

THEME 3B - Contraction musculaire et apport d'énergie

Classe : Terminale SPECIALITE SVT
Durée conseillée : 3 semaines
Nombre de TP : 3

En rouge : Bilans à faire noter aux élèves
En bleu : Activités pratiques
En vert : Problématique et hypothèses



Chapitre 2 : La production d'ATP dans les cellules

INTRODUCTION :

Les cellules d'un organisme humain consommeraient environ 50 kg d'ATP (Adénosine TriPhosphate) par jour. Pourtant, dans chaque cellule, la quantité d'ATP serait seulement de l'ordre de quelques nanogrammes (1 à 10 mmol/L). Il est donc crucial pour les cellules de produire en permanence de l'énergie sous forme d'ATP afin de pouvoir réaliser les travaux cellulaires mécaniques (contraction musculaire) ou chimiques (réactions métaboliques) ou même ioniques (potentiel d'action et transfert des ions Na^+ et K^+).

Problématique : Comment les cellules produisent-elle de l'énergie sous forme d'ATP dans des conditions aérobies ou anaérobies ?

Ce chapitre sera donc traité en 3 parties :

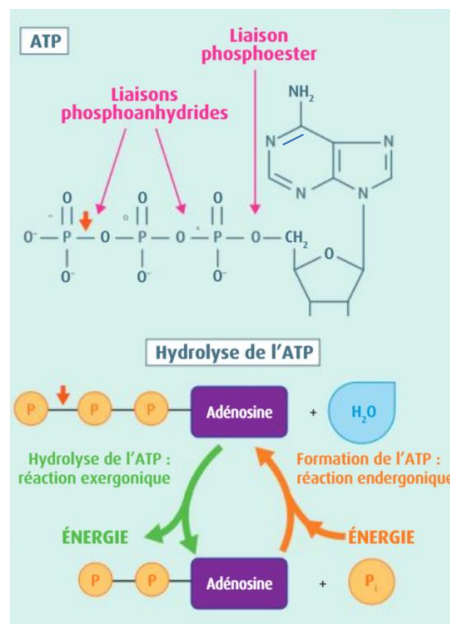
- 1- La glycolyse et les fermentations réalisées dans le cytoplasme (Anaérobiose)
- 2- La respiration cellulaire au sein de la mitochondrie (Aérobiose)
- 3- Les effets de l'entraînement et du dopage

TP2 : La production d'énergie dans les cellules

I. Les réactions anaérobies : glycolyse et fermentation

1. L'ATP, une molécule énergétique (doc 4 p428)

L'ATP (Adénosine Tri Phosphate) est une molécule énergétique qui est composée d'Adénosine (nucléotide de l'ADN) associé à 3 groupements phosphate (P). L'ATP peut être hydrolysé (dégradé) pour former de l'ADP + P_i (Phosphate inorganique : c'est le groupement phosphate qui a été clivé). Or, la liaison entre les groupements phosphate 2 et 3 est très énergétique : elle produit 30,5 kJ par mole d'ATP. Ainsi, la plupart des travaux cellulaires sont associés (couplés) à l'hydrolyse de l'ATP.



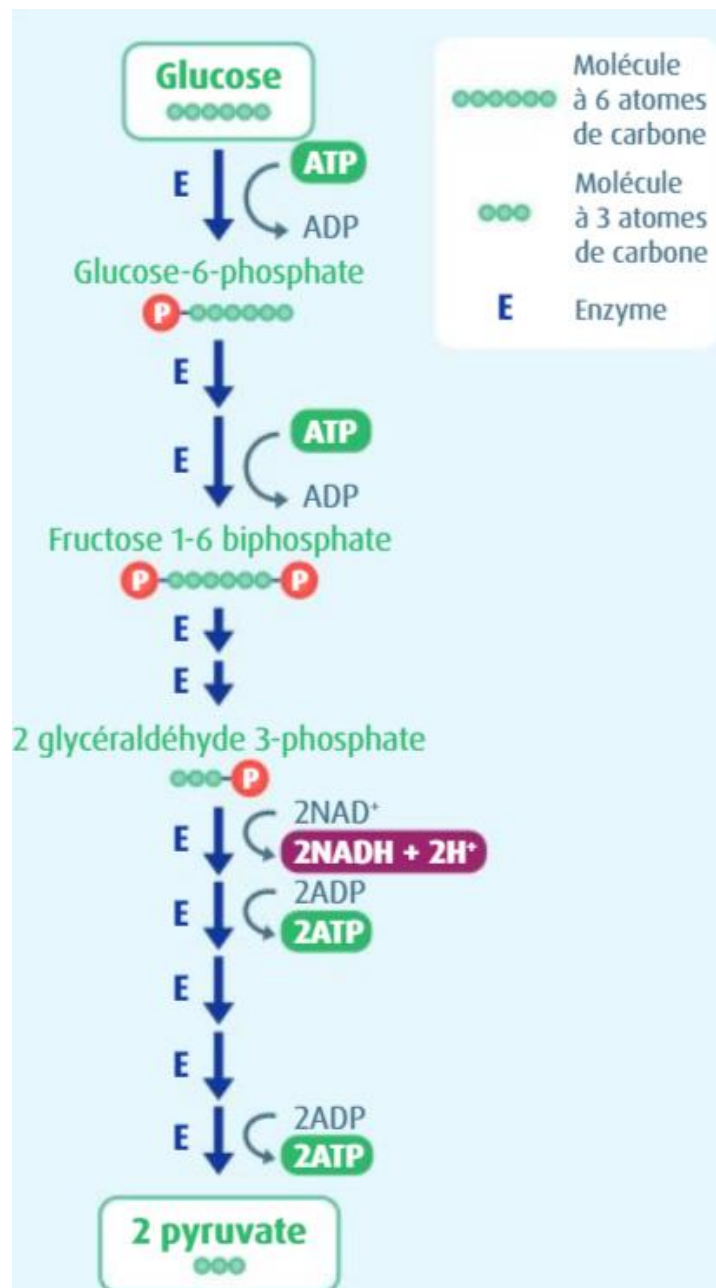
Document 1 : Formule chimique de l'ATP et énergie d'hydrolyse (BELIN doc 4 p428)

2. La dégradation du glucose : la glycolyse

Dans les années 1930, plusieurs scientifiques (Meyerhof, Embden et Lohmann) comprennent que le glucose est utilisé au sein de la cellule pour produire de l'ATP. Ils décrivent alors la glycolyse : c'est une série de 10 réactions chimiques qui permettent de transformer le glucose (glucide à 6 carbones) en 2 pyruvates ou acide pyruvique (molécule à 3 carbones).

