



# Bioénergétique

*Holà les Loulous!*

*Toujours motivés? En tout cas j'espère que vous l'êtes sinon n'hésitez pas à envoyer un message! Sinon aujourd'hui on commence une nouvelle fiche, La Bioénergétique. Vous allez voir c'est un cours sympathique à voir. Il faut le comprendre et pas l'apprendre par coeur. Donc si une info vous échappe → go forum.*

*C'est parti, on entre dans le monde des réactions chimiques, de l'énergie et de la thermodynamique = votre monde merveilleux (bon peut-être pas jusque-là, mais c'est votre monde jusqu'à l'examen classant !)*

## **I) Introduction**

1. L'énergie c'est la vie
2. Différents systèmes appliqués à la bioénergétique
3. Grands principes de la bioénergétique
4. Le couplage énergétique
5. Métabolisme = Anabolisme + Catabolisme

## **II) Bioénergétique et thermodynamique**

1. Généralités et définitions
2. Relation de GIBBS
3. Notions d'état standard
4. Conditions physiologiques de l'état standard

## **III) Bioénergétique et métabolisme**

1. Les réactions couplées
2. Etat d'équilibre et état stationnaire

## **IV) Molécules impliquées dans la bioénergétique**

1. Généralités sur l'ATP
2. Hydrolyse de l'ATP
3. Formation de l'ATP
4. Autres molécules riches en énergie





# I) Introduction

Un organisme a 2 missions essentielles :

- Se **conserver / vivre** (*l'organisme a besoin de matière et d'énergie*)
- Se **perpétuer**

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 :

- **Le Catabolisme** = dégradation *Mnémono :*
- **L'Anabolisme** = biosynthèse *Catabolisme → tu casses les liaisons = dégradation*

*Pour résumer : Métabolisme = Catabolisme + anabolisme*

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

<p><b>EXERGONIQUE :</b> ↙</p> <p><u>libère</u> de l'énergie dans le milieu (= <i>réaction spontanée</i>)</p>	<p>↘ <b>ENDERGONIQUE :</b></p> <p><u>a besoin</u> d'énergie pour avoir lieu</p>
--	---

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

## 1. 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.

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).

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 de la matière et de l'énergie avec son milieu environnant** grâce à différents systèmes que nous allons étudier.





## 2. Différents systèmes appliqués à la bioénergétique

*Ce tableau est super important!! Il faut vraiment bien le comprendre et tout sera logique.*

Système ouvert	Système fermé	Système isolé
Échange d'énergie et/ou de matière avec le milieu/environnement extérieur	Échange d'énergie mais pas de matière avec le milieu/environnement extérieur	Aucun échange d'énergie et de matière avec le milieu/environnement extérieur
<p><u>Système ouvert</u></p>	<p><u>Système fermé</u></p>	<p><u>Système isolé</u></p>

**Attention : Il ne faut pas confondre système isolé et système fermé**

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

## 3. Grands principes de la bioénergétique

*Déf...*

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...**).





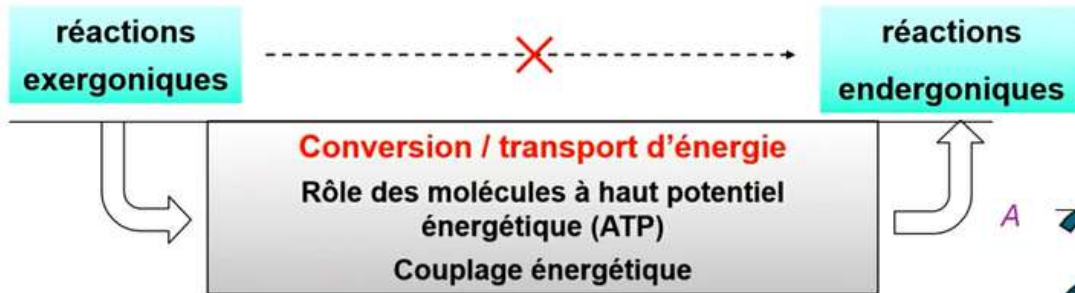
## 4. Le couplage énergétique

Les réactions **exergoniques** produisent de l'énergie permettant le déroulement des réactions **endergoniques**.

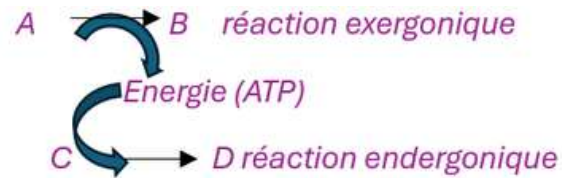
Cela implique des phénomènes de conversion et de transport d'énergie.

Il existe un **couplage énergétique** entre les deux types de réactions.

Ces réactions ne sont possibles que grâce aux molécules à haut potentiel énergétique comme l'ATP.



