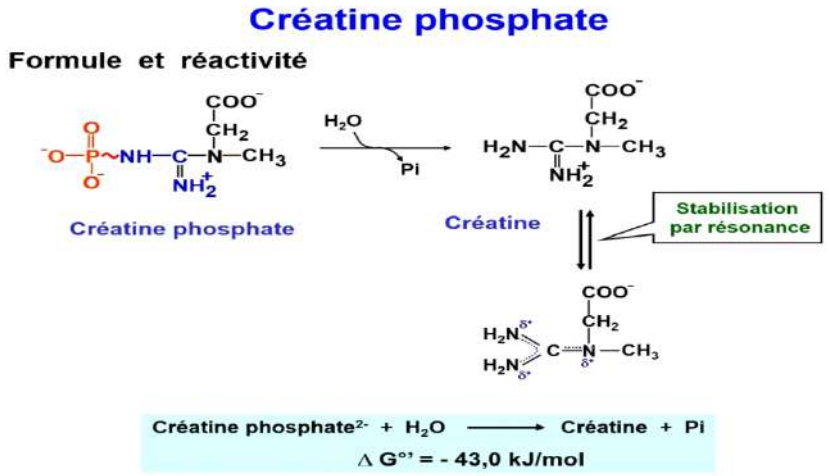


- Une molécule de Glycine, dont l'azote lie un méthyl provenant de la S-adénosylméthionine (SAM)
- Un noyau guanidinium de l'arginine
- Un phosphate avec la liaison riche en énergie (amidine(~). Ce phosphate provient de l'ATP.

Le **phosphate** est attaché à la **Créatine** par une liaison **amidine riche en énergie.** L'hydrolyse de la **Créatine Phosphate** est une réaction très **exergonique** (libère 43 kJ/mol). Elle donne lieu à une molécule de **Créatine** et une molécule de **phosphate.**

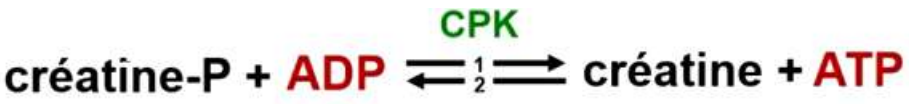
La créatine produite est stabilisée par **résonance,** c'est-à-dire **par une délocalisation d'électrons.** *qu'est ce que ça veut dire stabilisé par résonnance ? en gros vous voyez que la créatine produite a une charge positive (schéma en dessous). Pour perdre cette charge afin d' être plus stable cette charge **totale** va se répartir au niveau des trois azotes qui auront tous les trois une charge **partielle** positive et cela se fait pas*

délocalisation des électrons. (regardez bien le schéma pour comprendre.)Ce n'est pas à connaître c'est juste pour votre compréhension)



B) Créatine Phosphokinase (CPK)

C'est une **enzyme** des vertébrés présente dans le **cerveau**, les muscles striés **squelettiques** et les muscles **cardiaques** des vertébrés. Elle catalyse la réaction réversible :



(c'est la réaction qu'on vient de voir)

Le ΔG0' attendu est de **- 43 kJ/mol**. *(libération de 43 kJ /mol)*

Cependant, suite aux conditions particulières du muscle en *exercice* *(forts changements dans les concentrations en ATP et en ADP)*, le ΔG0' effectif dans les conditions physiologiques n'est que de **– 12,5 kJ/mol**, ce qui rend la réaction réversible *(comme on se rapproche de 0).*

Le sens de cette réaction dépend **des besoins énergétiques du muscle**. Ainsi, en fonction de la **concentration en ATP dans le muscle** :

- Pauvre en ATP : l'**hydrolyse** de la **Créatine Phosphate** restitue sous forme d'**ATP** l'énergie mise en réserve (sens 1) *(muscle à l'effort qui a besoin de beaucoup d'ATP)*