Cette réaction correspond à une oxydation du glucose qui permet de produire 4 ATP. Néanmoins, 2 ATP sont consommés au début de la voie, si bien que le bilan global de la glycolyse est de +2 ATP.

D'autre part, cette voie métabolique produit également du NADH, H⁺, un accepteur (transporteur) d'électrons (e⁻) et d'ions H⁺. Le NAD fait partie des coenzymes, proches des composés R/RH₂ produits au cours de la photosynthèse (voir THEME 2A). Ces composés ont pour fonction de prendre en charge les ions H⁺ et électrons et constituent des couples rédox, nécessaires aux réactions du métabolisme.



Document 2 : Schéma simplifié de la glycolyse (BELIN doc 5 p433)

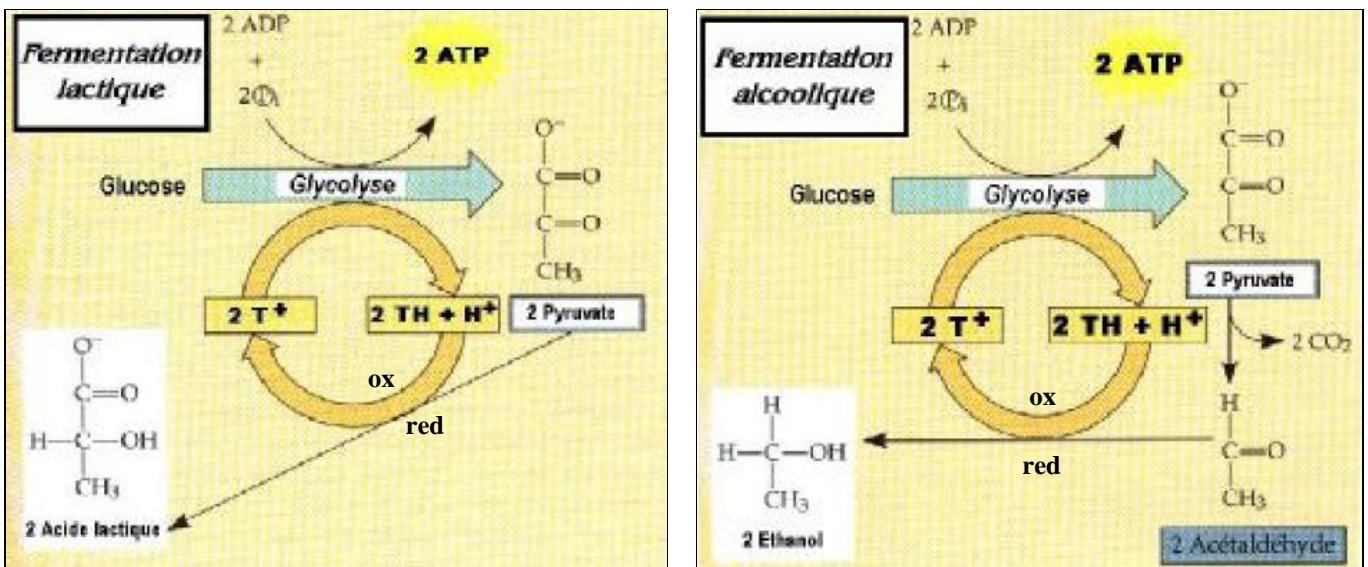
3. La fermentation lactique

En cas d'accumulation de pyruvate ou de NADH, H⁺, la glycolyse risque de s'arrêter (blocage des enzymes par accumulation de leur substrat). En absence de dioxygène (O₂), le pyruvate est alors réduit en acide lactique, ce qui permet en parallèle de d'oxyder le NADH, H⁺ en NAD⁺. Ceci est nécessaire pour pouvoir accepter les électrons et ions H⁺ issus du glucose.

Cette réaction correspond à la fermentation lactique. Elle a lieu dans le cytoplasme de nombreuses cellules (cellules musculaires, bactéries, certains champignons ...). Au sein strict, la fermentation ne produit pas d'ATP et le bilan est donc de 2 ATP (provenant de la glycolyse) par molécule de glucose.

Remarque 1 : La production d'acide lactique a tendance à être associée aux courbatures, ce qui est partiellement vrai. Les courbatures naissent des microlésions du muscle. Celles-ci sont rendues plus douloureuses en présence d'acide lactique.

Remarque 2 : il existe d'autres voies métaboliques anaérobies de type fermentation, en particulier la fermentation alcoolique (éthanolique). Cette dernière est réalisée par les levures. Elle permet également la ré-oxydation du NADH, H⁺ et l'utilisation du pyruvate pour ne pas bloquer la glycolyse.