*Vous avez à droite le schéma du prof, assez peu compréhensible. Je vous ai fait un autre plus simple qui je l'espère vous éclairera mieux.*



## 5. Métabolisme = Anabolisme + Catabolisme

L'énergie nécessaire aux animaux provient de l'alimentation contenant des macromolécules.

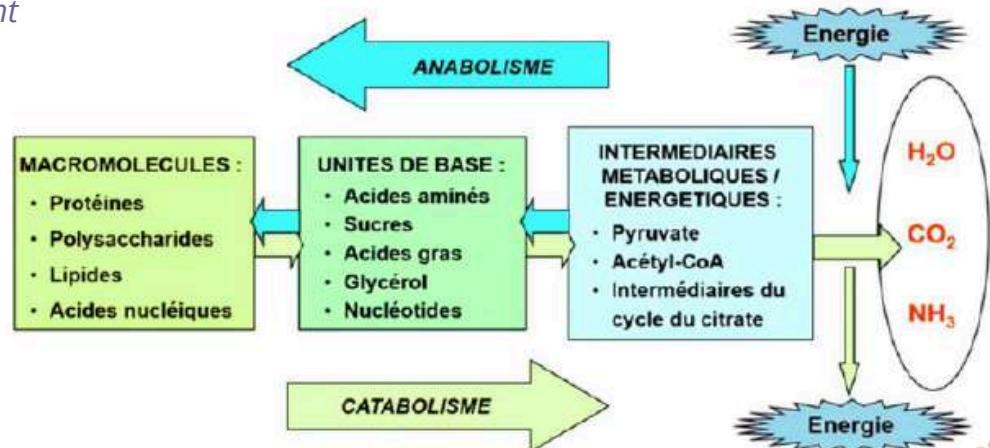
- Ces macromolécules sont dégradées en molécules de base, elles-mêmes dégradées en intermédiaires métaboliques et énergétiques.
- Au final, sont produits de l'eau (H<sub>2</sub>O), du CO<sub>2</sub> et de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), avec libération d'énergie.

L'ensemble correspond au Catabolisme

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

*Tout le texte est résumé sur ce schéma, donc il est vraiment important. Si vous ne le comprenez pas → forum.*

### Métabolisme = Anabolisme + Catabolisme



**Attention : Les acides nucléiques contribuent très peu au bilan énergétique**





## II) Bioénergétique et thermodynamique

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

### 1. Généralités et 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** ou **déformée**

Définition de énergie: **toute forme de travail ou de chaleur +++**

#### Second principe de la thermodynamique :

**"L'entropie de l'univers augmente "**

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

Définition d'entropie: **degré de désordre ou de hasard+++**

### 2. 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.

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

Diagram illustrating the Gibbs free energy equation:  $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$ . Arrows point from the terms to their respective labels:  $\Delta G$  to "Energie libre",  $\Delta H$  to "Enthalpie", and  $\Delta S$  to "Entropie".





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 :

<b><u>Equilibre</u></b>	Le système ne peut plus fournir de travail : $\Delta G=0$
<b><u>Instable</u></b>	Réaction spontanée : $\Delta G < 0$ : réaction exergonique
<b><u>Nécessitant un apport d'énergie</u></b>	Lors d'une réaction endergonique : $\Delta G > 0$ : nécessite un apport d'énergie pour réagir

### 3. Notion d'état 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**. Cet état standard est celui dans lequel un élément ou un composé est le **plus stable à température et pression ordinaire**. *On revoit tout ça plus en détails juste après ( dans le 4. )*

- L'état standard permet de calculer la constante d'équilibre  $K_{eq}$ .
- Le  $\Delta G$  caractérise l'**état d'équilibre** : il existe quand la concentration initiale de A atteint sa concentration à l'équilibre, et de même pour B.

Attention : **Une réaction à l'équilibre ne signifie pas que les concentrations sont égales +++**

### 4. Conditions physiologiques de l'état standard

- Milieu aqueux à un **pH = 7** (différent des conditions standard en chimie où  $pH = 0$ )
- Concentration initiale de tous les composants de **1.0 M** ( $M = \text{molaire}$ )
- Température de **25°C**
- Pression constante de **1 atm**

*Est ce que ça va? T'es encore là? Et dernière question: es tu productif? Si tu réponds "non" à cette question, fais une pause ou un autre cours ; si tu réponds "oui", alors c'est parfait et on continnnnnuuueeee...*



# III) Bioénergétique et métabolisme

Allez on commence cette partie par une définition et rappel du métabolisme

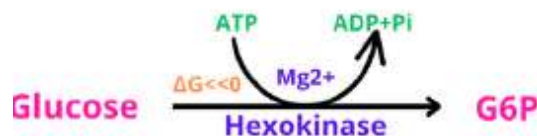
Le métabolisme regroupe l'ensemble des **réactions biochimiques** permettant aux êtres de vivre, de se développer et de se reproduire. *En résumé c'est juste le cycle de la vie*

## 1. 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  $\geq$  à l'énergie requise par la réaction endergonique.

Par exemple : *Là on voit l'exemple de la phosphorylation du glucose en G-6-P, comme dans la glycolyse et d'autres voies métaboliques.*



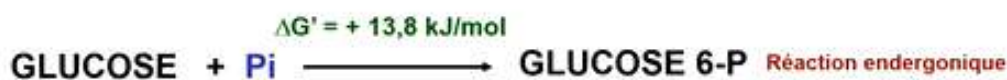
*Ce schéma c'est moi qui vous le rajoute pour que vous vous y retrouviez*

- L'hydrolyse de l'ATP en ADP + Pi est une réaction fortement exergonique avec un  $\Delta G' < 0$  : elle a lieu spontanément.