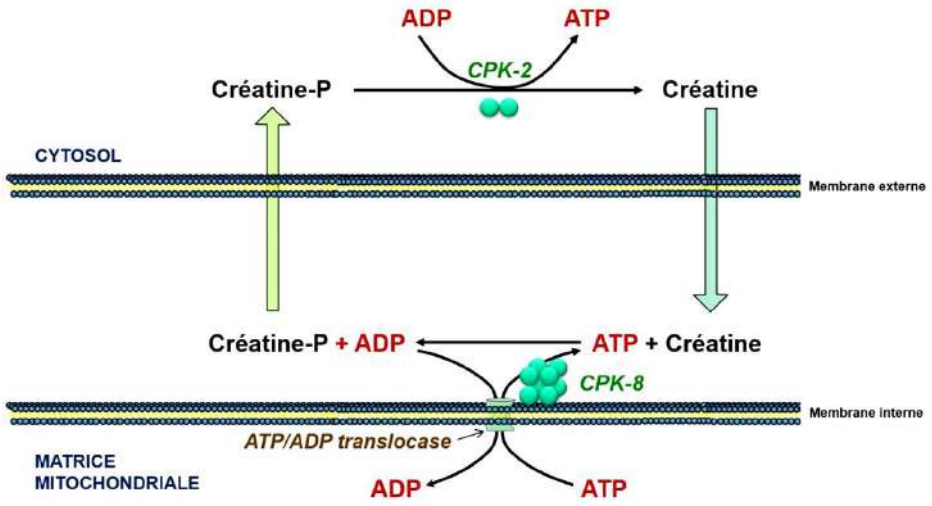
-Riche en ATP : l'énergie est récupérée de l'ATP pour **produire** de la **Créatine Phosphate** (sens 2) *(muscle au repos qui n'a plus besoin d'avoir autant d'ATP)*

Voici les grandes lignes, mais en réalité la situation est plus complexe.

Dans les muscles striés, il existe **2 formes de CPK fonctionnellement différentes** : ++

Forme cytosolique : forme **dimère (CPK-2)** présente dans le cytoplasme et l'espace intermembranaire des mitochondries

Forme mitochondriale : forme **octamère (CPK-8)** ancrée à la face externe de la membrane interne des mitochondries en interaction avec **l'ATP/ADP translocase.**



Avec cette localisation distincte des 2 formes de CPK, on imagine la séquence suivante concernant leur action *(lisez en suivant le schéma ci-dessus)* :

1) La **CPK-8** hydrolyse l'**ATP** provenant de la **matrice mitochondriale** *(intérieur de la mitchondrie)* pour transférer le **phosphate** sur la **créatine** → L'ADP généré retourne dans la matrice mitochondriale.

L'intérêt de cette canalisation de l'ATP **vers CPK-8** est que ceci accélère le transfert d'énergie vers la Créatine = formation de la **Créatine Phosphate**

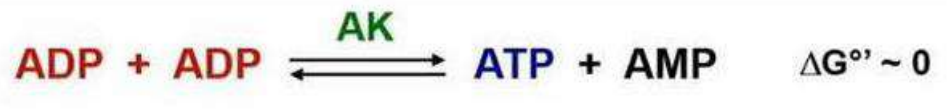
2) Une fois produite, la **Créatine Phosphate** diffuse à travers la **membrane externe** de la mitochondrie et atteint ainsi le **cytosol.**

3) Dans le cytosol la **CPK-2** utilise la Créatine Phosphate pour **régénérer de l'ATP** cytoplasmique à partir d'**ADP.** *(hydrolyse de la créatine phosphate)*

C) L'Adénylate Kinase (AK) / Myokinase

Dans le métabolisme du muscle, il y a un autre acteur enzymatique important : **l'Adénylate Kinase,** aussi appelée **Myokinase +++** *(elle s'appelle ainsi puisque l'enzyme a été découverte en premier dans le muscle, même si on sait maintenant qu'elle est présente dans toutes les cellules)*.