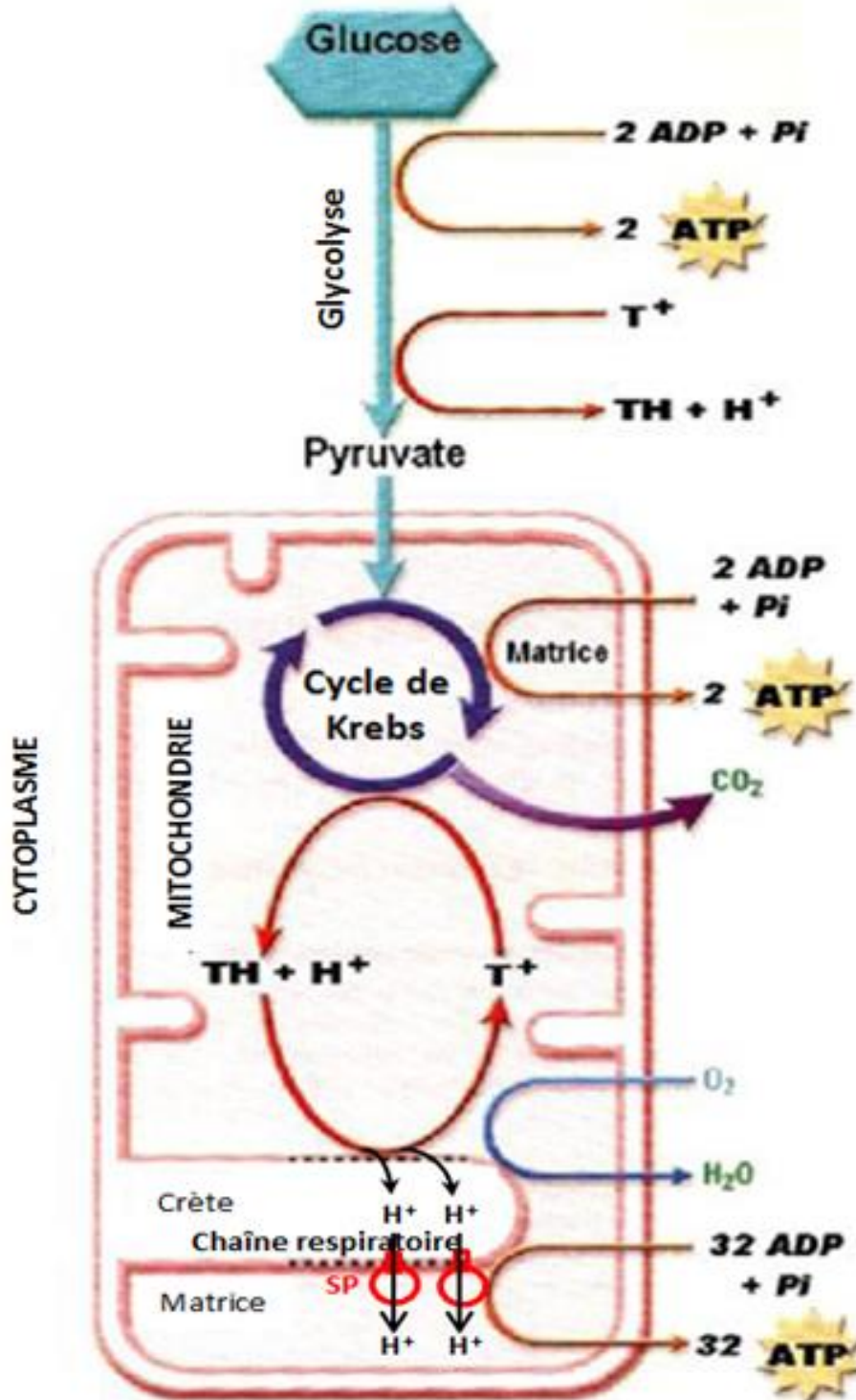


Document 3 : Schéma simplifiés des fermentations lactique et éthanolique (T = NAD)

II. La production d'ATP en condition aérobie : la respiration cellulaire

1. L'utilisation du pyruvate par la mitochondrie

En présence de dioxygène (O_2), le pyruvate sera pris en charge par la mitochondrie qui va alors réaliser la respiration cellulaire. Celle-ci se passe en 2 temps : le cycle de Krebs qui produit 2 ATP et la chaîne respiratoire qui produit 32 ATP. La production d'ATP de la respiration cellulaire est donc de 34 ATP, ce qui porte donc le bilan à 36 ATP produits par molécule de glucose. Cette réaction est donc très rentable au niveau énergétique.



SP = Sphères pédonculées (ATP Synthase)

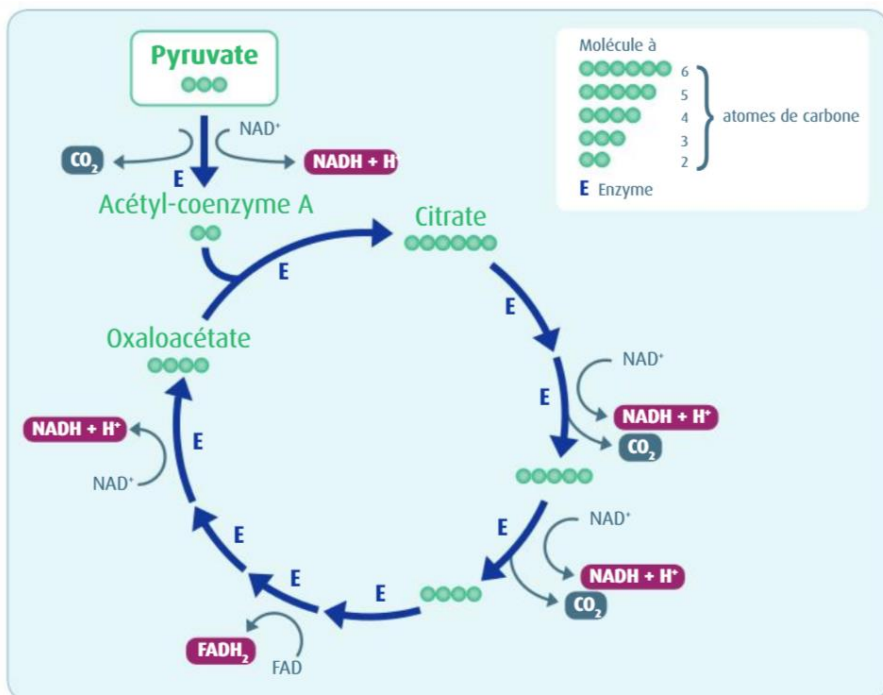
T^+ = NAD^+ (oxydé) / $TH + H^+$ = $NADH, H^+$ (réduit)

