



LA BIOENERGETIQUE

L'organisme est une structure complexe qui a 2 missions :

Se perpétuer
(cela implique la génétique)

Se conserver : besoin de matière et d'énergie
(C'est le métabolisme avec l'anabolisme (synthèse) et le catabolisme (dégradation))

Se conserver



La matière et l'énergie

METABOLISME

CATABOLISME
(dégradation)

ANABOLISME
(biosynthèse)

I. L'ENERGIE C'EST LA VIE

Pour se conserver, **une cellule doit continuellement « travailler »**, elle doit réaliser les actions nécessaires à sa survie, il y a donc des besoins continus en énergie !

Définition : L'énergie pour une cellule c'est la capacité qu'elle a de réaliser un travail.

Ce travail peut être :

- **Mécanique** : Certaines cellules peuvent bouger ou se contracter (Exemple : Cellules musculaires)
- **Transport transmembranaire** : Afin de faire rentrer ou sortir des molécules (Exemple : L'absorption des nutriments)
- **Chimique** : Produire des molécules (Exemple : Le métabolisme cellulaire)

L'énergie cellulaire est une énergie chimique

Également on va décrire deux grandes familles de réactions :

Les réactions EXERGONIQUES	Les réactions ENDERGIQUES
Ces réactions chimiques vont libérer de l'énergie dans le système (milieu biologique)	Ces réactions chimiques ont besoin de l'énergie du système pour « fonctionner » (milieu biologique)

Concepts de l'énergie utile : l'énergie libre

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



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

- **Capter l'énergie du milieu extérieur** : Pour les mammifères ce sont les substrat carbonés (alimentation)
 - **Céder sous forme de chaleur** une partie de cette énergie au milieu extérieur
 - **Utiliser le reste de cette énergie** pour réaliser les « travaux cellulaires »
- Notion de transport/ transfert d'énergie


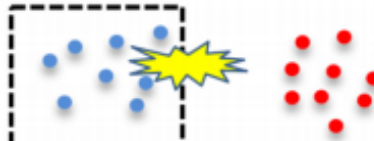
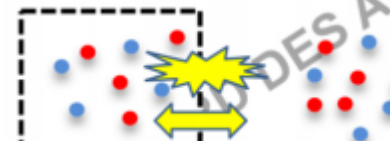
Toute cellule vit et se développe grâce à ces échanges ininterrompus de matière et d'énergie avec le milieu environnant

II. LA NOTION DE SYSTEME

A) Définition

Définition d'un système : Réunion de la matière pour constituer un ensemble cohérent. Un système peut se limiter à une cellule, un organe ...

On va détailler 3 systèmes (rappel de chimie G) :

Système ISOLÉ (chimie)	Système FERMÉ	Système OUVERT
 <p>Aucun échange d'énergie et de matière</p>	 <p>Echange d'énergie seulement</p>	 <p>Echange d'énergie et de matière</p>

B) Application à la cellule

Définition : La cellule est un système **isotherme ouvert** qui fonctionne à **température (T°)** et **pression (P) constantes** (Notre organisme possède une température constante et de grande variation de celle-ci peut provoquer des désordres physiologiques)

Dans le monde vivant on décrit 2 grands systèmes :

Plantes = autotrophes	Animaux = hétérotrophes
<p>Elles prennent l'énergie solaire et la transforme en macromolécules nutritives → la photosynthèse</p>	<p><u>Les cellules animales vont :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Utiliser les nutriments pour en extraire l'énergie qui sera soit stockée soit utilisée pour réaliser les travaux cellulaires C'est le CATABOLISME ➤ Utiliser l'énergie stockée dans les composés à haut potentiel énergétique pour synthétiser les macromolécules indispensables C'est l'ANABOLISME



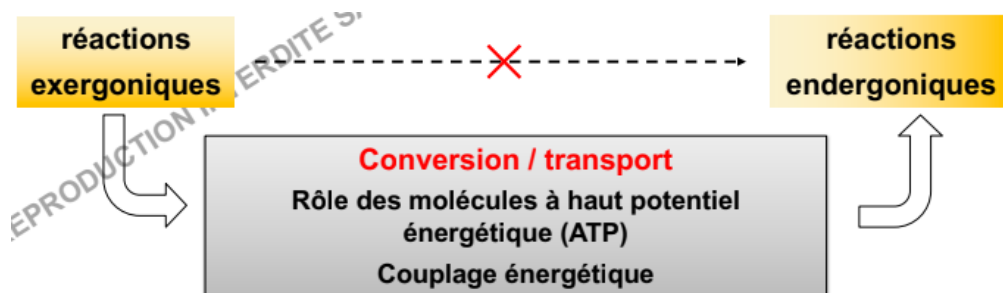
III. BIOENERGETIQUE

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

La bioénergétique c'est donc :

- **Etude de la dégradation des aliments** (polysaccharides, protéines, graisses) pour en extraire de l'énergie en cassant les liaisons chimiques : **c'est la CATABOLISME**
- **Conversion sous forme de stockage** et de **transfert biologiquement utilisable** de cette énergie : cela peut se faire grâce à **l'ATP**
- **Utilisation de cette énergie** pour effectuer des **travaux** (contraction musculaire / anabolisme)

On a vu qu'il y avait **des réactions exergoniques** qui vont **libérer de l'énergie** et permettre l'exécution **des réactions endergoniques** qui ont **besoin d'énergie** afin de se réaliser !



Cependant les réactions exergoniques ne sont pas capables de donner l'énergie directement aux réactions endergoniques. +++

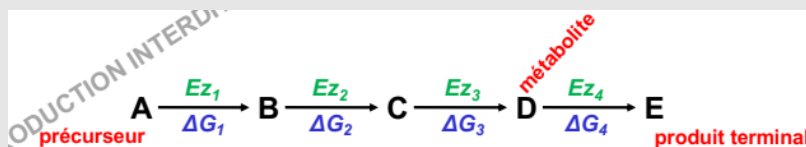
Cette énergie doit être convertie sous une certaine forme afin d'être transportée. (Rôle de l'ATP)

A) Métabolisme

Définition métabolisme : L'ensemble des réactions qui se déroulent dans une cellule.

Plusieurs centaines de réactions chimiques qui sont organisées en séquences distinctes ($A \rightarrow B \rightarrow C$). Chaque séquence correspond à **une voie métabolique** et chaque intermédiaire correspond à un **métabolite**.

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



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



B) Les molécules énergétiques

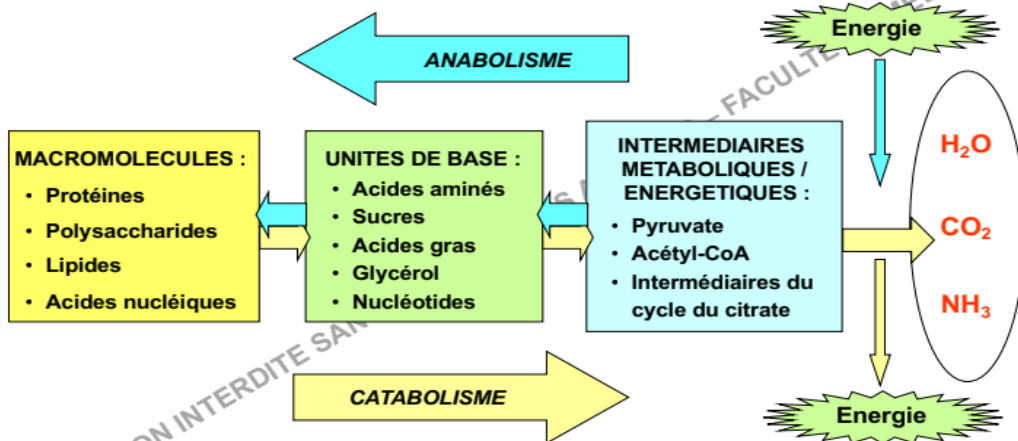
Chaque nutriment que nous ingérons contient de l'énergie :

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

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$$

$$1 \text{ Joule} = 0,2388 \text{ cal}$$

METABOLISME = ANABOLISME + CATABOLISME



L'apport extérieur (alimentation) est constitué de **macromolécules** (exemple : L'amidon, les triglycérides...) qui vont être dégradées en **unités de base** (exemple : pour les lipides → c'est les Acide Gras (AG)).

Ces **unités de base** vont pouvoir s'engager dans **des voies métaboliques** (cf. Cours intro métabo) et être dégradées dans certains cas en molécules plus petites qui sont **les intermédiaires métaboliques en dégageant de l'énergie** (exemple : Le pyruvate #la glycolyse).

