

Coucouuuu ! Elle est là, un chouilla longue mais elle est bien là. La fiche complète est très longue je vous l'accorde, mais il faut surtout faire des QCMs sur ce cours, ça rentrera tout seul promis ! OK c'est pas le cours le plus passionnant de la matière mais je suis désolée pour vous il faut un peu y passer... Ce qui est nouveau commence à la page 12 mais lisez le cours entier tant qu'à faire ahah. Dernier aparté avant de commencer le cours, je sais que ça commence à être dur et que la motivation est pas toujours au rendez-vous. Il va commencer à faire froid, moche et pour certains (voire beaucoup) vous allez commencer à chopper les virus d'hiver (jpp je crache mes poumons je compatis avec vous)... En bref je sais que ça commence à être dur mais c'est là que vous allez le plus progresser parce que c'est la discipline qui commence à s'ancrer. Vous allez pas le voir de suite, vous allez avoir l'impression de stagner, mais c'est NORMAL. C'est normal si les notes en QCMs sont moyennes. Continuez surtout de prendre des pauses pour pas vous épuiser, tombez pas dans un cercle vicieux de fatigue svp ! Sur ce bon courage, on se retrouve à la fin !

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 gèrent la matière et l'énergie pour maintenir l'organisme en vie. Il comprend :

- Le **CATABOLISME +++** : dégradation
 - L'**ANABOLISME +++** : biosynthèse
- C**atabolisme : tu **C**asses les liaisons = dégradation*

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

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).

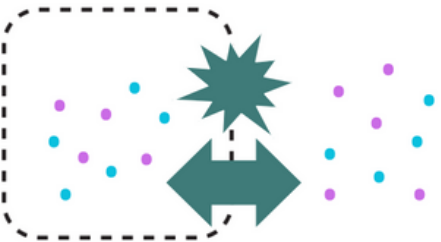

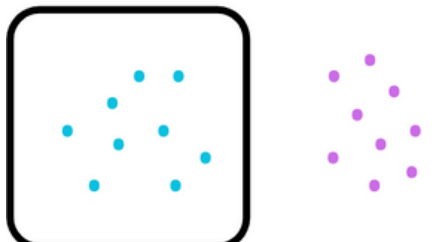
Ainsi :

- 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 *ça c'est super giga ultra +++ important les zouzous*

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> 

NE PAS CONFONDRE SYSTÈME ISOLÉ ET FERMÉ +++

#CriePasOnACompris

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

3. 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 :

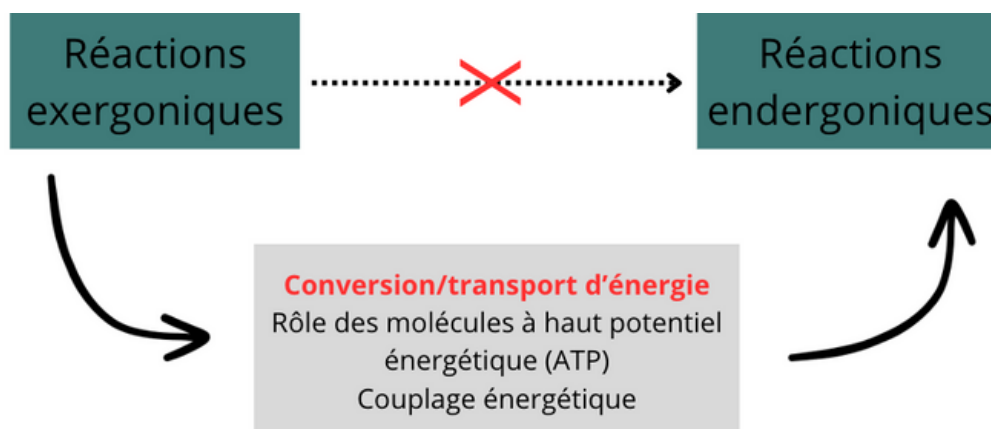
- La dégradation des aliments (polysaccharides, protéines, lipides) pour en extraire l'énergie par rupture des liaisons chimiques = correspond au **CATABOLISME**.
- La conversion de l'énergie dans les formes de stockage et de transfert biologiquement utilisables où l'ATP (Adénosine TriPhosphate) joue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

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.