Document 4 : Schéma de la glycolyse et des phases de la respiration cellulaire

2. La dégradation du pyruvate par décarboxylation oxydative (doc 5 p435)

La première phase de la respiration cellulaire se déroule dans la matrice des mitochondries (compartiment interne). Le pyruvate entre alors dans un cycle réactionnel appelé cycle de Krebs. Le pyruvate subit une série de décarboxylations oxydatives : il s'agit de cliver les fonctions carboxyles (COOH), ce qui provoque une production de CO₂ qui est relâché en dehors de la cellule (déchet).

L'objectif principal de l'oxydation du pyruvate est la production de composés réduits (NADH, H⁺). En effet, le cycle de Krebs produit 10 NADH, H⁺. En parallèle, il y a également production de 2 ATP.



5 Le cycle de Krebs. Il se déroule dans la matrice des mitochondries. Le pyruvate est issu de la glycolyse. L'acétyl-coenzyme A issu du pyruvate permet la régénération de l'oxaloacétate (4 atomes de carbone) en citrate (6 atomes de C) à chaque cycle. Les réactions principales du cycle de Krebs sont des décarboxylations (trois molécules de CO₂ libérées par molécule de pyruvate) et la formation de transporteurs d'hydrogène réduits NADH et FADH₂, qui seront réoxydés grâce à la chaîne respiratoire (voir doc. 7).

Document 5 : Schéma simplifié du cycle de Krebs (BELIN doc 5 p 435)

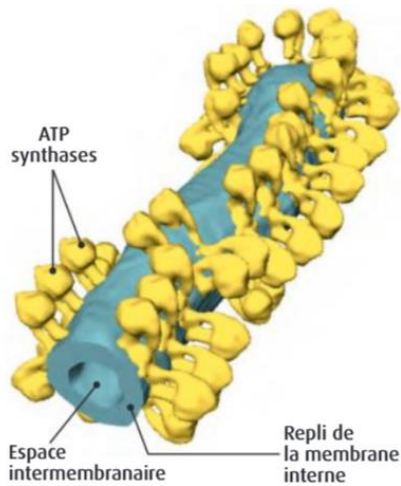
3. La phosphorylation oxydative au niveau de la chaîne respiratoire (doc 7 p 435)

La deuxième phase de la respiration cellulaire se déroule dans les crêtes de la membrane interne des mitochondries. Celle-ci contient de très nombreuses protéines permettant le transport d'ions H⁺ et d'électrons : c'est la chaîne respiratoire.

Les 10 NADH, H⁺ produits précédemment vont donner leurs H⁺ et électrons à cette chaîne de transport d'électrons, ce qui va permettre la réduction d'O₂ en H₂O. L'O₂ est donc l'accepteur final des ions H⁺ et des électrons (*même rôle que le réactif de Hill dans la photosynthèse*).

En parallèle, cette chaîne permet l'accumulation d'ions H⁺ dans l'espace intermembranaire (entre les 2 membranes de la mitochondrie). Ces ions vont ensuite passer dans l'ATP-synthase (sphère pédonculée) qui permet la production d'ATP à partir d'ADP + Pi. L'ATP Synthase de la mitochondrie est très similaire à celle du chloroplaste (*voir phase photochimique de la photosynthèse*).

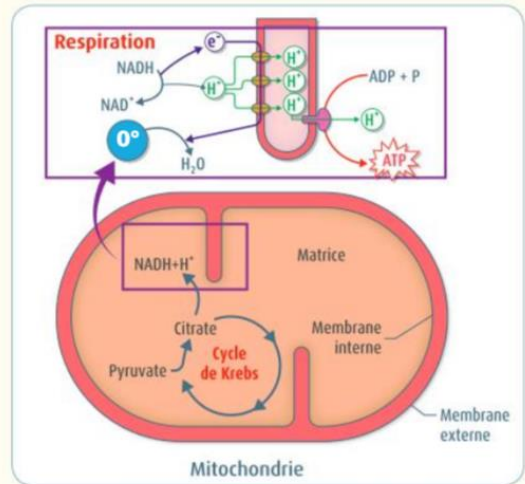




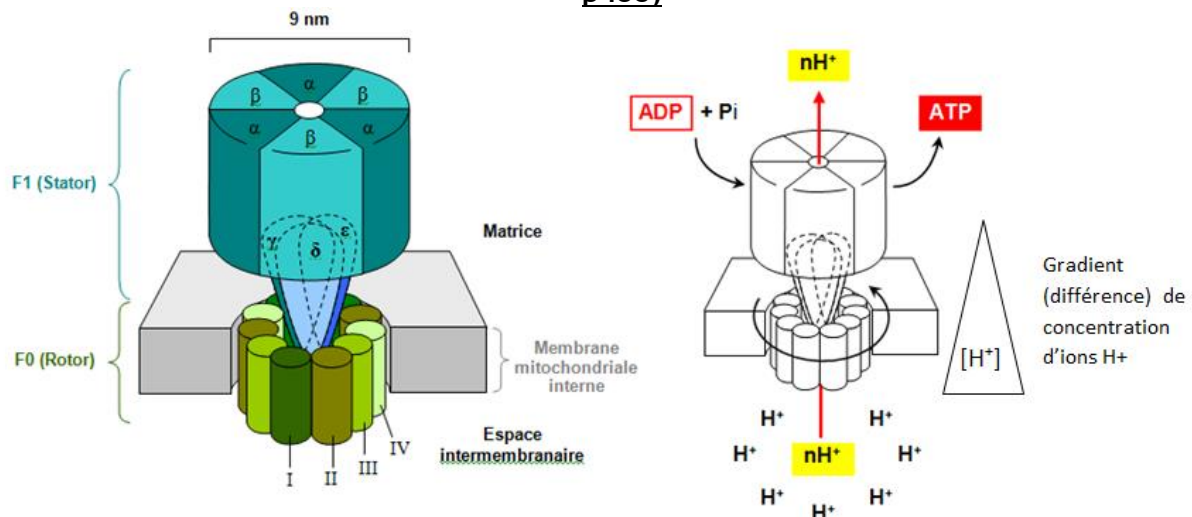
6 Observation en cryotomographie électronique d'une crête de mitochondrie.