- L'ajout d'un phosphate sur le glucose pour former du glucose-6-P est endergonique avec un  $\Delta G' > 0$  : 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  $\Delta G'$  cumulé est négatif ( $< 0$ ) *En résumé, la phosphorylation du glucose en G-6-P seule est impossible mais si on utilise une molécule d'ATP qui va libérer de l'énergie en s'hydrolysant alors la réaction sera possible.*

### Réactions couplées: importance des $\Delta G$



Enzyme (hexokinase I à IV)

*Pour ceux qui se posent la question du "delta G'" ou "delta G" je pense que le prof parle du "delta G'" = "delta G°" qui est le delta G à l'état standard.*

*Si vous ne comprenez pas en vrai on s'en fout un peu. Sinon ceux en SV vous le verrez au S2*

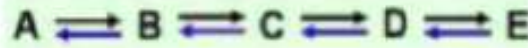


## 2. Etat d'équilibre et stationnaire

Une voie métabolique correspond à un ensemble de réactions biochimiques dont chacune a pour substrat la production de la réaction précédente.

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**



On rappelle que dans les cellules, les voies métaboliques s'éloignent de l'état d'équilibre et sont plutôt à l'état stationnaire.

*Bon là on va voir une loi qui est assez difficile à comprendre juste avec la phrase mais après je vais essayer de vous l'expliquer au mieux.*

**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" +++

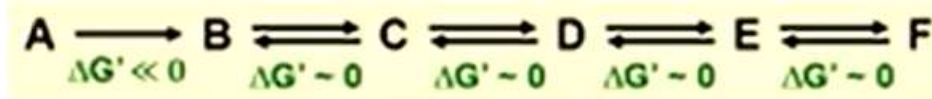
*Bon maintenant vous comprenez quand je vous dis que la phrase n'est pas facile à comprendre ! Donc je l'explique comme prévu : Tout d'abord, qu'est ce qu'un "facteur" → exemple : température, pression, concentration...*

*On peut faire l'analogie de cette loi avec le phénomène de la fièvre (attention la fièvre ne suit pas la loi de Lechatelier au sens strict car c'est un ensemble de réactions chimiques et non juste une seule réaction), puis on fera une autre analogie avec un élastique (pareil l'élastique ne suit pas la loi de Lechatelier au sens strict car c'est un phénomène physique).*

- *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).*

*Comme toujours si mes explications ne sont pas à connaître et si elles vous conviennent pas, ne vous embêtez pas à comprendre, apprenez juste la loi par coeur.*

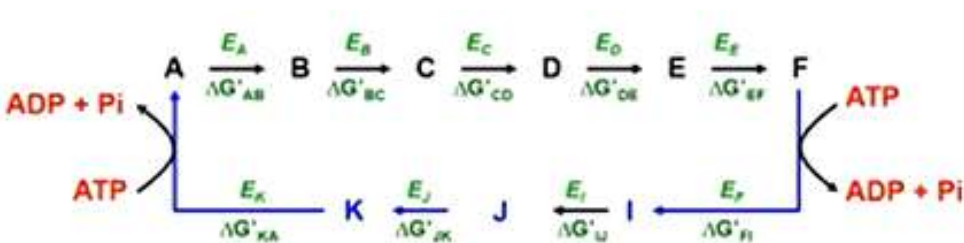




- A→B est une réaction irréversible due au  $\Delta G' \ll 0$ .
- Les réactions suivantes ont un  $\Delta G'$  autour de 0 et sont donc réversibles.
- Si A augmente, la réaction évolue dans le sens de la production irréversible de B, cette augmentation de B induit une cascade de réactions en aval permettant 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.