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 donc 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**



5. Métabolisme = Anabolisme + Catabolisme

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

- Ces macromolécules sont dégradées en unités de base, elles-mêmes dégradées en intermédiaires métaboliques et énergétiques.
- Au final, sont produits de l'**eau** (H_2O), du **CO₂** et de l'**ammoniac** (NH_3), avec **libération d'énergie**.

L'ensemble correspond au **CATABOLISME**

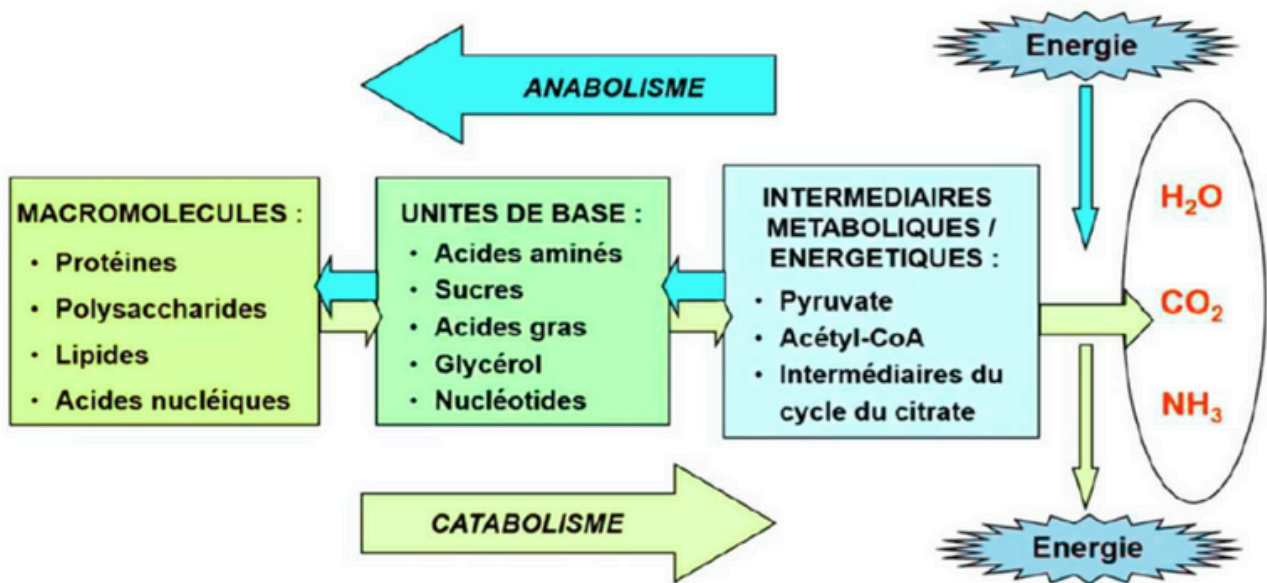
Dans le sens inverse, la production de **macromolécules** à partir de **molécules simples**, en utilisant l'énergie libérée, correspond à l'**ANABOLISME**.

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

Tut'explique :

*Là c'est peut être un peu vague si t'en es à tes premières lectures. On va prendre l'exemple de quelque chose que l'on va manger (à l'heure où j'écris cette fiche j'ai très envie d'un poké alors qu'on est un big 13 août à 15h37 donc on va prendre l'exemple du poké #RacontePasTaVie). La nourriture que tu ingères constitue les **macromolécules** (vrmt une fois que t'as mâché avant que tout ne se transforme). Ces macromolécules, comme leur nom l'indique sont grosses, trop grosses pour être assimilées par ton organisme. Donc ton corps va devoir les couper pour lui permettre de distribuer les nutriments et l'énergie nécessaire à tes organes. Donc le big saumon de mon poké va être constitué de protéines, polysaccharides, lipides etc... qui vont être réduits en unités de base (donc en acides aminés, sucres, acides gras etc...). Et ces unités elles mêmes seront dégradées en des intermédiaires métaboliques comme le pyruvate, l'acétyl CoA etc... qui donneront de l'eau, du CO₂, du NH₃ et de l'énergie. Et là ton corps peut distribuer l'énergie nécessaire. Tout ça constitue le **catabolisme**, c'est quand t'as besoin de dégrader les macromolécules. Et donc tu comprends bien que l'anabolisme fait tout l'inverse.*

Métabolisme = Anabolisme + Catabolisme



Les acides nucléiques contribuent très peu au bilan énergétique +++

II. Bioénergétique et thermodynamique

1. Généralités et définitions

Pour comprendre les voies de fonctionnement des voies « métaboliques, il faut donc les relier aux lois de la thermodynamique.