7 La chaîne respiratoire et la production d'ATP.

Les coenzymes réduits NADH et de FADH₂ cèdent leurs électrons à une série d'accepteurs localisés dans la membrane interne des mitochondries, formant la chaîne respiratoire. L'accepteur final d'électrons est le dioxygène O₂, qui est réduit en eau H₂O. Lors du transfert des électrons, des protons H⁺ sont transporté dans l'espace intermembranaire. Ces protons retraversent cette membrane et regagnent la matrice mitochondriale au niveau d'une protéine associée à la membrane interne, l'ATP synthase, qui couple ce transport de protons à la synthèse d'ATP. Une molécule de NADH permet ainsi la synthèse de 3 molécules d'ATP et une molécule de FADH₂ la synthèse de 2 molécules d'ATP.



Document 6 : Fonctionnement simplifié de la chaîne respiratoire (BELIN doc 6 et 7 p435)



Remarque :
Les ATP synthases des chloroplastes sont constituées de la même manière mais on nomme les sous-unités CF0 et CF1 (C pour Chloroplaste).

Synthèse d'ATP
Le rotor agit comme un moteur moléculaire : lorsque la sous-unité gamma (γ) tourne dans le stator (α et β), celui-ci se déforme et permet la transformation de l'ADP et Pi en ATP.

Document 7 : Le fonctionnement de l'ATP Synthase (sphère pédonculée)

Réaction	Respiration	F. Lactique	F. alcoolique
Substrat	Glucose	Glucose	Glucose
O ₂ utilisé	Oui	Non	Non
Oxydation	Totale	Partielle	Partielle
CO ₂ rejeté	Oui	Non	Oui
Déchets produits	CO ₂	Lactate	Ethanol + CO ₂
ATP produits	36	2	2
TH ₂ utilisés	12	2	2

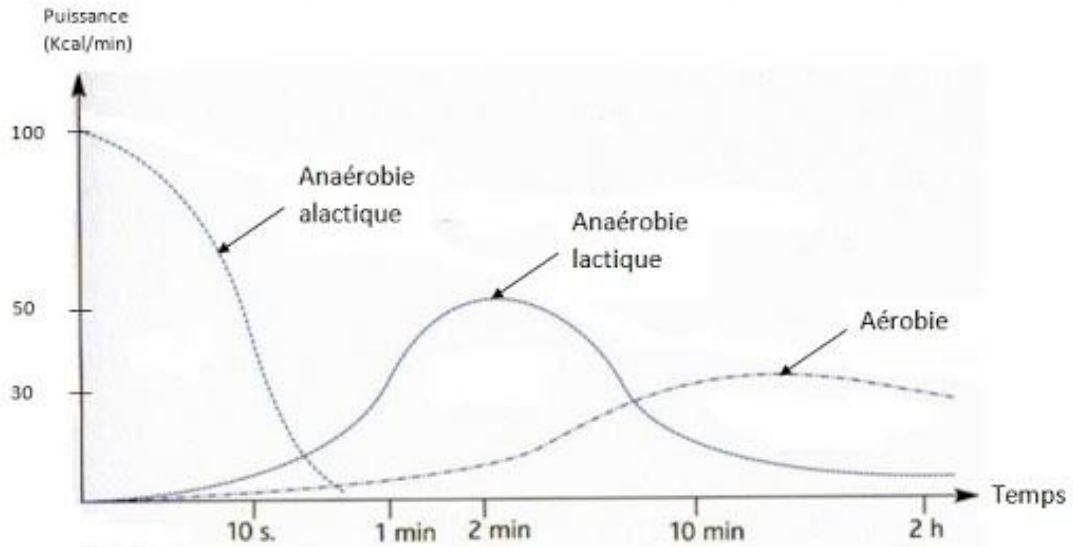
Document 8 : Tableau à double entrée comparant le bilan énergétique des réactions de respiration / fermentation

III. Production d'énergie et santé

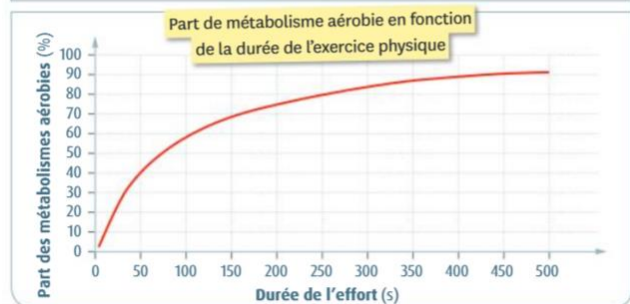
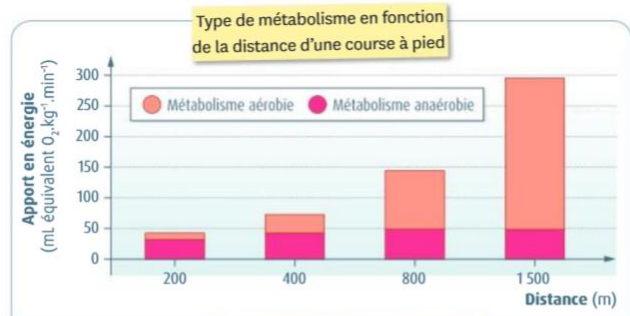
1. Type d'effort et métabolisme (doc 2 et 3 p 436)