Si ces intermédiaires vont être soit dégradées complètement (**catabolisme**), on obtient **les molécules simples** (H₂O, CO₂, NH₃), soit être utiliser afin de produire des unités de base (**anabolisme**)

C'est le catabolisme qui génère de l'énergie à partir des unités de base sauf les acides nucléiques ! (rappel du 1^{er} cours)

C) Principes et Objectifs

1) Les Objectifs de la bioénergétique

- **Etudier les réactions** : est ce que la réaction peut avoir lieu et si oui quel est son sens (de A vers E ou de E vers A) ?
- **Les bilans énergétiques** : combien de molécules d'ATP produites, combien de molécules de KJ ou de kcal produit au cours de la réaction.

2) Les 2 Principes fondamentaux en bioénergétique

- ❖ **1^{er} principe** : L'énergie totale de l'univers demeure constante. (Elle peut être transformée, transférée mais jamais créée ou détruite !)
- ❖ **2^{ème} principe** : L'entropie de l'univers augmente



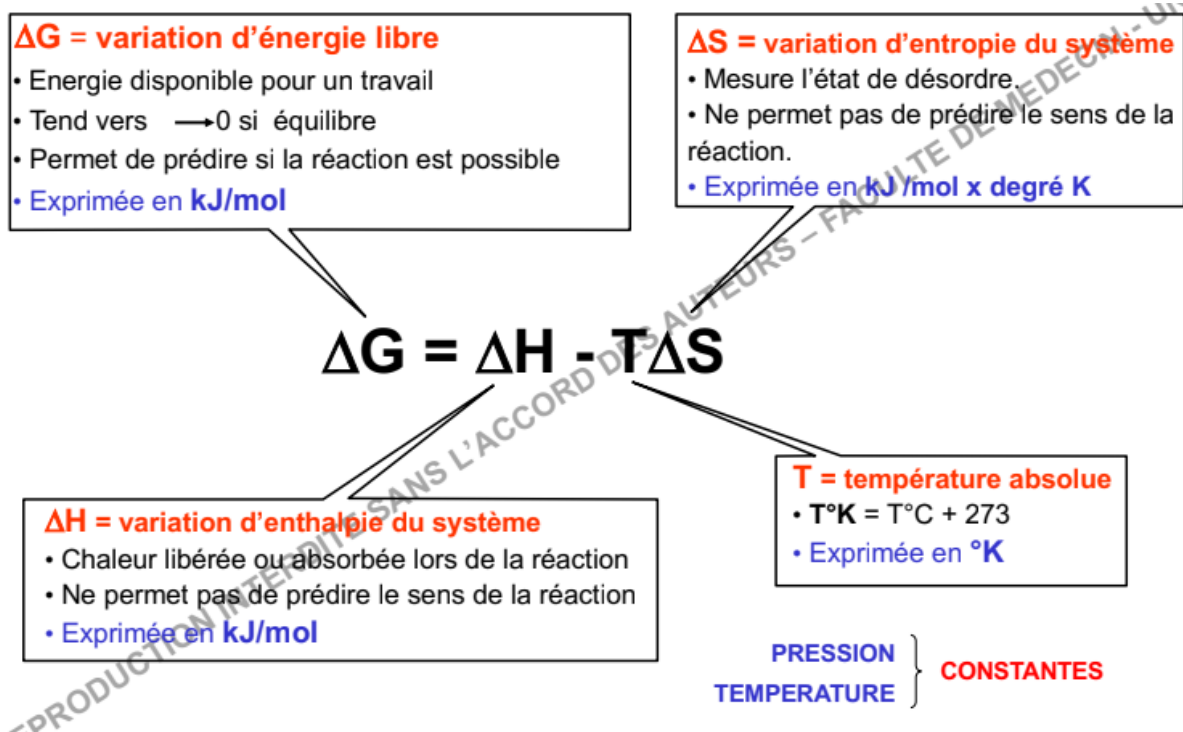
Définition de l'entropie : Définit le degré de désordre ou de hasard. Chaque transfert ou transformation d'énergie est associé à **des réactions passant d'un état ordonné à un état désordonné** sachant que l'état désordonné est toujours plus probable.

D) La relation de GIBBS

En bioénergétique on va décrire différentes énergies qui sont :

- **L'enthalpie total (ΔH) :** c'est l'énergie totale contenue dans un composé brûlé entièrement dans un calorimètre.
- **L'énergie entropique (ΔS) :** représente l'énergie du désordre du système
- **L'énergie libre (ΔG) :** c'est la quantité totale d'énergie susceptible de fournir un travail au cours d'une réaction à température (T°) et pression (P) constante.

La relation fondamentale qui lie ces différentes énergies a été établie par Willard GIBBS :



IV. ETUDE ENERGETIQUE

A) L'énergie libre (ΔG)

Définition : L'énergie libre mesure l'énergie d'un système qui produit **un travail utile**. Il est lié à deux facteurs qui vont caractériser la réaction : **l'enthalpie (ΔH)** et **l'entropie (ΔS)**.

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

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



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

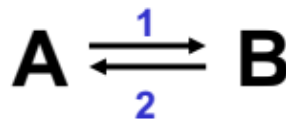
La capacité d'un système à fournir de l'énergie utile pour réaliser un travail diminue au fur et à mesure que ce système se rapproche de son état d'équilibre.

En conséquence de cela on aura 3 situations :

- Si $\Delta G = 0$ → On est à l'équilibre, le système ne peut plus fournir de travail
- Si $\Delta G < 0$ → Le système est instable et la réaction se déroule spontanément (exergonique)
- Si $\Delta G > 0$ → Il faut un apport d'énergie du milieu extérieur au système pour rendre le ΔG négatif afin que la réaction puisse se réaliser (endergonique)

B) Etude énergétique

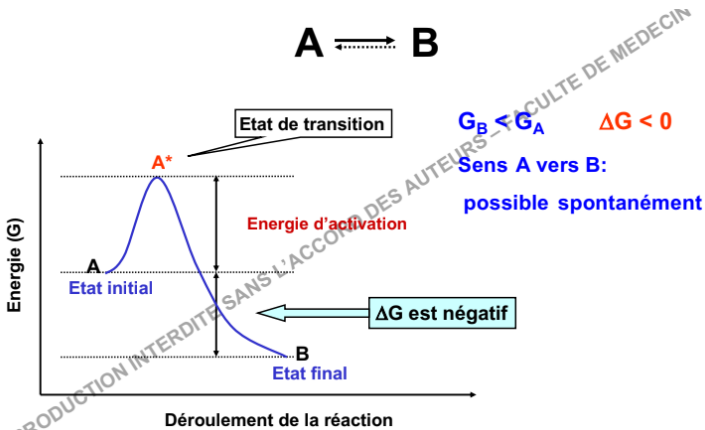
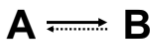
Soit un système composé de A et B et représenté par la réaction suivante :



Nb : une réaction à l'équilibre ne veut pas dire qu'il y a autant des 2 substrats d'un côté et de l'autre et que les concentrations sont égales

- ❖ Si $\Delta G < 0$ car $G_B < G_A$: réaction EXERGONIQUE, libère de l'énergie, et se fait spontanément dans le sens 1
- ❖ Si $\Delta G > 0$ car $G_B > G_A$: réaction ENDERGONIQUE, ne peut pas se faire spontanément, il faut obligatoirement fournir de l'énergie extérieure au système
- ❖ Si $\Delta G = 0$ car $G_B = G_A$: l'état d'équilibre est atteint, la réaction se fait sans consommation d'énergie (réaction à l'équilibre).

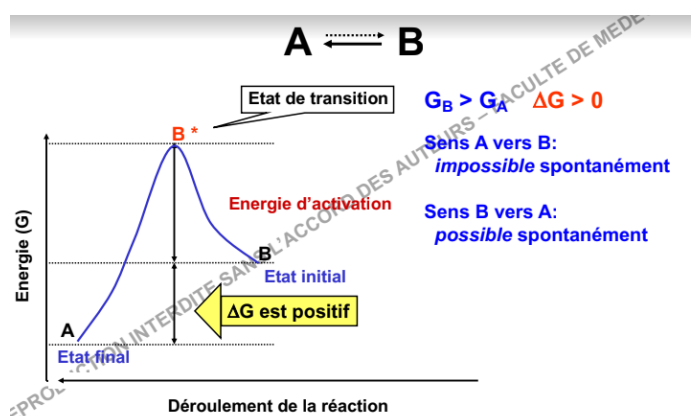
Réaction Exergonique



Si $G_B < G_A$: on retrouve une étape de transition (qui correspond à un état d'activation) mais le ΔG entre A et B est négatif.