Elle est impliquée dans la réaction suivante : L'**AK** catalyse le **transfert d'un phosphate** et de sa liaison riche en énergie d'un **ADP** vers un autre **ADP**. Cette réaction est totalement **réversible** (avec un **ΔG0'** proche de **0**).



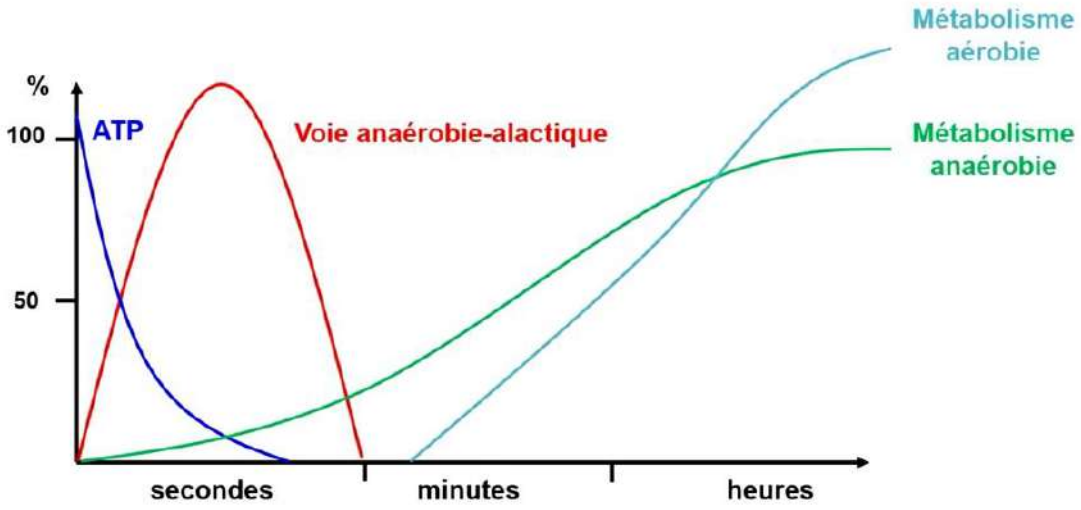
Elle permet de récupérer **une liaison riche en énergie supplémentaire** en réactivant un **ADP** en **ATP** qui pourra être utiliser. L'autre **ADP** est hydrolysé en **AMP.** (On fait ça car l'ATP est plus facilement utilisable que l'ADP dans l'organisme)

La synergie entre la **Créatine Phosphokinase (CPK)** et **l'Adénylate Kinase (AK)** offre au muscle une **voie métabolique courte**, capable de fournir **immédiatement de l'énergie** utilisable pour l'effort.

Cette voie ne requiert **pas d'oxygène** et ne produit pas de **lactate** : il s'agit d'une **voie anaérobie-alactique.++**



Source d'ATP utilisé au cours du temps lors d'un travail musculaire :



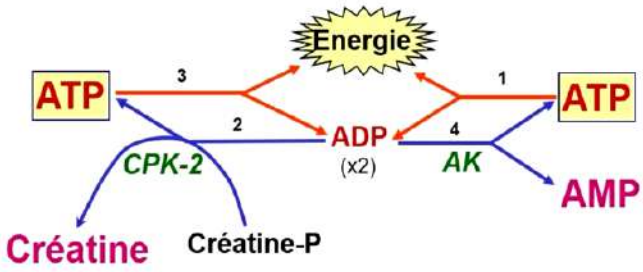
1) C'est d'abord l'**ATP** stocké dans le muscle qui est utilisé **(faible réserve).**

2) Très rapidement, la voie **anaérobie-alactique** prend le relais mais elle ne dure que **quelques minutes**.