Quel que soit le sportif, la durée d'effort fait varier le métabolisme cellulaire selon 3 phases principales :

- **La phase anaérobie alactique :** est une phase très courte (quelques dizaines de secondes) dans laquelle la fermentation n'a pas lieu. Elle est permise par des échanges rapides au niveau énergétique avec la créatine phosphate, un composé très énergétique.
- **La phase anaérobie lactique :** est la phase durant laquelle la fermentation est active (entre 10/20 secondes et jusqu'à 1h, suivant l'entraînement et le type d'effort).
- **La phase aérobie :** est la phase durant laquelle l'apport majoritaire d'ATP est produit par la respiration cellulaire.



2 Marcheur athlétique et sprinteuse ou sprinteur. Les dépenses énergétiques associées sont indiquées.



3 Contribution du métabolisme aérobie et des métabolismes anaérobies dans les cellules musculaires lors de différents types d'efforts physiques. Le métabolisme aérobie est l'utilisation du glucose par la respiration cellulaire. Les métabolismes anaérobies sont la fermentation lactique ainsi qu'une autre voie métabolique qui n'implique pas le glucose et qui est mobilisée dans les toutes premières secondes de l'effort physique.

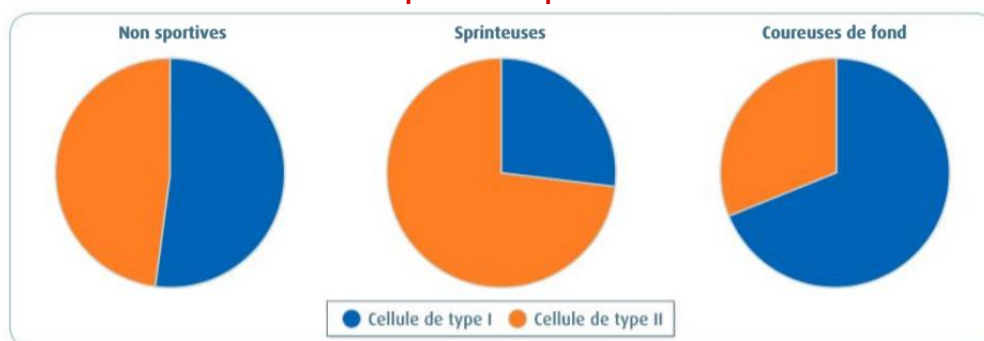
Document 9 : Les types d'efforts et le métabolisme (BELIN doc 2 et 3 p436)

2. Les différentes fibres et le type d'entraînement (doc 6 et 7 p437)

Voir DM « Types de fibres musculaires »

Suivant le type d'effort pratiqué (nature et intensité), les muscles vont se modifier progressivement pour adapter leur fonctionnement à l'effort. Ainsi, les fibres musculaires vont se spécialiser selon 2 types principaux :

- Les fibres de type 1, rouge (riches en myoglobine pour capter l'O₂), à métabolisme aérobie (respiration cellulaire), ont un fonctionnement plus lent mais endurant.
- Les fibres de type 2, blanche, à métabolisme anaérobie (fermentation), ont un fonctionnement rapide mais peu endurant.



6 Pourcentage des types de cellules musculaires dans les muscles du mollet de femmes de même âge.

	Cellules de type I (fibres rouges)	Cellules de type II (fibres blanches)
Teneur en ATP	Faible, constante	Faible, constante
Vitesse de contraction	Lente	Rapide
Teneur en enzymes de la fermentation lactique	Faible	Élevée
Teneur en enzymes du cycle de Krebs et de la chaîne respiratoire	Élevé	Faible
Réseau capillaire associé	Très développé	Moins développé

7 Quelques caractéristiques biochimiques des deux types de cellules musculaires.

Document 10 : Les types de fibres musculaires et leurs rôles (BELIN doc 6 et 7 p437)

3. Les produits dopants : créatine

Certains sportifs utilisent des produits dopants : ce sont des produits chimiques qui améliorent artificiellement et rapidement les performances sportives mais présentent de graves dangers pour la santé. Cette pratique est interdite.