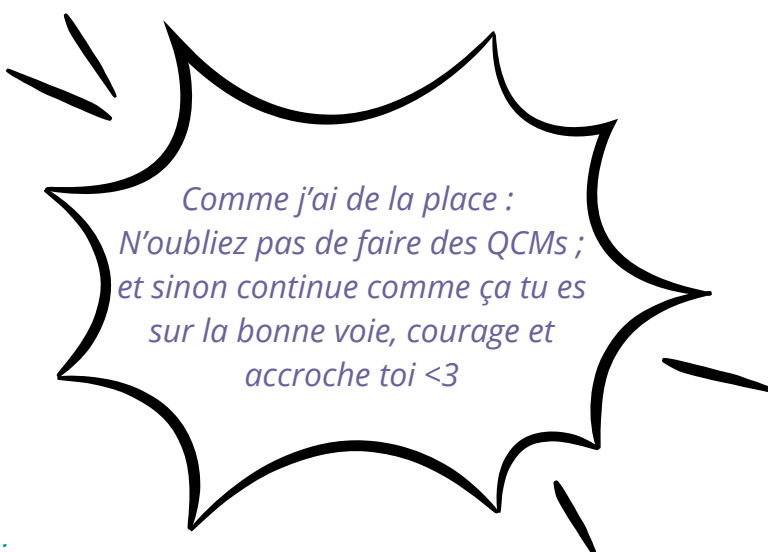
“D'un point de vue **thermodynamique**, les voies métaboliques ne sont **pas réversibles**. D'un point de vue **physiologique**, elles le **sont**.” +++



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

*C'est l'ATP l'apport d'énergie ici*

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 impliquées 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.

Celles qu'on retrouve le + sont les liaisons **phosphoanhydrides entre 2 phosphates**. Les liaisons riches en énergie sont représentées par : " ~ "

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

## Molécules contenant des liaisons riches en énergie

LIAISONS	FORMULES	EXEMPLES
AMIDINE-PHOSPHATES	$R-NH-C(=NH)-NH\sim P$	Créatine Phosphate
PHOSPHOANHYDRES	$R-O-P(=O)(O^-)-O\sim P(=O)(O^-)-O\sim P(=O)(O^-)-O^-$	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

## 1. Généralités sur l'ATP

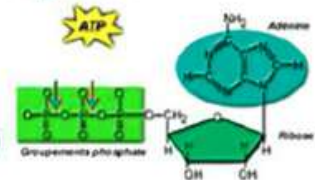
### L'ATP: adénosine triphosphate

• L'ATP et ses dérivés :

ATP : forme triphosphate de l'adénosine ( 2 - )

ADP : forme diphosphate de l'adénosine ( 1 - )

AMP : forme monophosphate de l'adénosine ( 0 - )



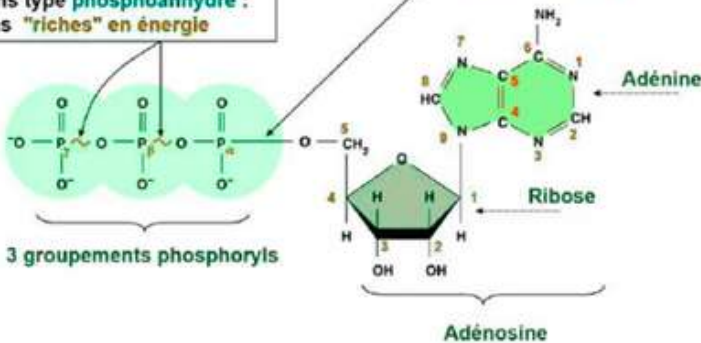
### Adénosine TriPhosphate (ATP)

Molécule à haut potentiel énergétique

FORMULE

Liaisons type phosphoanhydre : liaisons "riches" en énergie

Liaison type phosphoester : liaison "pauvre" en énergie



Dans l'ATP, on retrouve :

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

- Deux liaisons au niveau des phosphates distaux, béta pour le deuxième et Gamma pour le troisième : 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.

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



## 2. Hydrolyse de l'ATP

L'ATP contient 2 liaisons phosphanhydrides riches en énergie ( $\beta$  et  $\gamma$ ) qui peuvent être hydrolysées.  
*Bon ça on l'a déjà vu donc c'est +++*

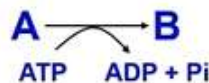
L'hydrolyse de l'ATP au niveau du phosphate  $\gamma$  libère une molécule d'ADP et du phosphate inorganique. Ensuite l'ADP peut être hydrolysé pour donner de l'AMP et du phosphate inorganique. L'hydrolyse de la première liaison phosphoanhydride ( $\gamma$ ) de l'ATP et de la deuxième à partir de l'ADP ( $\beta$ ) libère la même énergie soit :  $-32\text{Kj.mol}^{-1}$ .

L'ATP peut être aussi hydrolysé au niveau du phosphate libérant de l'AMP et du pyrophosphate (*2 phosphates = pyrophosphate = Ppi*).

L'association d'un cation divalent **Mg<sup>2+</sup>** à une molécule d'ATP le **stabilise** et **facilite la libération/le transfert d'énergie**.