- 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 mêmes.
- La bioénergétique n'est rien d'autre que l'application de ces lois aux réactions biochimiques.

⇒ **Énergie : toute forme de travail et de chaleur**

⇒ **Entropie : degré de désordre ou de hasard**

++++

- 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**

- Second principe

« 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 +++**

2. Relation de GIBBS

- Relie la variation d'énergie libre, l'enthalpie et l'entropie.
- Permet de faciliter l'utilisation des 2 principes de la thermodynamie.
- La variation de l'énergie libre permet de définir la direction et l'importance de la réaction chimique.

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

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.

Ainsi, on différencie 3 états du système :

<u>Equilibre</u>	Le système ne peut plus fournir de travail : $\Delta G=0$
<u>Instable</u>	Réaction spontanée : $\Delta G<0$: réaction exergonique
<u>Nécessitant un apport d'énergie</u>	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 ordinaires (*vu juste après*).

- Permet de calculer la constante d'équilibre K_{eq} .
- ΔG caractérise l'état d'équilibre : existe quand la concentration initiale de A atteint sa concentration à l'équilibre, et de même pour B.

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**
- Température de **25°C**
- Pression constante de **1 atm**

III. Bioénergétique et métabolisme

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

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 :

- 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 étant que le $\Delta G'$ cumulé est négatif (< 0) (*En gros réaction seule = impossible, réaction + ATP = possible*).

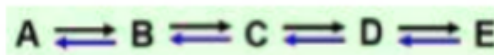


Enzyme (hexokinase I à IV)

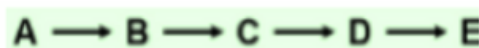
2. Etat d'équilibre et stationnaire

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 :

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



- **État stationnaire** : seules les concentrations de B, C et 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.

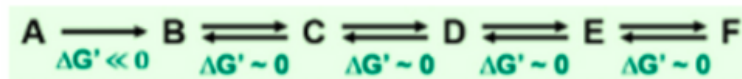
Loi de Lechatelier : « Toute modification d'un facteur d'un équilibre chimique réversible provoque, si elle se produit seule, un déplacement de l'équilibre dans un sens qui tend à s'opposer à la variation du facteur considéré » +++

Tut'explique :

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.

On va prendre l'exemple d'un élastique parce que ça parle bien. Plus tu tires un élastique, plus il va forcer pour revenir à son état de "repos", l'élastique agit alors contre la force exercée. Et bah ici c'est exactement la même chose. Si l'un des facteurs d'une réaction change, le système chimique va réagir pour essayer de contrebalancer ce changement.

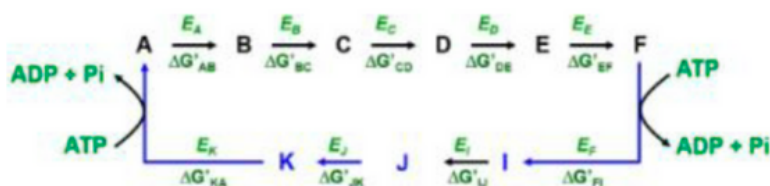
« Déplacement de l'équilibre » signifie que la réaction va se modifier pour favoriser soit la production des réactifs, soit celle des produits.



- A→B est une réaction irréversible dû 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 physiologiques, elles le sont. +++



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

Afin de n'avoir au même moment qu'une seule voie active et pas toute les voies qui fonctionnent dans tous les sens, les enzymes de chacune des voies sont régulées de façons opposées.

IV. Molécules impliquées dans la bioénergétique

L'énergie est stockée dans les liaisons entre deux atomes.

Pour libérer cette énergie, il faudra casser ces liaisons.

Les liaisons riches en énergies sont regroupées dans le tableau.

Celles qu'on retrouve le plus sont les **liaisons phosphoanhydrides entre 2 phosphates**.