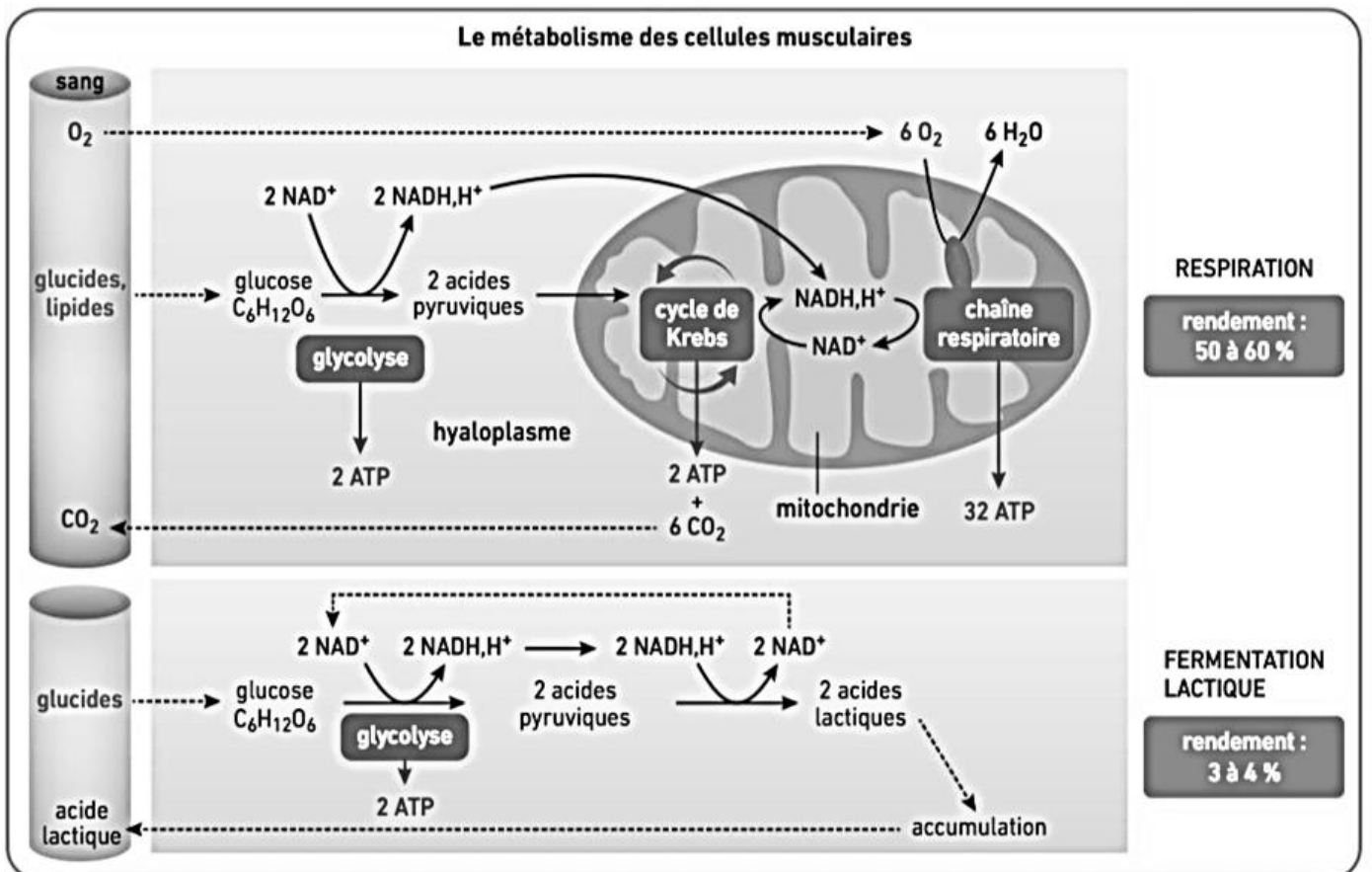
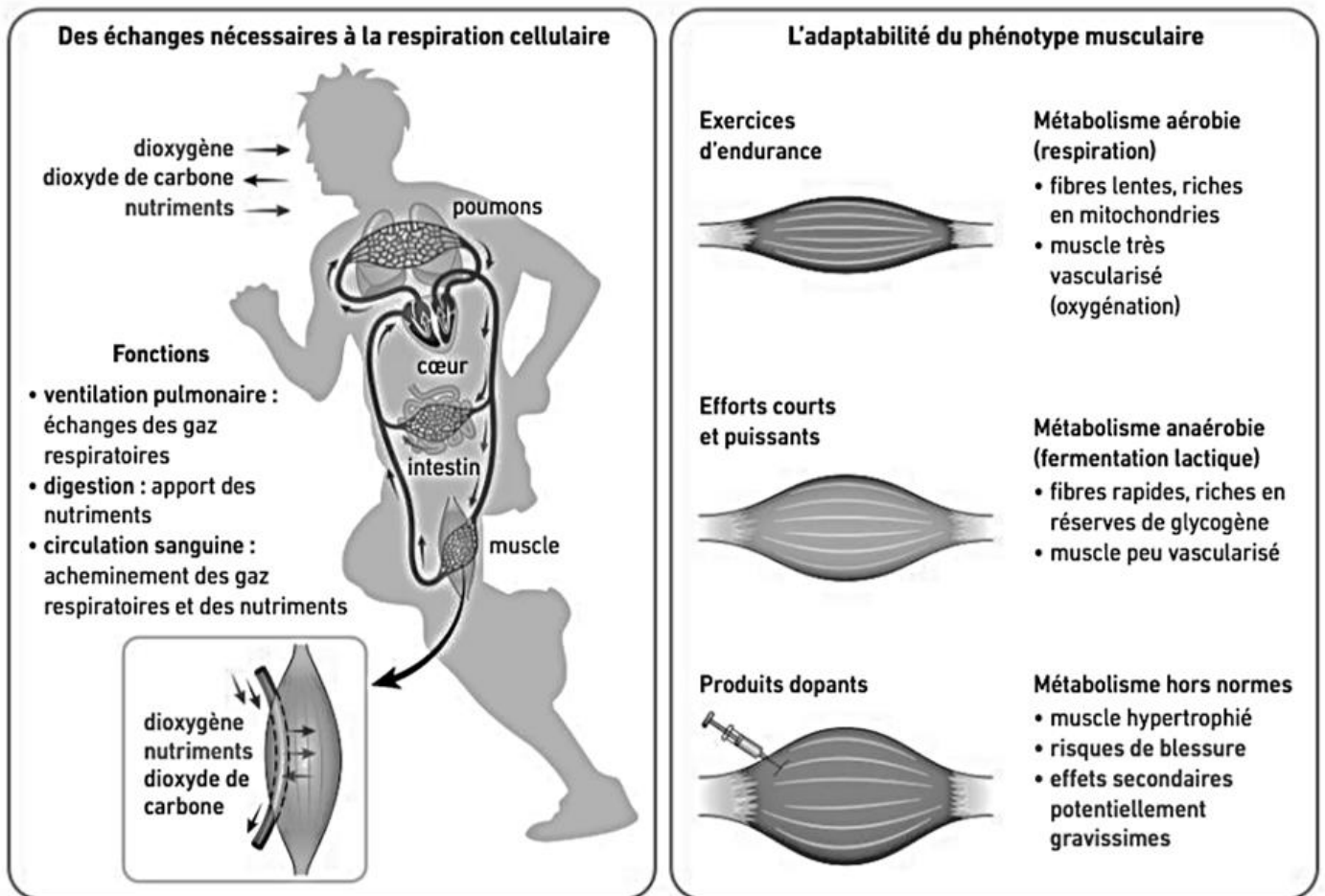
Par exemple, certains sportifs utilisent de la créatine phosphate afin d'améliorer leurs performances, notamment sur les efforts de courte durée (sprint). Néanmoins, elle n'est pas vraiment considérée comme un dopant car ses effets sont très limités (dégradation très rapide). Cependant, à très haute dose, elle apporte beaucoup d'acides aminés qui peuvent produire des déchets trop nombreux pour le rein (ammoniaque NH₄⁺).