- L'ATP est **thermodynamiquement instable** et présente une grande aptitude à s'hydrolyser en ADP ou en AMP
- Cette instabilité lui permet de servir à la fois de :

transporteur de l'énergie



donneur de groupement phosphoryle



- L'ATP, en apportant l'énergie nécessaire aux **réactions endergoniques**, permet à ces réactions d'avoir lieu

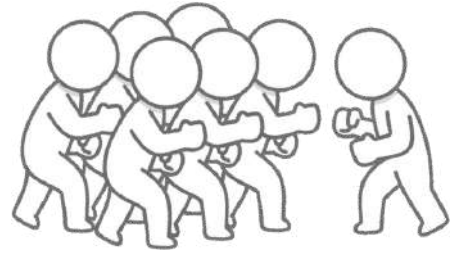
## 3. Formation de l'ATP

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

<u>Synthèse de novo à partir d'acide purique</u>	<u>Synthèse à partir de la transformation de l'ADP en ATP</u>
<p>-Le <b>Ribose 5-P</b> contribue à la synthèse de l'Inosine Triphosphate (IMP), précurseur de l'AMP (<i>adénosine monophosphate</i>) et du GMP (<i>Guanine monophosphate</i>).</p> <p>-L'AMP est ensuite converti en ADP puis en ATP, idem pour le GMP.</p> $\text{Ribose 5-P} \longrightarrow \text{IMP} \begin{cases} \longrightarrow \text{AMP} \longrightarrow \text{ADP} \longrightarrow \text{ATP} \\ \longrightarrow \text{GMP} \longrightarrow \text{GDP} \longrightarrow \text{GTP} \end{cases}$	<p>- Par <b>phosphorylation oxydative</b> : 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.</p> <p>- Par <b>phosphorylation liée au substrat</b> (cellule exprimant la CPK <i>créatine phosphokinase</i>)</p> $\text{Créatine-P} + \text{ADP} \rightleftharpoons \text{Créatine} + \text{ATP}$ <p>- Par l'<b>adénylate kinase</b> → réactions essentiellement utilisées par le muscle strié.</p> $2 \text{ADP} \xrightleftharpoons{\text{AK}} \text{ATP} + \text{AMP}$

## 4. D'autres molécules riches en énergie

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



Vous

La deuxième partie

### 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. 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).

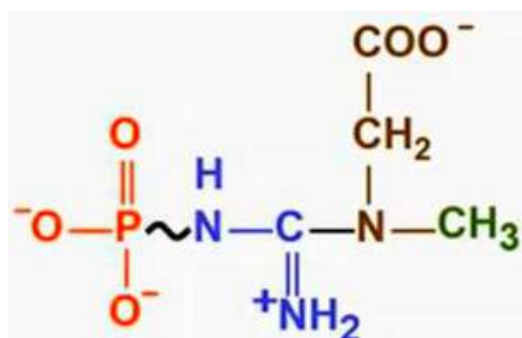
La **Créatine** est dégradée en **Créatinine** au niveau des **reins** est éliminée par **excrétion urinaire**. Le dosage de la Créatinine permet d'apprécier la fonction rénale, ainsi que le reflet de la masse musculaire. *Coucou la Physio !*

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

La créatine stabilisée par résonance, c'est-à-dire une délocalisation d'électrons.

**Cours prof??**

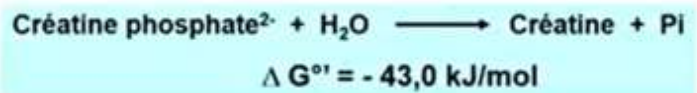
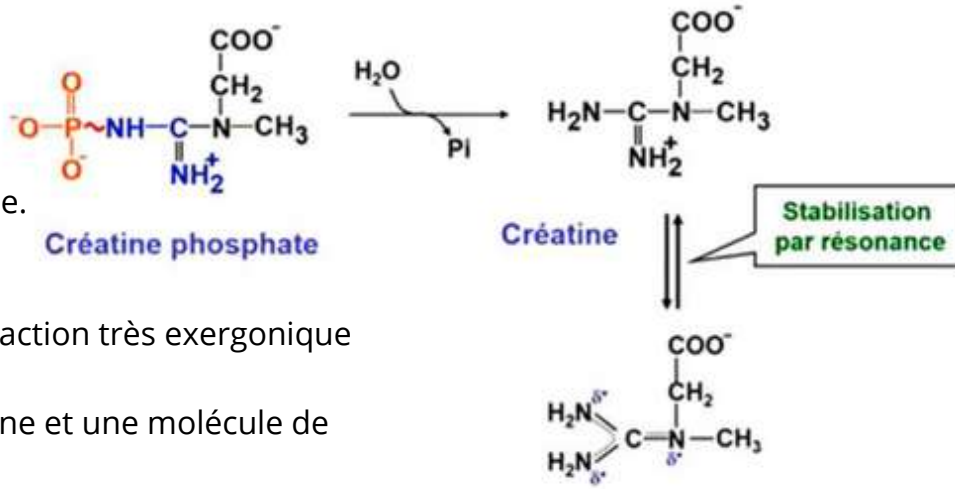
### Structure de la Créatine Phosphate



- 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 (~)** qui provient de l'ATP