Les liaisons riches en énergies 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	$\text{R}-\text{NH}-\overset{\text{NH}}{\underset{\text{O}}{\text{C}}}-\text{NH}\sim\text{P}$	Créatine Phosphate
PHOSPHOANHYDRES	$\text{R}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{O}^-}{\text{P}}}-\text{O}\sim\overset{\text{O}}{\underset{\text{O}^-}{\text{P}}}-\text{O}\sim\overset{\text{O}}{\underset{\text{O}^-}{\text{P}}}-\text{O}$	XTP et XDP (X = A, G, C, U)
ACYL-PHOSPHATES	$\text{R}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{O}}{\text{C}}}-\text{O}\sim\text{P}$	1,3 diphosphoglycérate
ENOL-PHOSPHATES	$\text{R}-\overset{\text{CH}_2}{\underset{\text{O}}{\text{C}}}-\text{O}\sim\text{P}$	Phosphoénolpyruvate
ACYL-THIOESTERS	$\text{R}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{O}}{\text{C}}}-\text{S}\sim\text{CoA}$	Acétyl-CoA

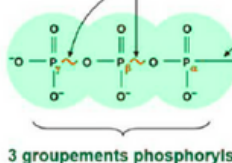
1. Généralités sur l'ATP

Adénosine TriPhosphate (ATP)

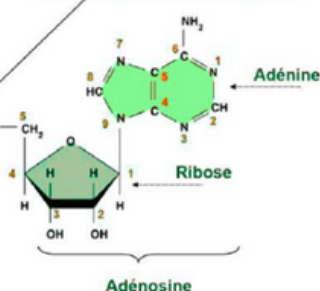
Molécule à haut potentiel énergétique

FORMULE

Liaisons type **phosphoanhydride** :
liaisons "riches" en énergie



Liaison type **phosphoester** :
liaison "pauvre" en énergie



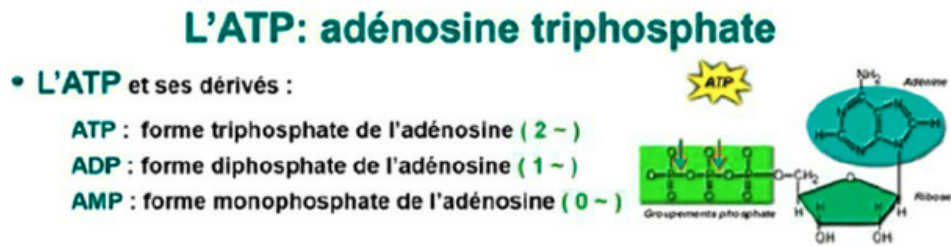
Dans l'ATP, on retrouve :

- Une liaison du phosphate α sur le ribose de type **phosphoester**, **pauvre en énergie**.
- Deux liaisons au niveau des phosphates distaux, β pour le deuxième et γ pour le troisième : des liaisons **phosphoanhydrides**, **riches en énergie**.

C'est l'hydrolyse de l'ATP au niveau des groupes phosphates β et γ 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 45kg par jour.**



2. Hydrolyse de l'ATP

L'ATP contient **2 liaisons phosphanydrides riches en énergie (β et γ)** qui peuvent être hydrolysées.

L'hydrolyse de l'ATP au niveau du phosphate γ libère une molécule d'ADP et du phosphate inorganique. Ensuite l'ADP peut être hydrolysé pour donner de l'AMP.

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 : -32Kj.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^{2+} à une molécule d'ATP le stabilise et facilite la libération/le transfert d'énergie.

3. Formation de l'ATP

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

Synthèse de novo à partir d'acides puriques	Synthèse à partir de la transformation de l'ADP en ATP
<p>Le ribose 5-P contribue à la synthèse de l'Inosine Triphosphate (IMP), précurseur de l'AMP et du GMP.</p> <p>L'AMP est ensuite converti en ADP puis en ATP, de même pour le GMP. <i>(on verra ça + tard)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - 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). - Par l'adénylate kinase -> réactions essentiellement utilisées par le muscle strié.