La réaction $A \rightarrow B$ se fait **spontanément**.

Réaction Endergonique



Si $G_B > G_A$: la réaction de A vers B ne peut pas se faire spontanément, il faut apporter de l'énergie, car le ΔG entre A et B est positif.

Cependant elle peut se dérouler spontanément dans l'autre sens ($B \rightarrow A$).

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



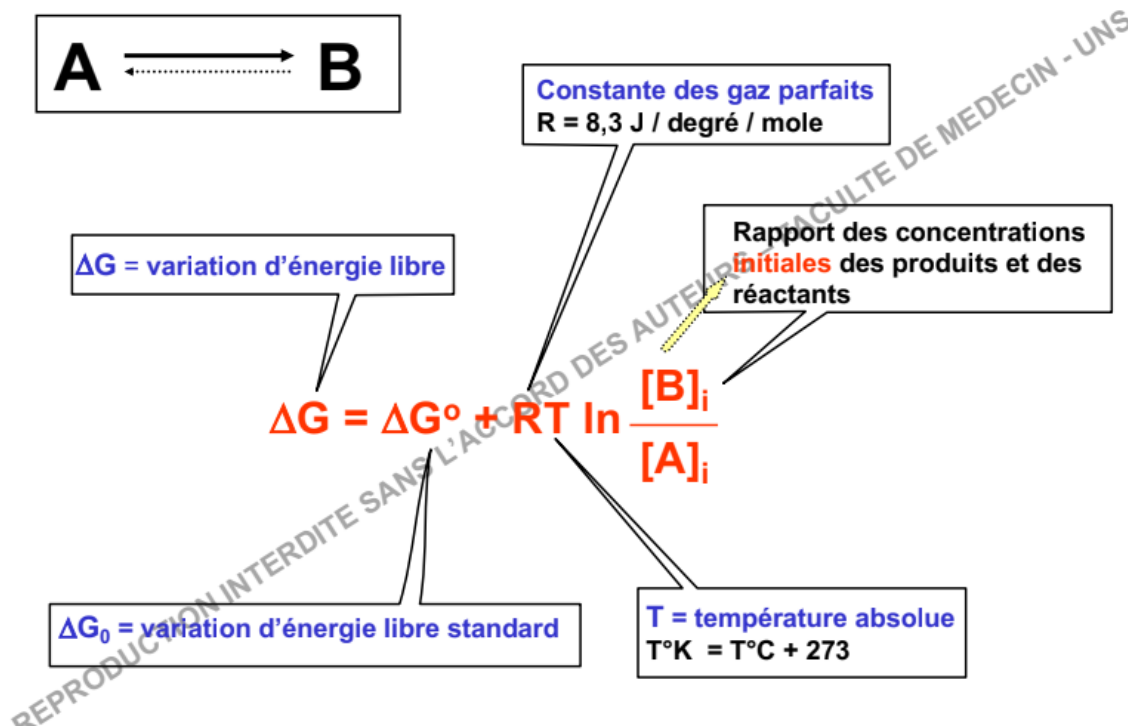
C) Notion d'état standard

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

Définition d'état standard : C'est l'état dans lequel un élément ou un composé est le plus stable à la température et à la pression ordinaire. L'énergie libre d'un composé dans son état standard est définie par le sigle ΔG°

Les chimistes travaillent dans des tubes à essais (système fermé) avec des molécules pures et ont défini des conditions standards :

- ❖ Pression → 1 atmosphère (atm)
- ❖ Température → 25°C / soit 298°K
- ❖ Concentration des solutés → 1 molaire (1 mol/L)
- ❖ pH = 0 (pH = -log[H+] et [H+] = 1M)

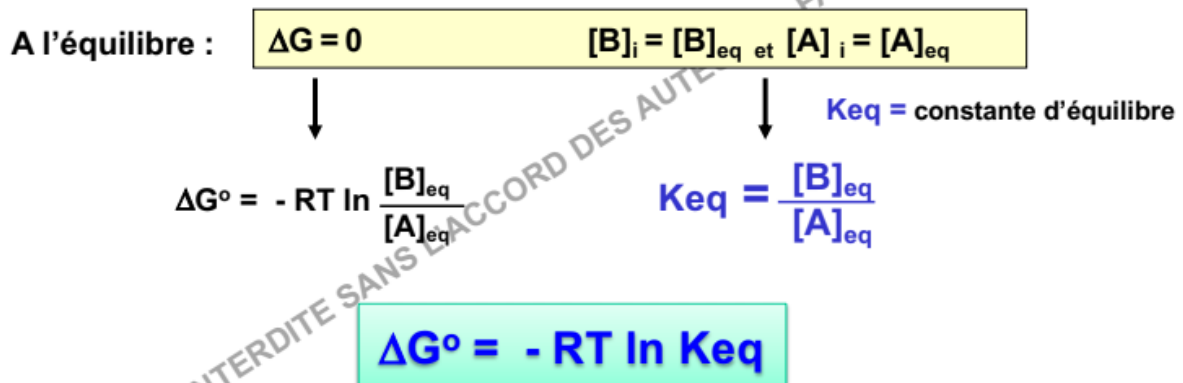


Lorsque que l'on est à l'équilibre, on ne bouge plus : $\Delta G = 0$

**NB :**

→ Les concentrations des solutés sont celles à l'équilibre telles que : **$B_i = B_{eq}$ et $A_i = A_{eq}$**

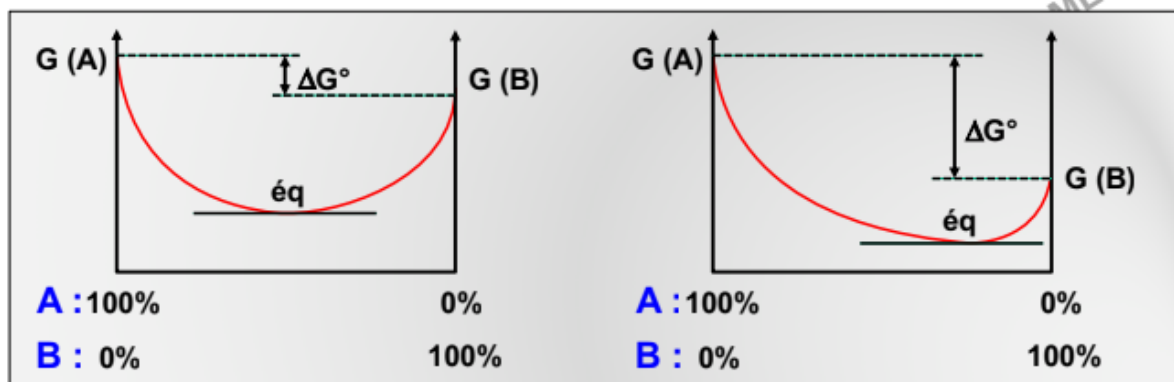
→ On peut donc calculer **la constante d'équilibre K_{eq}** d'une réaction dans les conditions de l'état standard



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

D) ΔG° et équilibres chimiques

$\Delta G^\circ \rightarrow$ informe sur l'état d'équilibre de la réaction $A \rightleftharpoons B$



Quelles que soient les concentrations de A et B ou la valeur de ΔG° :

- 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 ΔG°
 - ✓ Si ΔG° est petit, on obtient environ la moitié de [A] et [B] → réaction réversible (= on évolue vers l'état d'équilibre).
 - ✓ Si ΔG° est grand et négatif, la réaction est pratiquement totale et $[B] \gg [A]$ → la réaction est irréversible.



Rq : Dans **une voie métabolique**, on veut surtout **aller de A vers E**, donc **la réaction doit être irréversible** pour que l'on forme le produit final et que les concentrations entre le 1^{er} substrat et le produit soient pratiquement équivalentes.

REACTIONS CHIMIQUES

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

Les différentes [] = 1 M

REACTIONS DANS LA CELLULE

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

Problèmes :

du pH
de la [eau] | dans les cellules

E) Etat standard et conditions physiologiques

Les réactions chimiques ne sont pas représentatives de ce qu'il passe vraiment dans la « vraie vie » : des adaptations ont donc été faites pour que cela soit compatible.

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

→ Ces réactions impliquent **souvent la formation ou utilisation H⁺**.

Ainsi on définit une nouvelle définition de ΔG° dans le système biologique qui devient le $\Delta G'^\circ$

Définition de $\Delta G'^\circ$:

$\Delta G'^\circ$ est la modification de l'énergie libre standard dans les conditions : (++++)

- pH qui vaut 7 (standard) : $[H^+] = 10^{-7}$ mol/L
- une concentration initiale de **tous les composants à 1.0 M (sauf pour le H⁺)**
- **une température de 25°C**
- une pression constante = 1 atm

Il permet de dire dans quelle direction va évoluer une réaction pour atteindre l'équilibre quand elle se produit dans des conditions standards adaptées à l'organisme. (pH = 7)

[Eau] = constante → n'est plus prise en compte dans l'expression des constantes d'équilibre.