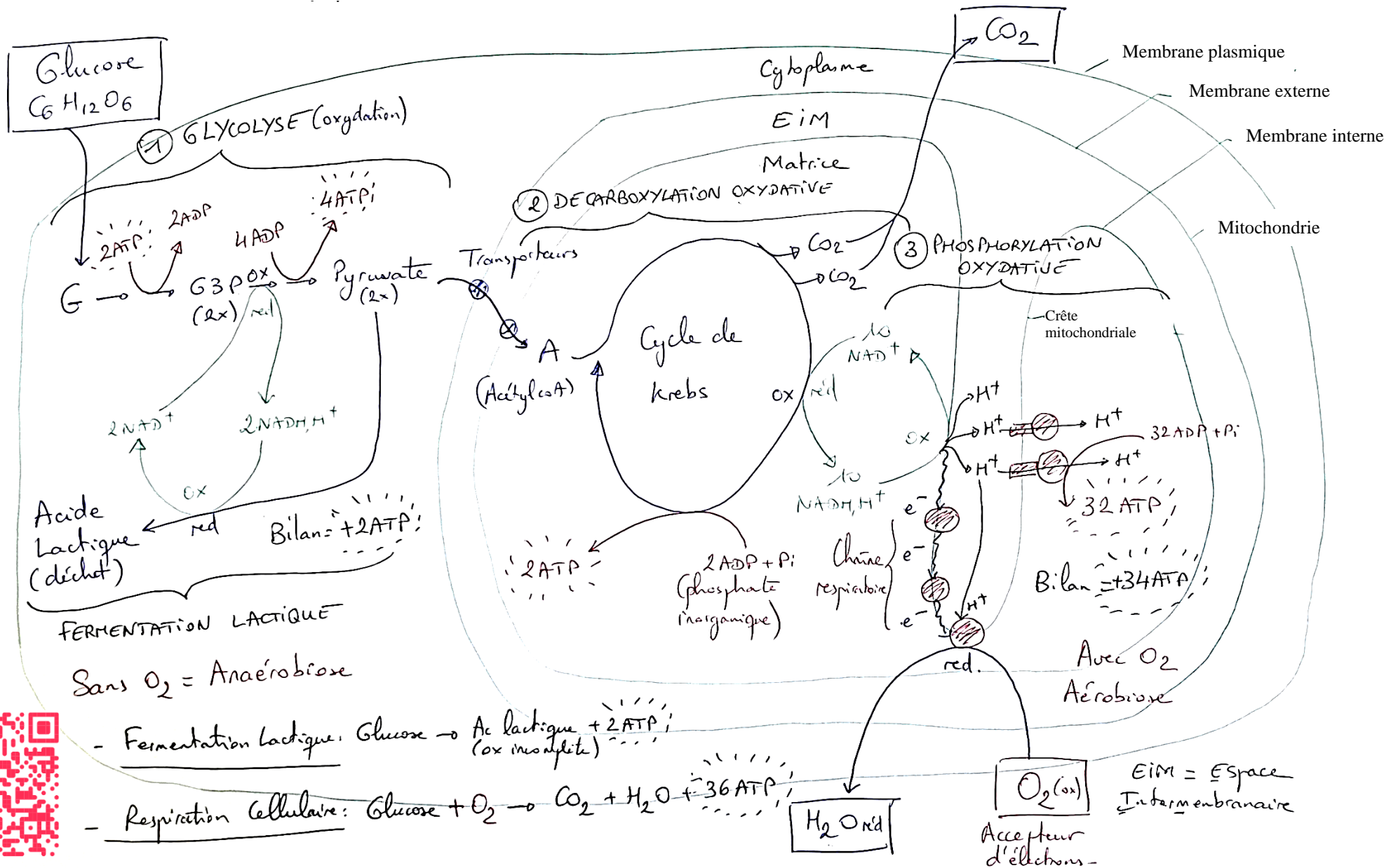
D'autres sportifs utilisent des stéroïdes anabolisants qui augmentent la masse musculaire par une augmentation de masse protéique (actine-myosine). L'EPO et ses dérivés sont également très employés afin d'augmenter l'oxygénation du sang et ainsi favoriser l'effort aérobie (courses longues et cyclisme). Enfin, de nouveaux dopants ont pour objectif de stimuler la multiplication des mitochondries (GW1516, Aicar ...). Ces substances sont déjà inscrites sur la liste des molécules interdites.

Conclusion

L'ATP est une molécule énergétique essentielle à tous les travaux cellulaires, et notamment celui de raccourcissement des sarcomères permettant la contraction des cellules musculaires. L'ATP est produit par la glycolyse mais également par la respiration cellulaire dont la part dépend de la durée de l'effort, du type de sport mais aussi de l'entraînement.

SCHEMA BILAN (BORDAS p433)





- Fermentation lactique: Glucose \rightarrow Ac lactique + 2ATP;
(ox incomplète)

- Respiration Cellulaire: Glucose + $O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + 36ATP$

Schéma de la production d'énergie dans la cellule par la respiration cellulaire et la fermentation lactique