4. D'autres molécules riches en énergie

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

a) Créatine Phosphate

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**

Sources :

- **Alimentation** (viande et poisson) : **50%**
- **Synthèse** dans le foie et les reins à partir d'acides aminés : **50 %**

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

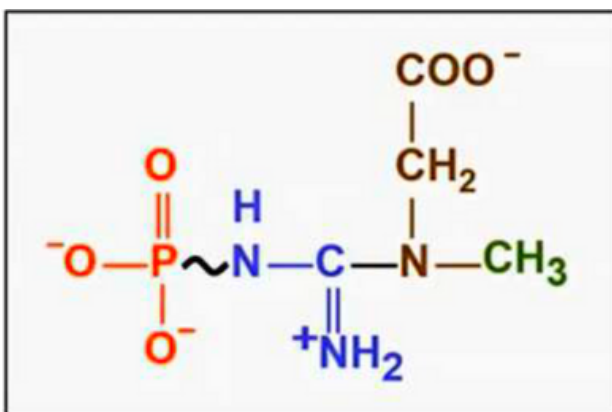
La **créatine** est dégradée en **créatinine** au niveau des reins est éliminée par **excrétion urinaire**.

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.

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

Structure de la créatine phosphate :

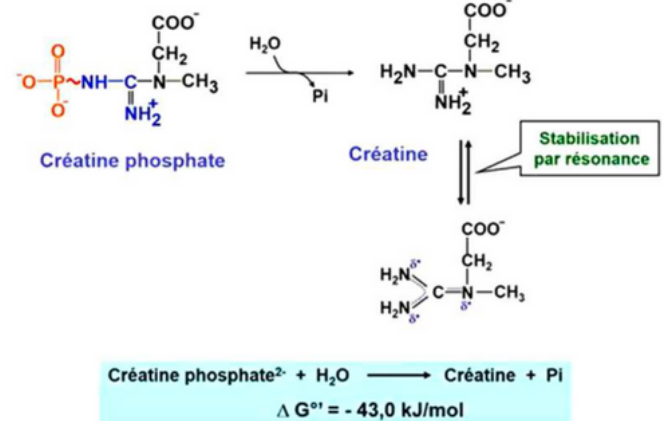


- Une molécule de **glycine**, dont l'azote lie un **méthyl** provenant de la S-adénosylméthionine (SAM)
- Un noyau **guanidinium** de l'**arginine**
- Un **phosphate** --> **la liaison riche en énergie** provient de l'ATP

Le phosphate est attaché à la créatine par une liaison **amidine** riche en énergie.

Hydrolyse de la créatine phosphate : réaction très **exergonique** (libère 43 kJ/mol)
Elle donne lieu à une molécule de créatine et une molécule de phosphate.

Formule et réactivité

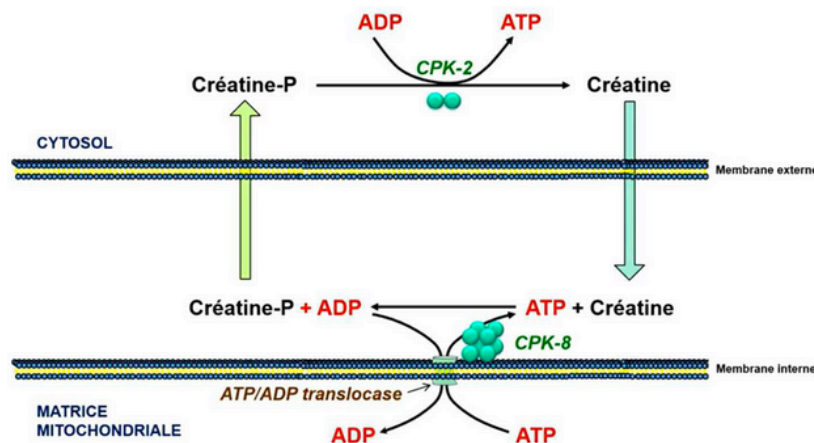


b) Créatine Phosphokinase (CPK)

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



Le ΔG° 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 ΔG° 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 **créatine phosphate** restitue sous forme d'**ATP** l'énergie mise en réserve (sens 1)
- **Riche en ATP** : (muscle au 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 (*attention partie importante +++*) :

- **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 :

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 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.