3) Ensuite, lentement mais pour longtemps, **les métabolismes aérobique** et **anaérobique** produisent de l'**ATP** pour la contraction musculaire *(ça c'est grâce aux voies métaboliques que vous voyez avec mes co-tuts.)*

La voie anaérobie-alactique :

Au niveau biochimique on a 2 phases durant l'effort musculaire : au **début** de la phase d'effort puis la phase de **récupération :**



Phase d'effort :

1) Au début de l'effort, l'**ATP cytoplasmique** est hydrolysé en **ADP** libérant de l'énergie.

2) Cet **ADP** est immédiatement rephosphorylé en **ATP** à partir de la **Créatine Phosphate.** Cette réaction est catalysée par l'isoenzyme **CPK-2** cytoplasmique.

3) Cet **ATP** sera ensuite hydrolysé en **ADP** avec à nouveau la **production d'énergie**

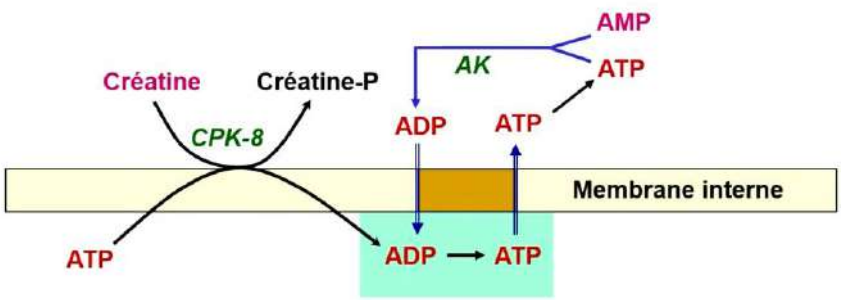
4) 2 molécules d'**ADP** grâce à **l'Adénylate Kinase** donnent lieu à une molécule d'**ATP** et d'**AMP.**

Phase de récupération :

Les mitochondries produisent de l'**ATP** grâce aux chaînes respiratoires qui phosphorylent l'**ADP** en **ATP**. *(sauf qu'on a plus besoin d'autant d'ATP que pendant la phase d'effort)*

Cet **ATP** traverse la **membrane interne** et avec l'aide de **l'adénylate kinase** qui transforme l'AMP et l'ATP en ADP.

L'ATP mitochondrial permet avec **CPK-8** de produire de la **Créatine Phosphate** à partir de la **Créatine**. Finalement, la cellule a rechargé en énergie la Créatine et l'AMP à partir des ATP produits par les mitochondries



Le bilan des réactions de la voie anaérobie alactique en phase d'effort :

Créatine PhosphoKinase (CPK)

$$\text{Créatine-P} + \text{ADP} \longrightarrow \text{Créatine} + \text{ATP}$$

Adénylate Kinase (AK)

$$2\,\text{ADP} \longrightarrow \text{ATP} + \text{AMP}$$

$$\text{Créatine-P} + 3\,\text{ADP} \longrightarrow \text{Créatine} + 2\,\text{ATP} + \text{AMP}$$

Résumé des points clés du métabolisme énergétique dans le muscle

- Le **muscle strié** est relativement riche en réserve énergétique avec environ **3 à 5 mmol d'ATP** et **30 mmol de Créatine Phosphate par Kg** de muscle strié.

- D'autres tissus comme le **cerveau**, le **muscle** et **le rein** ne contiennent que **5 à 10 mmol de Créatine Phosphate par Kg** de tissu.

- Pouvoir énergétique fort mais sur **une très courte durée** (2 / 3s)