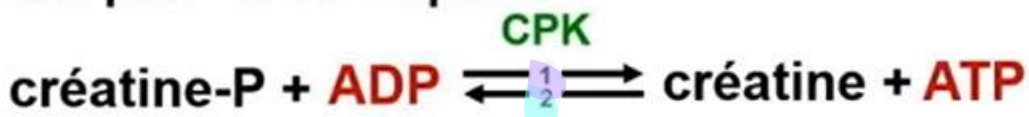


## Formule et réactivité



## 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 :



Le  $\Delta G^{\circ}$  attendu est de -43 kJ/mol. Cependant, suite aux conditions particulières du muscle en exercice (forts changements dans les concentrations en ATP et en ADP), le  $\Delta G^{\circ}$  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 :

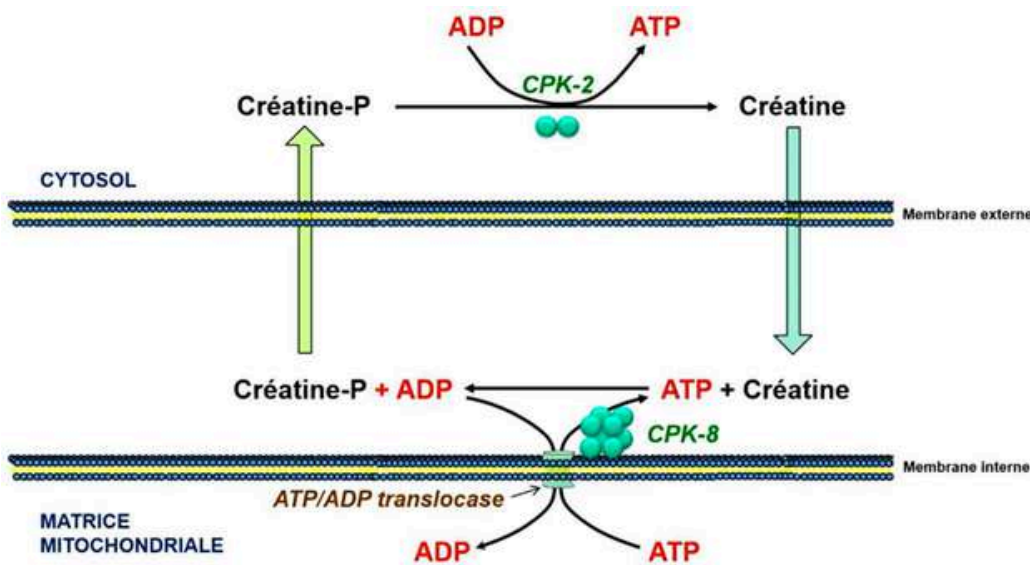
- **Pauvre en ATP** : l'**hydrolyse** de la **Créatine Phosphate** restitue sous forme d'**ATP** l'énergie mise en réserve (**sens 1**)
- **Riche en ATP** : (muscle en repos) l'énergie est récupérée de l'ATP pour **produire de la Créatine Phosphate** (**sens 2**)





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**



*Ce n'est pas le schéma du prof mais c'est plus visuel et donc plus simple à apprendre que des phrases*

Avec cette localisation distincte des 2 formes de CPK, on imagine la séquence suivante concernant leur action :

- 1) La **CPK-8 hydrolyse l'ATP** provenant de la matrice mitochondriale 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**.



*Avouez c'est cool la bioch quand même*





## C) Adénylate kinase (AK) /myokinase

Dans le métabolisme du muscle, il y a un autre acteur 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  $\Delta G^{\circ}$  proche de 0.

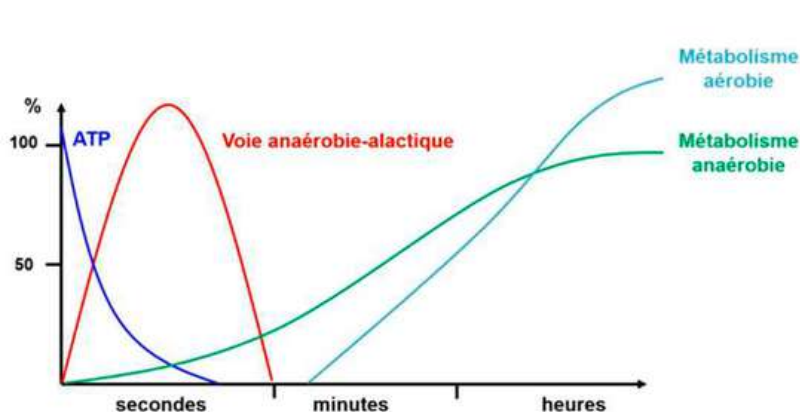


Elle permet de récupérer une liaison riche en énergie supplémentaire en réactivant un ADP (en somme 2 ADP nécessaires) en ATP. L'autre ADP est hydrolysé en AMP.

**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** Pour préciser, la "voie métabolique" c'est la synergie entre la CPK et l'AK. On la détaille juste après.