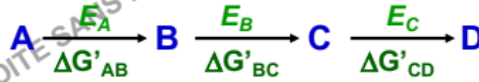


F) Nature additive de la variation de ΔG

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

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

On peut donc écrire une séquence de réactions :



La réaction globale est :



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

→ Pour aller de A (substrat) vers D, on doit passer par des **intermédiaires** (B et C) car la réaction ne peut se faire directement.

→ Dans chaque réaction, des enzymes différentes apparaissent.

LA REACTION GLOBLALE EST :

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

Sommes des ΔG des différentes étapes intermédiaires.

G) Réactions couplées

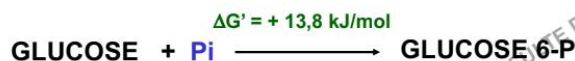
➤ Certaines réactions cellulaires de l'anabolisme et du catabolisme nécessite un apport d'énergie = **ENDERGONIQUE**.

➤ Une réaction exergonique ne produit pas d'énergie toute seule, elle est liée à une réaction qui a besoin d'énergie (endergonique).

➤ Dun.de vue thermodynamique, **il suffit de dégager de l'énergie par la réaction exergonique soit en valeur absolue supérieur ou égal à l'énergie requise par la réaction endergonique.**



Exemple de la réaction de consommation de glucose :



**Rq :**

- Le G6P fait partie des voies métaboliques très importantes.
- Lorsque la cellule a besoin d'énergie, **le glucose va être transformé en G6P** par l'intermédiaire de **l'ATP** qui met son phosphate sur le C6 du glucose. Ce glucose devient du G6P et **l'ATP perd un phosphate** devenant ainsi de **l'ADP**.

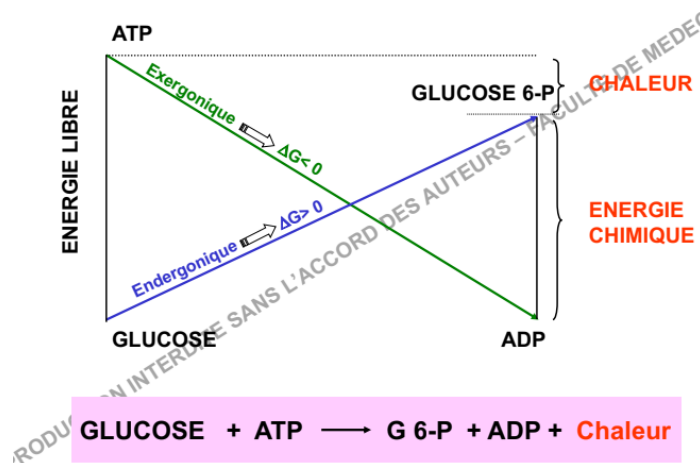
◆ **La réaction transformant le glucose en G6P est endergonique.** Elle ne se déroule jamais spontanément car $\Delta G \geq 0$ donc on a besoin d'énergie.

◆ **La réaction d'hydrolyse de l'ATP (3 molécules de phosphate) en ADP (2 molécule de phosphate) et très exergonique** car $\Delta G < 0$, on libère -30,5 kJ / mol.

= L'ATP est très riche en énergie libre.

→ La nature va coupler dans certaines cellules et dans certains contextes les 2 réactions qui ensemble deviennent possibles.

- Le glucose bénéficie de l'énergie de la transformation de l'ATP en ADP.
- L'excédent d'énergie 16 kJ sera libérée sous forme de chaleur.



IV. BIOENERGETIQUE ET METABOLISME :

A) L'état stationnaire

Définition de l'état stationnaire :

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

Remarque : dans une voie métabolique il y a un sens précis qui définit qui est défini par le ΔG .



Définition d'une voie métabolique :

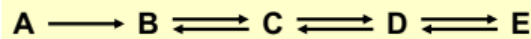
Une voie métabolique correspond à un ensemble de réactions biochimiques dont chacune a pour substrat le produit de la réaction qui précède.

→ Ces voies sont **ordonnées, régulées** donc s'éloignant de l'état d'équilibre. Elles sont l'inverse de l'**entropie** dont **les conditions sont définies par l'état stationnaire.**

→ Dans les conditions physiologiques, l'apport constant du premier métabolite permet la production constante du dernier métabolite.

Etat stationnaire

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



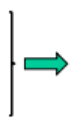
Etat stationnaire :

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

[B, C, D] demeurent constantes

[A] diminue

[E] augmente



Conditions physiologiques:

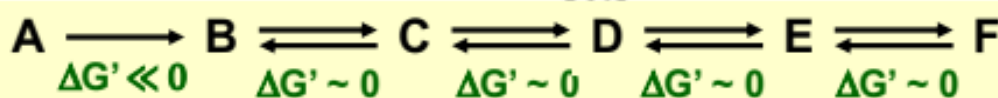
apport constant du 1er métabolite A

consommation constante du dernier D

B) Loi de Lechatelier

Définition de la 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.

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



❖ Si l'on augmente A, on aura une augmentation de la production de B de **manière irréversible**.

Cette augmentation de B va entraîner la cascade de réaction en aval **selon la loi de Lechatelier** permettant la production du produit F !

Le fonctionnement ou non de la voie métabolique dépend de **la réaction irréversible**, cette étape sera limitante et donc essentielle pour la régulation de la Voie

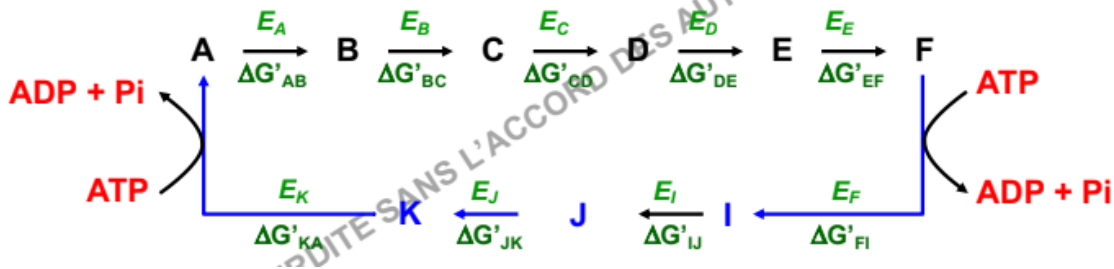
A partir du moment où A se transforme en B de manière irréversible, **la cellule fait en sorte d'activer cette voie métabolique !**

C) Bioénergétique et voies métaboliques

Les Voies métaboliques ne sont pas réversibles d'un point de vue thermodynamique mais le sont d'un point de vue physiologique !!!!



- Le passage de A à F par la voie métabolique est **exergonique donc irréversible**.



- Si on va de F à A l'organisme fait **rarement les réactions inverses** ! On va donc emprunter une autre voie avec d'autres enzymes qui **physiologiquement est possible** mais thermodynamiquement cette voie nécessite l'apport d'énergie extérieure (hydrolyse de l'ATP)

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

V. Stockage d'énergie et Utilisation :

A) Les liaisons riches en énergie

Dans l'organisme, on a **des molécules riches en énergie** et c'est la **dégradation de celles-ci qui permet de libérer de l'énergie** !

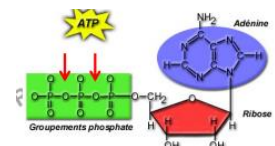
Les liaisons riches en énergie sont représentées par une petite vague

Tableau récap' avec toute les liaisons énergétiques que vous allez aborder en bioch' +++++

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

B) L'ATP +++

L'ATP est une molécule qui joue un rôle fondamental dans notre organisme.