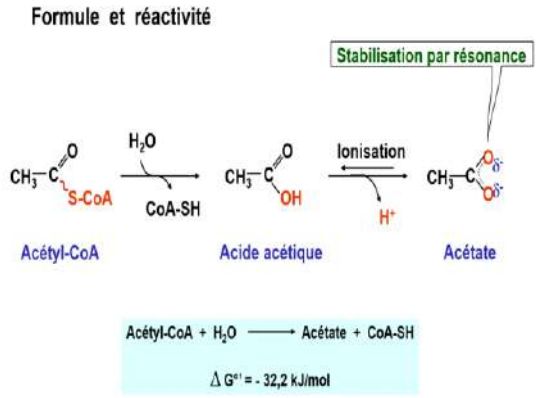
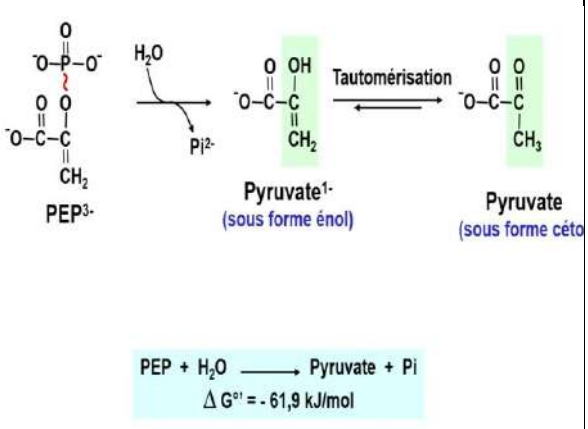
- Sachant que le corps humain ne possède que 75 g d'ATP et que l'ATP **N'est PAS** fourni par le biais de la circulation sanguine cela signifie que les cellules doivent en synthétiser de manière continue *(vous vous souvenez qu'en plus on en synthétise 45 Kg par jour.)*

- La **Créatine Phosphate** est la **source d'énergie** disponible dans le muscle directement après l'ATP. Elle permet de produire rapidement de l'énergie, et pendant un temps plus long. (3 à 10 / 15 sec)

- **La phase de récupération** se termine au bout de 5 minutes environ.

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

D) Acétyl-CoA et Phosphoénol pyruvate

Acétyl COA	Phosphoénol pyruvate
- Liaison **acyl-thioester** - L'**hydrolyse** de **l'acétyl-CoA** donne lieu à la formation **d'acide acétique**, stabilisé par résonance en **acétate.** - Libération de **32 KJ/mol**	- Liaison **énol-phosphate** - Son hydrolyse est particulièrement **exergonique** et donne lieu à la formation de **pyruvate** - Il existe un équilibre en les formes énol et céto du pyruvate. - Libération de **61,0 kJ/mol**
	

Aller on en a fini avec les exemples super longs maintenant on attaque une dernière partie plus chill

V-Les réactions d'oxydoréductions

Le transfert de **groupement phosphoryle** *(ce qu'on a vu jusqu'à présent)* est un élément central du transfert d'énergie et donc du métabolisme cellulaire.

Le transfert d'énergie libre par transfert d'électrons lors des réactions **d'oxydoréductions** est un autre mécanisme réactionnel tout aussi important dans les systèmes biologiques.

L'oxygène est le plus **fort accepteur d'électrons** en raison de sa forte **électronégativité** *(capacité cellulaire d'attirer les électrons)* c'est donc un agent oxydant intracellulaire le plus puissant.

Dans les systèmes biologiques, les flux d'électrons s'effectuent par l'intermédiaire de **transporteurs d'électrons** jusqu'à l'**oxygène** moléculaire.

Les réactions **d'oxydo-réductions** cellulaires sont des réactions mettant en jeux des transferts **hydrogènes et/ou des électrons.**

On distingue :

-**oxydations** = perte d'hydrogène ou d'électrons

- **réductions** = gain d'hydrogène ou d'électrons

Mais les 2 sont toujours liées d'où "réaction d'oxydoréduction".