Quelles sources d'ATP sont utilisées au cours du temps lors d'un travail musculaire?



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

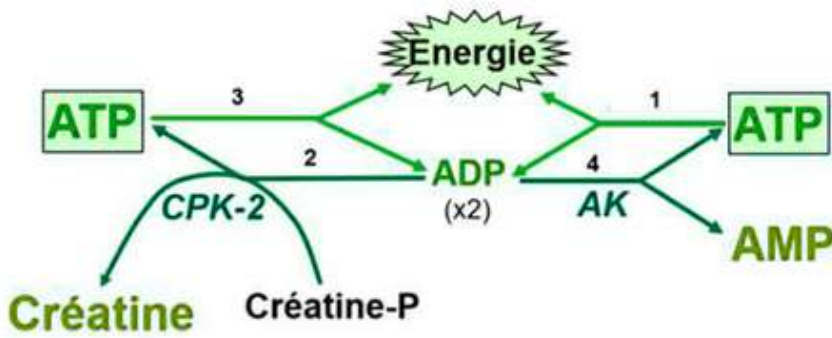
2) Très rapidement, la voie **anaérobie-alactique** prend le relais mais elle ne dure que **quelques minutes**

3) Ensuite, lentement mais **pour longtemps**, les métabolismes **aérobie** et **anaérobie** produisent de l'ATP pour la contraction musculaire





## D) Voie Anaérobie-alactique



*L'AMP et la Créatine sont les produits de la voie métabolique*

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

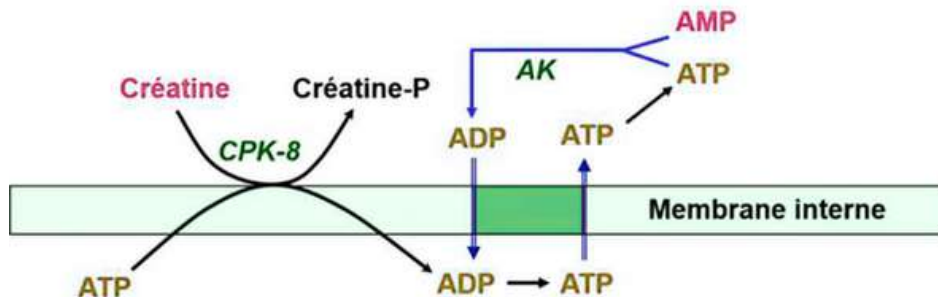
### Phase d'effort :

### Phase de récupération

- 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**

La cellule recharge la **Créatine** et l' **AMP** en énergie à partir des **ATP** produits par les **mitochondries** (chaîne respiratoire qui phosphoryle l'ADP en ATP). Cet ATP **traverse la membrane interne** et avec l'aide de l'adénylate kinase transforme l'**AMP** en **ADP** .

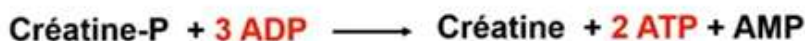
L'**ATP mitochondrial** permet avec **CPK-8** de produire de la **Créatine Phosphate** à partir de la **Créatine**. Finalement, la cellule a rechargé en énergie la Créatine et l'**AMP** à partir des ATP produits par les mitochondries



Créatine PhosphoKinase (CPK)



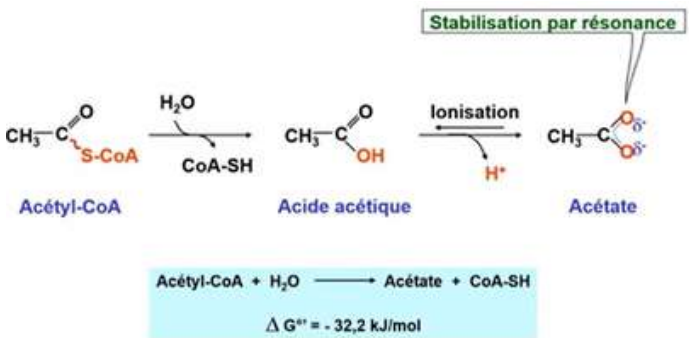
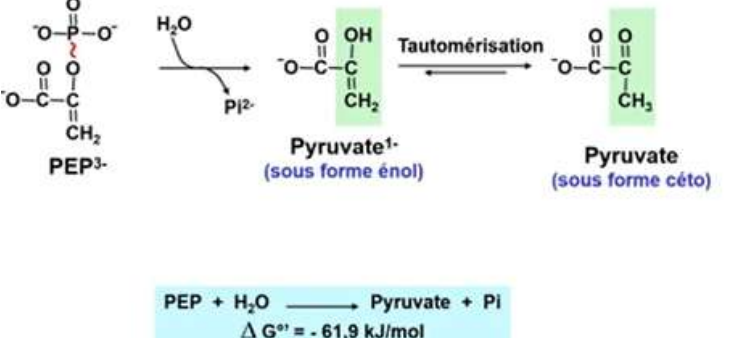
Adénylate Kinase (AK)





- 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.
- L'**ATP N'est PAS fourni par le biais de la circulation sanguine** = les cellules doivent en synthétiser de **manière continue**
- 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 ce pendant un **temps long**.