Caractéristique de l'ATP :

- Il est présent **dans toutes les cellules vivantes** à une concentration de **10⁻⁴ à 10⁻³ mole/l**
 - Pour une cellule en repos on retrouve **10 ATP pour 1 ADP**
 - Dans l'organisme on a **une teneur en ATP de 75g**
 - Quotidiennement on a **45Kg d'ATP** qui sont **synthétisée et hydrolysée**

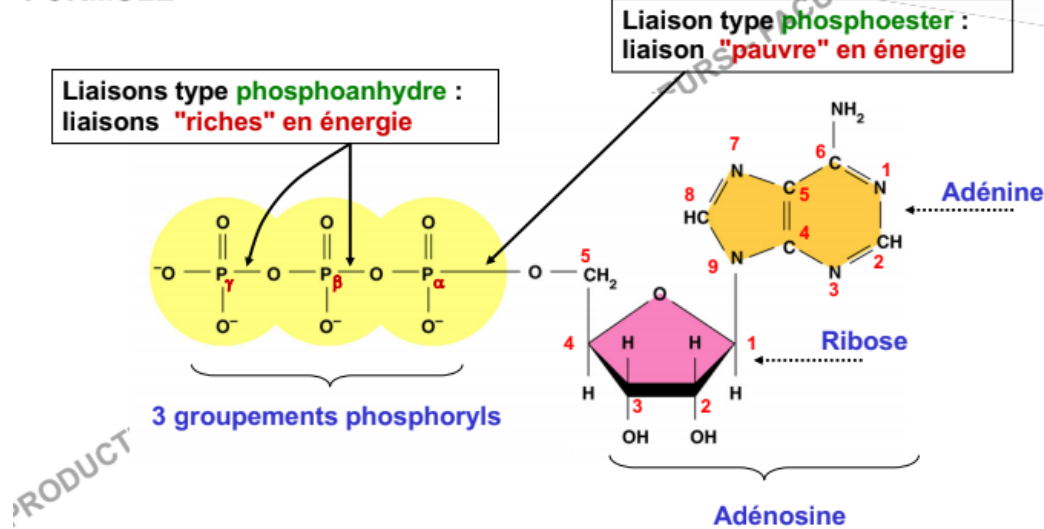


Structure de l'ATP (Adénosine TriPhosphate) :

L'ATP est composée d'une adénosine (adénine + ribose) lié à 3 phosphates :

- Le 1^{er} phosphate lié par une **liaison phosphoester (α)** (pauvre en énergie)
- Les 2 autres phosphates sont liés par **des liaisons phosphoanhydre (γ et β)** (riches en énergie)

FORMULE



L'ATP fonctionne donc à travers le système adénylate qui comprend :

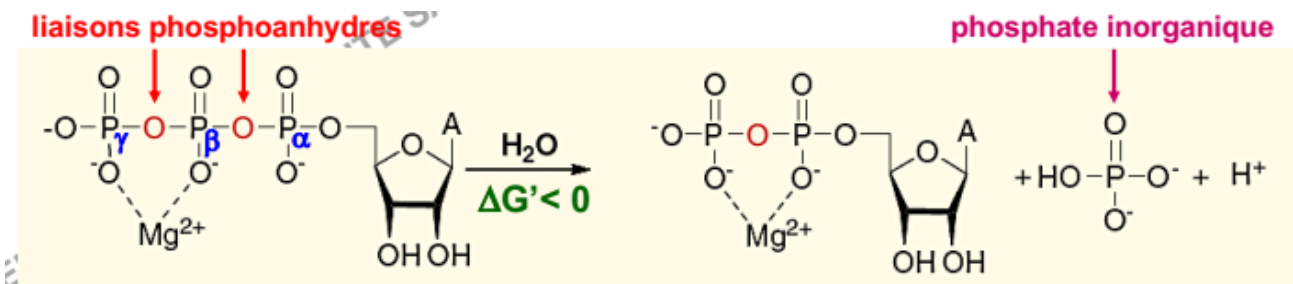
- **ATP** qui est la forme triphosphate de l'adénosine (**2 liaison hautement énergétiques**)
- **ADP** qui est la forme diphosphate de l'adénosine (**1 liaison hautement énergétique**)
- **AMP** qui est la forme monophosphate de l'adénosine (**0 liaison hautement énergétique**)

Réactivité de l'ATP :

- L'hydrolyse d'une **liaison phosphoanhydre**, libère un phosphate inorganique et s'accompagne d'une libération d'énergie utile pour un travail.

- L'hydrolyse de la **liaison phosphoanhydre β** ainsi que de la **liaison phosphoanhydre γ** libèrent autant d'énergie soit 31kJ mol⁻¹ !

Également l'ATP peut s'associer avec un cation divalent, le **Mg²⁺** ce qui **augmente la vitesse d'hydrolyse de l'ATP**





La molécule d'ATP pourra s'hydrolyser de plusieurs manières différentes ce qui ne va libérer la même quantité d'énergie :

1^{er} cas : ATP → ADP → AMP

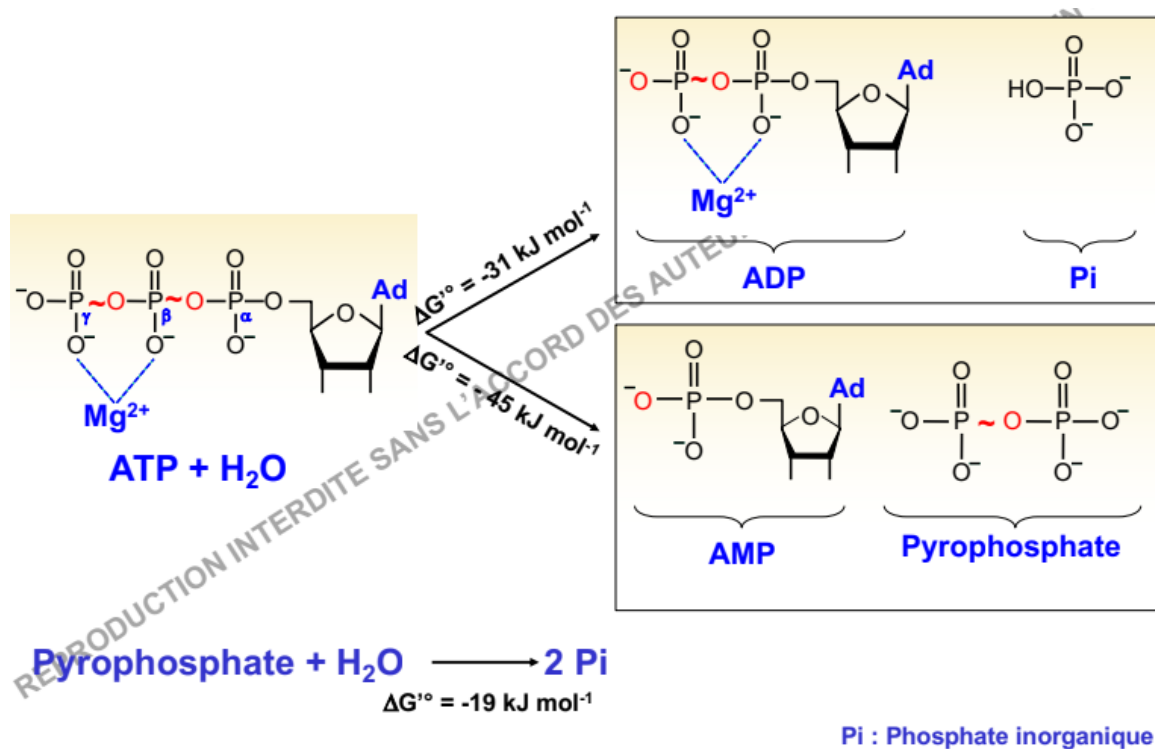
- **Hydrolyse ATP → ADP** : On hydrolyse **une liaison phosphoanhydre (liaison γ)** ce qui libère **31 kJ/mol** d'énergie et **un phosphate inorganique**.
- **Hydrolyse ADP → AMP** : On hydrolyse **la deuxième liaison phosphoanhydre (liaison β)** ce qui libère **31 kJ/mol** d'énergie et **un phosphate inorganique**.

On libère en tout **62 kJ/mol d'énergie** et **2 phosphate inorganique (Pi)**

2^{ème} cas : ATP → AMP + PPi / PPi → 2 Pi

- **Hydrolyse ATP → AMP** : On hydrolyse directement **la deuxième liaison phosphoanhydre (liaison β)** ce qui libère **45 kJ/mol** d'énergie et **un pyrophosphate (PPi)**.
- **Hydrolyse PPi → 2 Pi** : On hydrolyse la liaison énergétique de notre pyrophosphate ce qui libère **19 kJ/mol** d'énergie et **2 phosphate inorganique (Pi)**.

On libère en tout **64 kJ/mol d'énergie** et **2 phosphate inorganique**

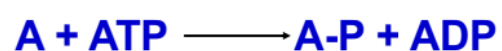


L'ATP est **thermodynamiquement instable** et présente une grande aptitude à s'hydrolyser en ADP ou en AMP !