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 $\Delta G_0'$ 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

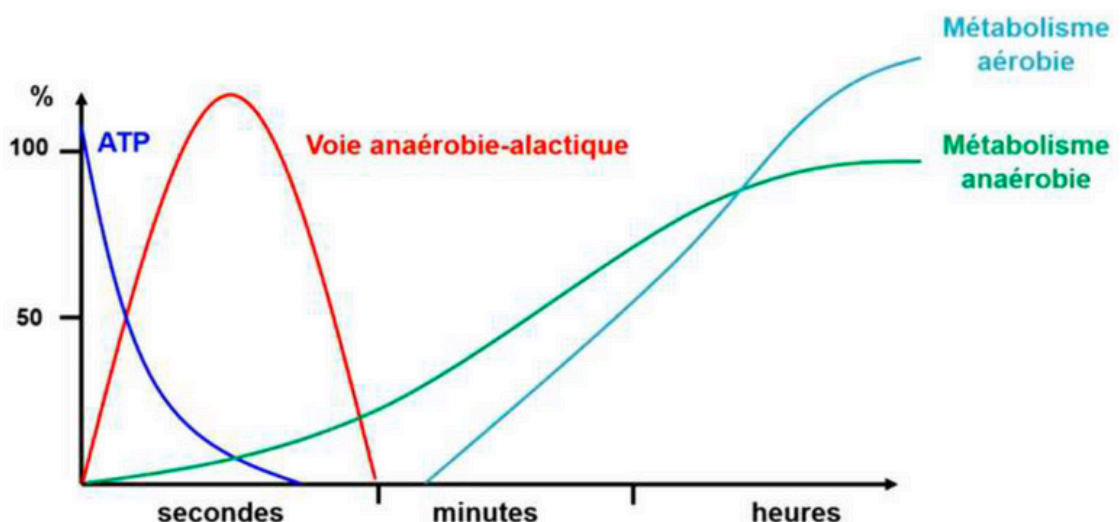
La synergie entre la créatine phosphokinase et l'adénylate kinase offre au muscle une voie métabolique courte, capable de fournir immédiatement de l'énergie utilisable pour l'effort ++++++ (supeeeeer important ça).

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

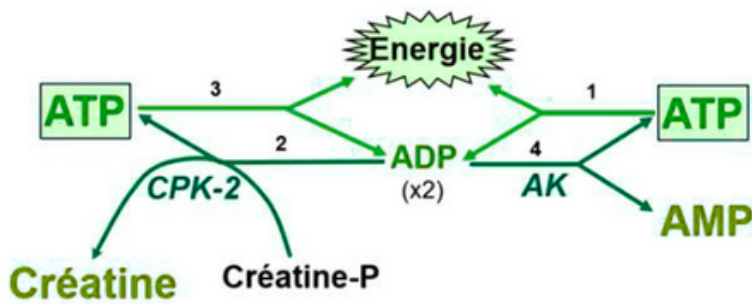
Quelles sources d'ATP sont utilisées au cours du temps lors d'un travail musculaire ?

- 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 **métabolisme aérobie et anaérobie produisent de l'ATP** pour la contraction musculaire

Energie et travail musculaire : sources d'ATP



d) Voie anaérobie-alactique



Créatine et AMP formés --> produits métaboliques de la voie

Au niveau biochimique on a deux phases durant un effort musculaire :

Au début de l'effort, et 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) **Deux** molécules d'**ADP** grâce à l'**adénylate kinase** donnent lieu à une molécule d'**ATP** et d'**AMP**