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**. *Au départ c'est un réducteur qui donne ses électrons (s'oxyde) pour former un oxydant.*

Le composé accepteur est un **oxydant**. *Au départ c'est un oxydant qui va accepter les électrons (se réduire) pour former un réducteur.*

On va voir les **réactions d'oxydoréduction** dans le métabolisme énergétique des systèmes biologiques :

Ce transfert génère **une force électromotrice** qui sera utilisée pour diverses réactions de **transduction d'énergie.**

Le transfert d'électrons d'une molécule donneuse d'e- vers une autre molécule accepteuse d'e- se réalise selon l'une de ces voies :

-Transfert direct d'électrons : $Fe^{2+} + Cu^{2+} \longrightarrow Fe^{3+} + Cu^{+}$

- Transfert via la molécule d'hydrogène :

$$AH_2 \longrightarrow A + 2e^- + 2H^+$$
$$B + 2e^- + 2H^+ \longrightarrow BH_2$$
$$AH_2 + B \longrightarrow A + BH_2$$

- Transfert via l'ion hydrure (H-) (= anion hydrogène) *(hydrogène ayant capté un électron)*

- Transfert via une réaction directe de l'oxygène → incorporation covalente de l'oxygène dans une molécule organique.

--< Potentiel d'oxydo-réductions

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

2) **Couple redox** : comprend forme oxydée et forme réduite d'un même composé.

$$A_{red} \rightleftharpoons A_{ox} + ne \qquad (ne : nombre\ électrons)$$

3) On peut calculer le potentiel rédox grâce à la formule de Nernst :

$$E_A = E_A^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Aox]}{[Ared]}$$

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

Le potentiel redox d'une réaction implique des **échanges** d'électrons entre **2 couples redox A/A+ et B/B+.**

Pour savoir si l'échange **d'é- de A vers B** se fait spontanément ou pas, on calcule la **variation de potentiel redox ΔE** (différence entre EB et EA)

Si ΔE > 0 cela veut dire EB>EA, la réaction est **spontanée +++,** c'est-à-dire que les é- vont de A (donneur) vers B (accepteur). *(car B les attirent plus)*

Si ΔE < 0, EA> EB donc la réaction de transfert d'électrons de A vers B nécessite de **l'énergie pour avoir lieu +++** (la réaction la plus spontanée sera celle du transfert de B vers A)

(c'est l'inverse de l'énergie libre ΔG ON FAIS TRES ATTENTION)

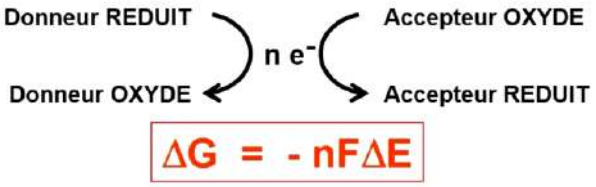
Relation entre ΔG (énergie libre) et ΔE (potentiel redox)

Réactions spontanées :

- Seules les réactions dont **l'énergie libre baisse** (ΔG<0) sont spontanées.

- Seules les réactions redox entraînant une **augmentation de potentiel redox** (ΔE > 0) sont possibles spontanément.

● **Relation entre ΔG et ΔE**



$\Delta G = - nF\Delta E$

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

Les **potentiels redox** sont utiles pour les biochimistes car ce potentiel permet de calculer **le ΔG (=la variation d'énergie libre)** donc prédire **le sens de la réaction.**

Connaissant le **ΔE**, on peut calculer le **ΔG** en effet, une réaction d'oxydoréduction se déroulant spontanément entraîne une variation de potentiel redox positive : ΔE >0, et une variation d'énergie négative ΔG <0.

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

C'est finiiiii maintenant place aux dédiiiissssss !!

Dédis spéciales sport aujourd'hui (on est un peu dans le thème) et aussi parce que le sport c'est super important. Vraiment si vous aimez ça continuez à en faire !!

Dédis au meilleur sport de l'univers l'escalaaaaadeeee !! (ça m'a trop manqué pendant ma P1 j'ai un peu perdu mon niveau...) je vous mets quelques poses bizarres en dessous mdr

Dédis à mes vendredis aprèms à la salle avec mes potes du lycée (alala le lycée le bon vieux temps)

Antidédi à la course (en vrai ça va un peu mieux maintenant mais bon le cardio c'est dur hein)