Cette instabilité lui permet de servir à la fois de :

- **Transporteur d'énergie**

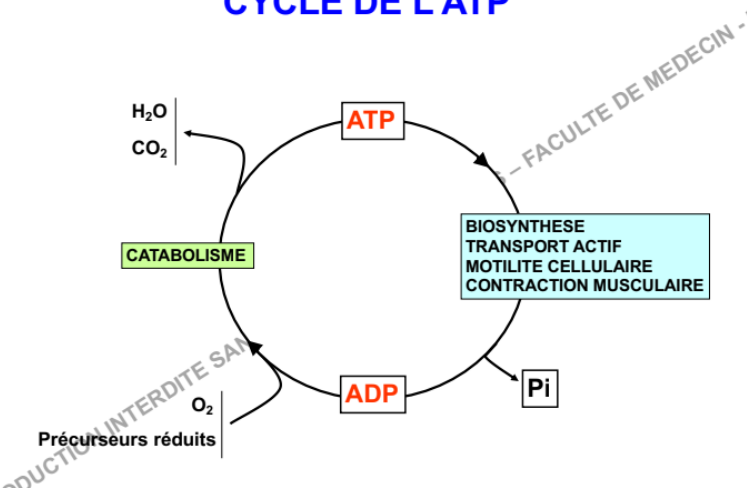
- **Donneur de groupement phosphoryle**



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



CYCLE DE L'ATP



L'ATP est importante notamment dans :

- La biosynthèse de molécules
- Le transport actif
- La motilité cellulaire
- La contraction musculaire

Cela forme de l'ADP et qui peut reformer de l'ATP nécessaire dans les voies de synthèse à partir de précurseurs réduits, d'O₂ en rejetant de l'eau et du CO₂

Formation de l'ATP :

L'ATP peut être formé de différentes façons :

- La première se passe dans le cytoplasme, en empruntant la voie de synthèse des nucléotides puriques
- La deuxième est la transformation de l'ADP en ATP qui peut se faire de 3 façon différente !

1. Voie de synthèse des nucléotides puriques (cytoplasme)



2. Transformation de l'ADP en ATP

• Oxydations phosphorylantes

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

• Phosphorylation liée au substrat (cellules exprimant CPK)



• Adénylate kinase → réaction essentiellement utilisée par le muscle strié



Ici il faut bien retenir **que 90 % de l'ATP chez l'homme est formé dans la membrane interne mitochondriale !**
(QCM 2019 !!)

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



B) La créatine phosphate (CP)

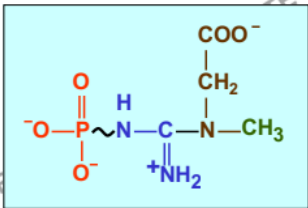
La créatine phosphate est **une forme de réserve énergétique dans les muscles des vertébrés**. Son énergie provient de **l'ATP mitochondrial** et permet de générer très rapidement de l'ATP au niveau du cytosol.

C'est la réserve d'énergie la plus rapidement disponible pour la contraction musculaire après le pool d'ATP (ATP présent à l'instant t dans la cellule)

Caractéristique de la Créatine :

- Chez un homme de 70kg, on retrouve **un pool de 120g de créatine** dont **95% stockés dans le muscle squelettique/lisse** dont **70 % sous forme de créatine phosphate (CP)**
(Le principal stockage de créatine est donc sous forme de créatine phosphate au niveau des muscles)
 - **50%** de la créatine provient de **l'alimentation** (viande/poisson)
- **50%** de la créatine provient de **la synthèse d'Acide aminés** dans les cellules du Foie et des Reins
 - **Produit de la dégradation** : **La créatinine** permet d'apprécier **la fonction rénale** et **reflète la masse musculaire**

• Créatine phosphate:

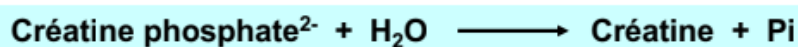
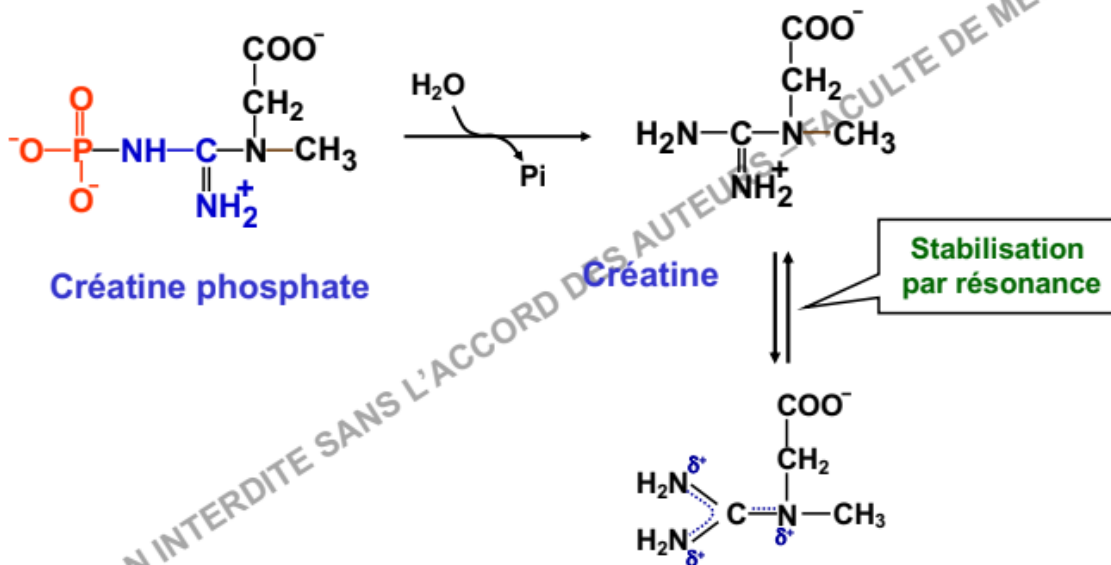


- une molécule de **glycine**, dont l'azote lie un **méthyl** provenant de la **S-adenosylméthionine (SAM)**
- un noyau **guanidinium** de l'**arginine**
- un **phosphate** → **la liaison riche en énergie** provient de l'ATP

La créatine phosphate est une molécule complexe, composé de trois parties :

- Phosphate
- Arginine
- Glycine

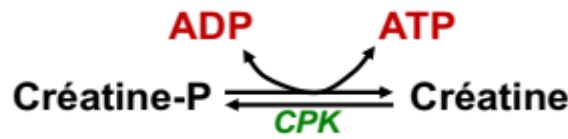
Réactivité de la créatine phosphate :



$$\Delta G^\circ = - 43,0 \text{ kJ/mol}$$

C) Les enzymes (CPK, AK) et la voie anaérobie-alactique

La Créatine Phosphokinase (CPK)



Caractéristique de la Créatine Phosphokinase :

- C'est une enzyme des vertébrés présente dans le **cerveau**, les **muscles** ainsi que le **cœur**
- Catalyse l'hydrolyse de la liaison riche en énergie et synthétise un **ATP en transférant directement l'énergie libérée (-43kJ/mol)** et le **phosphate sur l'ADP !**
- Cette réaction couplée ne libère que **-13kJ/mol** dans le milieu sous forme de chaleur

- C'est une réaction réversible :

Au repos

Le muscle est riche en ATP et stocke cette énergie sous forme de Créatine Phosphate

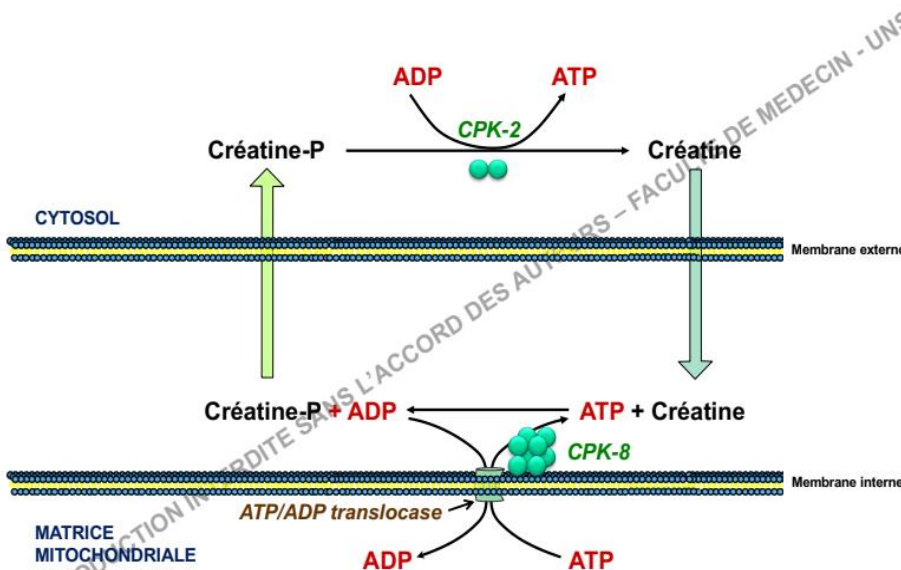
A l'effort

Le muscle est pauvre en ATP et/ou à besoin d'ATP, on va hydrolyser la Créatine phosphate afin de restituer l'énergie mise en réserve sous forme d'ATP

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

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

Explication du schéma :



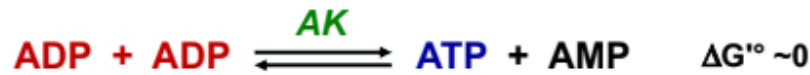
La **CPK-8** hydrolyse l'**ATP** provenant de la matrice mitochondriale pour transférer les **Pi** sur la **créatine**.