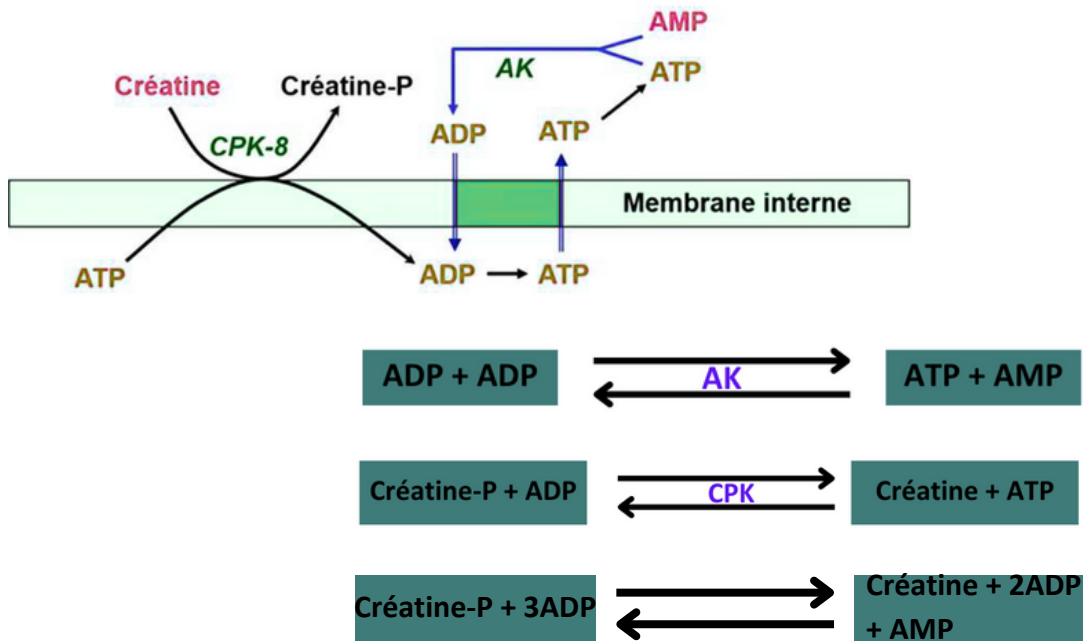
- **Phase de récupération :**

La cellule recharge la **créatine et 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**.

Tut'explique :

Mais on est en anaérobie, pourquoi on parle d'ATP mitochondrial ??? C'est normal don't worry (be happy), l'ATP mitochondrial a été synthétisé au PREALABLE quand on était en situation aérobie donc c'est pour ça qu'on retrouve cet ATP dans cette voie



- 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	Phosphoenolpyruvate
<ul style="list-style-type: none"> • 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 	<ul style="list-style-type: none"> • Liaison énoI-phosphate • Son hydrolyse est particulièrement exergonique et donne lieu à la formation de pyruvate • Il existe un équilibre en les formes énoI et céto du pyruvate • Libération de 61,9 kJ/mol
<p>Acétyl-CoA + H₂O → Acide acétique + CoA-SH $\Delta G^\circ = -32,2 \text{ kJ/mol}$</p> <p>Acide acétique → Acétate + H⁺ (Stabilisation par résonance)</p>	<p>PEP + H₂O → Pyruvate + Pi $\Delta G^\circ = -61,9 \text{ kJ/mol}$</p> <p>Pyruvate¹⁻ (sous forme énoI) ↔ Pyruvate (sous forme céto) (Tautomérisation)</p>

f) Réaction d'oxydoréduction

Réactions d'oxydoréduction dans le métabolisme énergétique des systèmes biologiques :

Réactions d'oxydoréduction dans le métabolisme énergétique des systèmes biologiques :

- Le transfert de groupe phosphorylé --> 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** : autres mécanisme réactionnel tout aussi important dans les systèmes biologiques
- L'**oxygène** est le **plus fort accepteur d'électrons** en raison de sa très forte électronégativité (capacité à attirer les e⁻) : **agent oxydant intracellulaire** le plus puissant
- Dans les systèmes biologiques, les **flux d'électrons** s'effectuent par l'intermédiaire de **transporteur d'électrons** jusqu'à l'oxygène moléculaire
- Ce transfert génère une **force électromotrice** qui sera utilisée pour diverses réactions de transduction d'énergie

g) Potentiel redox

Réactions d'oxydoréduction

- Les oxydations cellulaires : suites de réactions mettant en jeu des hydrogènes et/ou des électrons (e⁻)

L'accepteur final des **hydrogènes** ou des **électrons** est l'**oxygène**

- On distingue : **oxydation** = perte d'hydrogènes ou d'électrons
réduction = gain d'hydrogènes ou d'électrons

Mais les 2 sont toujours liées d'où "réactions d'oxydoréductions"

- 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**

Réactions d'oxydoréduction dans le métabolisme énergétique des systèmes biologiques

Le transfert d'électrons d'une molécule (donneuse d'électron) vers une autre molécule (accepteuse d'électron) 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 hydrure**

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

Potentiel d'oxydoréduction

- Définition : L'aptitude d'un composé à perdre ou recevoir des électrons est caractérisée par son potentiel redox (E) qui est une force électromotrice.
- Couple redox : comprend forme oxydée et forme réduite d'un même composé.