### E) Acétyl-CoA et Phosphoenolpyruvate

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

*Que veut dire "stabilisé par résonance" Osiris?*

*En gros, vous voyez que pour passer de l'acide acétique en Acétate on a perdu un H+, donc l'Acétate va avoir une charge -. Et cette charge - va pouvoir se balader de manière équivalente entre les 2 oxygènes. Ainsi on dit que l'Acétate est stabilisé par résonance.*

*C'est pas à savoir mais toujours bien à comprendre. Si ça ne vous aide pas, ne vous attardez pas dessus. Et si vous voulez que je réexplique → go forum*



## F) Réaction d'Oxydoréduction



Dernière grosse partie...

Petit rappel sur les réactions d'oxydoréduction :

- Les oxydations cellulaires sont des 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'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**  
Le composé accepteur est un **oxydant**

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

- Le transfert de groupement phosphoryle = élément central du transfert d'énergie et donc du métabolisme cellulaire
- Le **transfert d'énergie libre** par **transfert d'électrons** lors des réactions **d'oxydoréduction** : 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'accepter les électrons) : **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
- 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<sup>-</sup> vers une autre molécule accepteuse d'e<sup>-</sup> se réalise selon l'une de ces voies :

- Transfert **direct d'électrons**  $\text{Fe}^{2+} + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Cu}^+$
- Transfert via la **molécule d'hydrogène**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{AH}_2 \longrightarrow \text{A} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \\ \text{B} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{BH}_2 \\ \hline \text{AH}_2 + \text{B} \longrightarrow \text{A} + \text{BH}_2 \end{array} \right.$$
- Transfert via l'**ion hydruure** (H<sup>-</sup>) (= anion hydrogène)
- Transfert via une réaction directe de **l'oxygène** → incorporation covalente de l'oxygène dans une molécule organique





## G) Potentiel d'oxydoréduction

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.



3) Formule de **Nernst** pour calculer le potentiel redox du couple redox A :

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

**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/T K)

**T** : température en Kelvin ( K)

**n** : nombre d'électrons échangés

**F** : constante de Faraday (96 485 coulombs ou J/V.mol)

*Bon là on vous met la formule mais je pense très fortement que vous n'avez pas besoin de l'apprendre. Juste ceux qui sont en SV vous allez la voir au S2, désolée pour vous <3*

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

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

- Si **ΔE > 0**, la réaction est **spontanée +++**, c'est-à-dire que les é- vont de A (plus réducteur) vers B (accepteur)
- Si **ΔE < 0**, la réaction **nécessite de l'énergie** pour avoir lieu +++

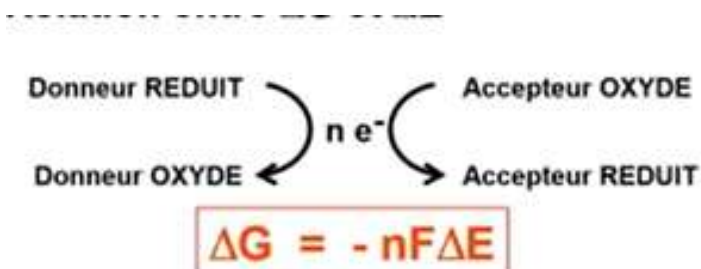
*Donc là, vous vous rendez bien compte que ΔE et l'invers de ΔG ! Ainsi quand ΔG < 0 ou ΔE > 0 la réaction est spontanée mais quand ΔG > 0 ou ΔE < 0 la réaction a besoin d'énergie !!!!*

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

#### • Réactions spontanées :

- Seules les réactions dont l'énergie libre (ΔG) baisse sont spontanées
- Seules les réactions redox entraînant une augmentation de potentiel redox ( ΔE > 0) sont possibles spontanément

#### • Relation entre ΔG et ΔE



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





Une réaction d'oxydoréduction se déroulant **spontanément** entraîne :

- Une variation du potentiel redox positive ( $\Delta E > 0$ )
- Une variation d'énergie libre négative ( $\Delta G < 0$ )

*On l'a répété et rerépété, donc j'espère que vous avez compris !*

- Les potentiels redox sont utiles pour les biochimistes car ce potentiel permet de calculer le  $\Delta G$  (=la variation d'énergie libre) donc **prédire le sens de la réaction.**
- **Connaissant le  $\Delta E$ , on peut calculer le  $\Delta G$**

En effet, une réaction d'oxydoréduction se déroulant spontanément entraîne une variation de potentiel redox positive :  **$\Delta E > 0$ , et une variation d'énergie négative  $\Delta G < 0$**

*OUFFF enfin terminé...*



*Et pour de bon cette fois !!*

*Place aux dédis,*

*et pour cette fois ci c'est dédis photos !*