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

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



L'Adenylate Kinase / Myokinase (AK)

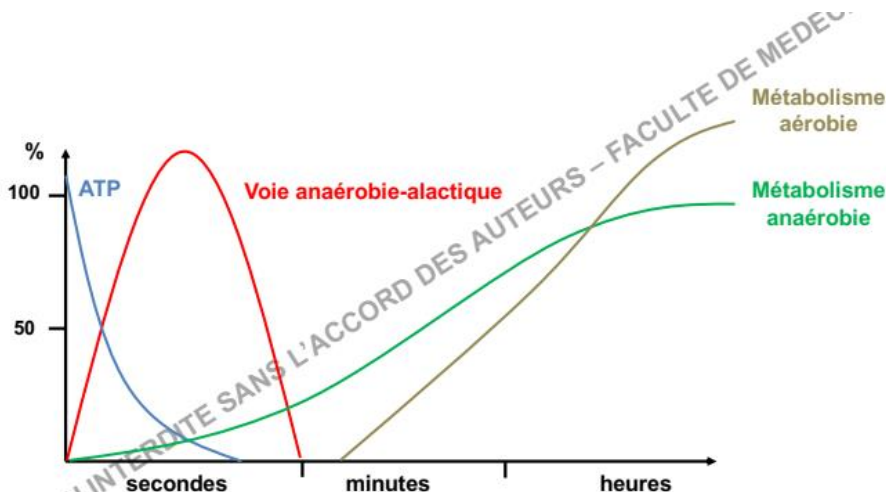
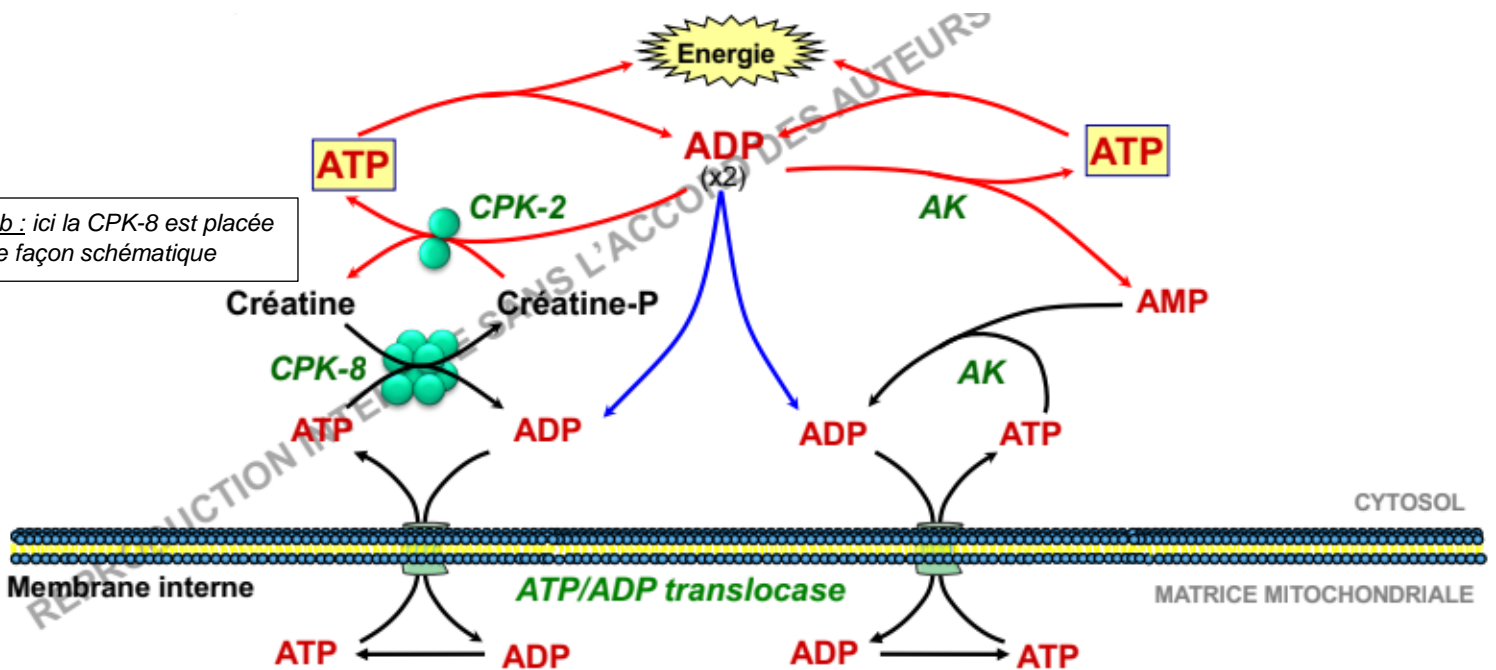


Caractéristique de l'Adenylate Kinase :

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

Avec l'interaction des ces deux enzymes, que ce soit la CPK ou l'AK, le muscle dispose d'une voie métabolique courte capable de fournir immédiatement de l'énergie. Cette voie ne requiert pas d'O₂ (elle est donc anaérobie) et ne fabrique pas de lactate (alactique). C'est donc la voie :

ANAEROBIE-ALACTIQUE

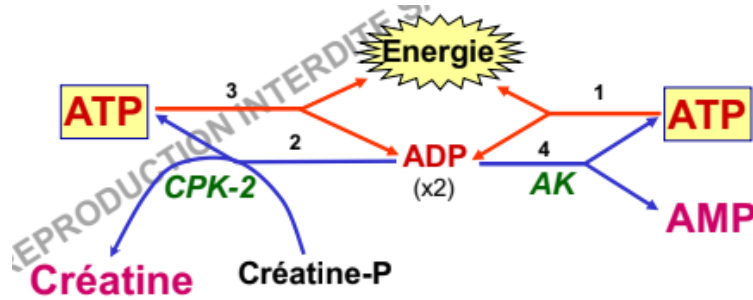


On peut voir que cette voie est mobilisée très rapidement (quelques secondes) mais s'épuise très vite pour laisser place au voies métaboliques classique anaérobies et aérobie

Tout l'intérêt de cette voie est la rapidité d'apport d'énergie lors d'un besoin soudain, on fait appel à notre stock d'ATP ainsi qu'à la voie anaérobie-alactique



Phase de début de l'effort :



1- L'ATP présent dans le cytoplasme est hydrolysé en ADP

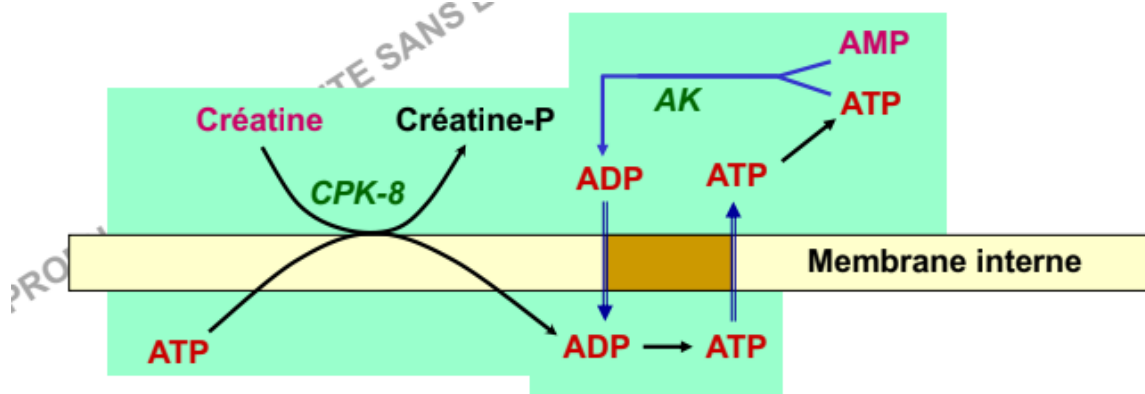
2- L'ADP est aussitôt rephosphorylé en ATP à partir de la créatine phosphate. Cette réaction est catalysée par la CPK-2

3- L'ATP formé s'hydrolyse de nouveau et reforme un autre ADP

4- Cet ADP peut céder une liaison riche à un autre ADP et former un ATP et un AMP. Cette réaction est catalysée par l'AK

Phase de récupération :

La cellule recharge la créatine et l'AMP en énergie à partir des ATP produits au sein de la mitochondrie.