- Formule de NERNST pour calculer le potentiel redox du couple redox A :

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

E_A :	potentiel redox du couple Aox/Ared en Volt (V)	<i>(Entre nous en bioch on s'en fout complètement des formules donc laissez ça de côté)</i>
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)	

Il est important de pouvoir mesurer l'**aptitude d'un composé à perdre ou à recevoir des électrons**. Cette **aptitude** est caractérisée par le **potentiel d'oxydoréduction**, aussi appelé potentiel redox «E» d'un couple redox

- Ce potentiel représente une **force électromotrice**
- Un **couple redox** comprend la forme **oxydée** et la forme **réduite** d'un même composé
- Grâce à la formule de Nernst, on peut calculer le potentiel redox E du couple A *(qu'on vous demandera pas de calculer bien entendu)*

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

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

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

Donc là c'est l'inverse que pour le ΔG. Quand ΔG<0 ou ΔE>0 (pour réaction redox), réaction spontanée. Quand ΔG>0 ou ΔE<0, nécessite de l'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 du potentiel redox ($\Delta E > 0$) sont possibles spontanément

- Relation entre ΔG et ΔE



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

- Une variation du potentiel redox positive ($\Delta E > 0$) *#Y'aBcpTropDeRépétitionsDansCeCours*
- Une variation d'énergie libre négative ($\Delta G < 0$)
- Les potentiels redox sont utiles pour les biochimistes car ce potentiel permet de calculer le ΔG (=la variation d'énergie libre) donc de **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 :

$\Delta E > 0$, et une variation d'énergie négative $\Delta G < 0$

Allez, va prendre une pause là c'est mérité +++

Les déiiiiis

Dédi à la P2 parce ça VAUT 100% le coup d'avoir bossé 2 ans

Dédi à Charlotte qui est la fille la plus solaire que je connaisse et une marraine INCROYABLE (ses piercings omg)

Dédi à Anaëlle parce qu'elle est trop belle (waw ça rime en plus) et parce que nos CTs sont beaucoup trop incroyables en fait. Dédi à ta frange parce qu'on en parle beaucoup mais elle a son succès !!

Pas dédi à mes bronches qui m'empêchent carrément de dormir la nuit

Dédi à Enzo Chantal de la compta (Enzosmole), je vous jure il fait tout pour vous les P1 j'en suis témoin dès qu'il a du temps libre il vous fait des fiches/DM incr ! Bon pas que il fait parti des clowns du tut lui aussi... (on parlera pas du fait que ça te fasses rire quand j'essaie de tousser en silence...)

Dédi à Enzo (encore mdr), Alicia, Sofia, Yacine, Noémie et Agathe qui ont passé 3h à ausculter mes poumons ptdrr

Pas du tout dédi à Mathys le vieux fossile d'embryo qui m'a jeté un mille-pattes dessus qu'il est allé récupérer sur un mur... Mais bon, au fond il est incroyable même si c'était pas si drôle que ça

Dédi à Mathis (Diabethis) que j'ai humilié au bras de fer à Pasteur (bon en vrai j'ai utilisé mes deux bras + le poids de mon corps tout entier parce que sinon il va râler)

Dédi à Matisse (Matisticule), que tu flop ou pas tu fais parti des clowns de la promo et ça c'est non négligeable pour conserver ma bonne humeur

Finalement dédi au Mathisverse, y'en a pas un pour rattraper les autres mais quand ils sont réunis on peut pas les louper

Dédi à Clément Véronique Pique-Nique (Clémendocyte) qui imite tellement à coeur les accents qu'il arrive même plus à le perdre quand il s'agit de parler aux profs...

Dédi à tous ceux qui mettent la cam en buv (Ayaorte, Conseiller du prefet zbok (jamais plus long ptdrr), dr54, Julian, Meissa, si y'en a d'autres venez m'engueuler j'ai oublié de screen qui était en cam)

Dédi à toute la team du tutorat qui est une famille de rêve, je vous jure que si vous êtes intéressés foncez l'année prochaine parce que c'est l'aventure la plus humaine (et la plus drôle) de toutes mes études

Cette dédi est BEAUCOUP TROP LONGUE c'est n'importe quoi, la suite sera dans une autre fiche et dans les DMs mdr