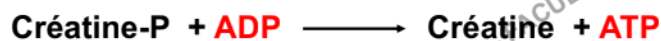
La CRM va phosphoryler les ADP et produire des ATP (cf. CRM).

Cet ATP va servir à rephosphoryler l'AMP en ADP grâce à l'Adénylate Kinase (AK).

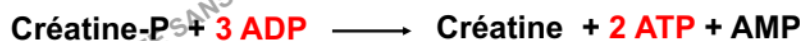
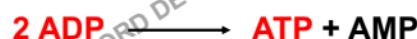
De l'autre côté, la CPK-8 va hydrolyser un ATP afin « d'activer » la créatine en créatine phosphate.

Bilan de la voie :

Créatine PhosphoKinase (CPK)



Adénylate Kinase (AK)

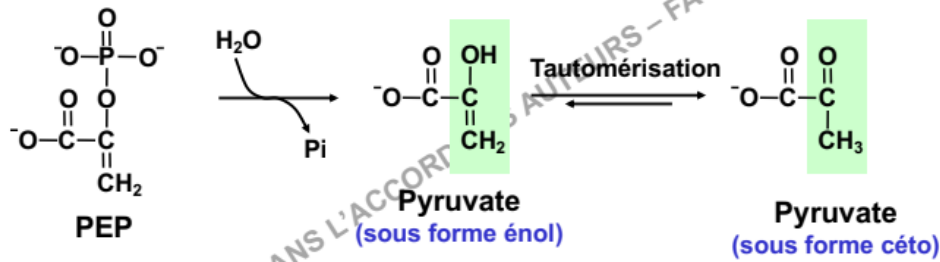


Grâce à ces deux voies orchestrées parfaitement et l'intervention de ces 2 enzymes, le muscle dispose donc de deux liaisons fortes en énergie rapidement !



Le phosphoénolpyruvate (PEP)

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



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

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

Transfert et stockage d'énergie

ATP, PPi, créatine phosphate

Transfert de groupement

(Agissent comme des coenzymes cf. enzymo)

ATP, Coenzyme-A, ACP (revu plus tard en métabo lipidique)

VI. Réactions d'Oxydo-réduction :

Dans les systèmes biologiques, le transfert du groupe phosphoryle est l'élément central du métabolisme et du transfert d'énergie.

Également, **le transfert d'énergie libre par transfert d'électrons** lors **des réactions d'oxydo-réduction** constitue le mécanisme réactionnel tout aussi important dans les systèmes biologiques !

Ces réactions se font par **un flux d'électrons** s'effectuant à l'aide de **transporteur d'électrons** jusqu'à l'oxygène moléculaire sachant que l'oxygène qui est **le plus fort accepteur d'électrons** en raison de sa très forte **électronégativité** (**agent oxydant intracellulaire** le plus puissant !).

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

Le **transfert d'électrons** d'une molécule (**donneur d'électrons**) vers une autre molécule (**accepteur d'électron**) peut se faire soit par :

- **Transfert direct d'électrons** → $\text{Fe}^{2+} + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Cu}^+$
- **Transfert via un hydrogène (H)** →
$$\begin{array}{l} \text{AH}_2 \longrightarrow \text{A} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \\ \text{B} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{BH}_2 \\ \hline \text{AH}_2 + \text{B} \longrightarrow \text{A} + \text{BH}_2 \end{array}$$
- **Transfert via l'ion hydrure (H⁻)**
- **Transfert via une réaction direct de l'oxygène**

**Petit point rappel d'un Oxydant et d'un réducteur :**

Un oxydant c'est une molécule qui va capter un ou plusieurs électrons provenant d'un réducteur.
Il subit la réaction de **réduction**.

Un réducteur est une molécule qui va perdre ses e⁻ et les envoyer à l'oxydant.
Il subit la réaction d'**oxydation**.

Lorsqu'on dit que l'on va **OXYDER** une molécule, cela signifie qu'on va **lui retirer ces électrons** !

Lorsqu'on dit que l'on va **REDUIRE** une molécule cela signifie qu'on va **lui rajouter des électrons** !

Exemple du NAD⁺/NADH+H⁺ :

On va prendre **une molécule X** qui va faire une réaction d'oxydo-réduction avec **le NAD⁺** en transférant son **H** :



Donc ici **la molécule X** est **le réducteur** car il va perdre un **H** et **le NAD⁺** c'est **l'oxydant** car il va capter le **H**.

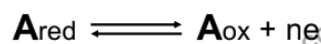
Ainsi on dit que **la molécule X** a été **OXYDÉE** (on a retiré ces électrons) alors que le **NAD⁺** a été **RÉDUIT** en NADH (on a rajouté des électrons) !

Si ce n'est pas clair → go sur le forum ☺

A) Potentiel d'oxydo-réduction :

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

Le potentiel redox est donné par la formule de **NERNST** :



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

E_A : potentiel redox du couple A_{ox}/A_{red} en Volt (V)

E_A[°] : potentiel redox standard (V)

R : constante des gaz parfaits (8,314 J/mol/°K)

T : température en degré Kelvin (°K)

n : nombre d'électrons échangés

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



Prix Nobel de chimie (1920)

Ce potentiel redox est super important car il va permettre de déterminer si une réaction peut se faire spontanément ou non !

En effet, seules les réactions d'oxydoréduction entraînant **une augmentation du potentiel redox (ΔE>0)** sont possibles spontanément !

Seules les réactions dont l'énergie libre (ΔG<0) baisse sont spontanées ! (rappel)



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

Il existe une relation entre les deux termes qui se démontre par cette équation :

Relation entre ΔG et ΔE



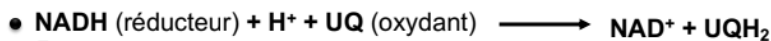
$$\Delta G = -nF\Delta E$$

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

A partir de cette équation on peut en déduire qu'une **réaction d'oxydoréduction se déroulant spontanément** entraîne :

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

Voici l'exemple donné par le prof en cours :



Deux demi-réactions avec potentiel redox pour analyser changement d'énergie



• Relation entre ΔE et ΔG

ΔE : Dans réactions spontanées les e⁻ sont donnés par la demi-réaction ayant le potentiel redox le plus négatif et sont acceptés par celle ayant le potentiel redox le plus positif

$$\Delta E = \Delta E (\text{accepteur}) - \Delta E (\text{donneur}) \quad \Delta E = +0,045 \text{ v} - (-0,320 \text{ v}) = +0,365 \text{ v}$$

$$\Delta G = -nF\Delta E = -70,43 \text{ kJ/mol}$$

Ici vous pouvez voir avec la formule que plus la différence entre les potentiels redox (ΔE) est élevée, plus l'énergie libre (ΔG) libérée par la réaction d'oxydoréduction sera forte !

FIN

Voilà C'est la fin de ce loonnnnnng cours 😊, la préparation de la fiche a duré plus longtemps que prévu sorry... Mais sinon tout y est ! N'hésitez pas à me dire si vous aimez ou pas ce format de cours, (Fiche de cours tut > roneo) ou pas du tout xD. En tout cas c'est toujours mieux de réviser en couleur non ? 😊 Petit instant dédié 😊 : A la grosse team des moula qui défonce tout là ! Même si au tut ce n'est pas ouf ! N'oubliez pas que le principal c'est d'être chaud le jour J ! Donc Aicha, Carocaca et Moulak vous donnent tout !! Aussi grosse dédicace à NoémiToz <3 (c'est elle qui a choisit le surnom xD) qui m'as beaucoup aidé sur cette fiche (pour les fautes et la mise en page xD). Enfin aussi à toi qui lit cette dédicace avant même de commencer le cours 😊 ce n'est pas bien mais tout le monde le fait 😊 Vous êtes les meilleurs les GARS ! Si vous avez un souci ou n'importe quoi, n'oubliez pas qu'on est là pour ça ! Donc envoyez nous des petits messages, on sera ravi de vous aider avec toute la team du TUTORAT 😊 Allez bisous à tous ^^