


Ministère de l'éducation nationale du préscolaire
des sports
Académie régionale de l'éducation nationale de
Marrakech
Direction provinciale Marrakech



Unité 1:

Consommation de la matière organique et flux d'énergie

2^{ème} année du baccalauréat, Série : sciences expérimentales
Filière : sciences physique et sciences de la vie et de la terre
Section : internationale, option langue Française

Proposé par : Prof Khadija Zekrite

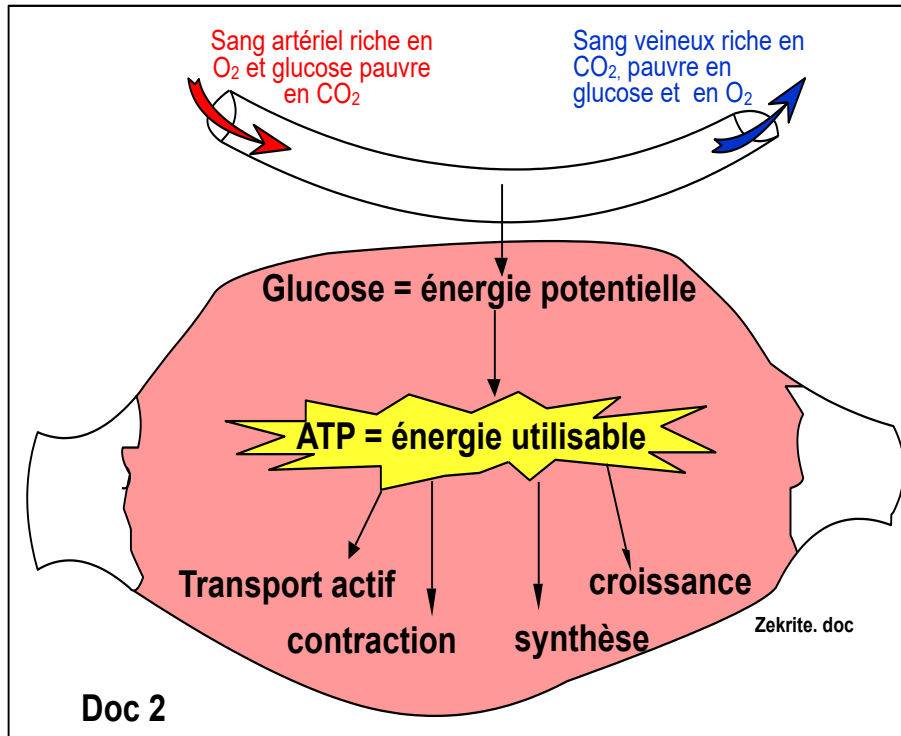


Année scolaire : 2025/2026



Documents pour s'interroger

L'activité physique et tout autre travail de la cellule nécessite de l'énergie. Les aliments digérés dans le tube digestif sont transformés en petites molécules appelées nutriments. Les nutriments quittent l'intestin pour passer dans le sang. Ils sont distribués à l'ensemble des cellules de l'organisme pour lui offrir l'énergie nécessaire à son fonctionnement.



Quelles questions peut-on poser concernant les phénomènes responsables de la production de l'énergie nécessaire pour les différentes activités cellulaires ?

Problématiques posées :

■ Comment, la cellule convertit l'énergie chimique potentielle emmagasinée dans la matière organique en une autre forme d'énergie chimique (ATP). → **Chapitre 1**

■ Comment la cellule musculaire convertit l'énergie chimique emmagasinée dans l'ATP en énergie mécanique lors de l'activité physique ? → **Chapitre 2**

Chapitre 1 : Libération de l'énergie potentielle de la matière organique au niveau cellulaire

Les cellules animales et végétales ont besoin d'énergie nécessaire aux diverses fonctions biologiques. Cette énergie est libérée à travers la dégradation des substances organiques, notamment les lipides et les glucides. Le glucose est l'exemple type.



Questions posées

- Comment la dégradation du glucose permet-elle de convertir son énergie chimique en énergie utilisable par la cellule (ATP) ?
- Quelles sont les structures cellulaires impliquées dans les mécanismes qui assurent la conversion de cette énergie ?

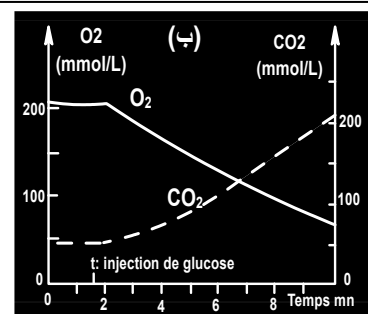
Activité 1 Mise en évidence des réactions chimiques responsables de la libération de l'énergie potentielle de la matière organique

Doc 1 : La levure est un champignon unicellulaire hétérotrophe. Cette cellule extrait l'énergie nécessaire à sa croissance de la molécule du glucose. La levure est capable de vivre dans un milieu **aérobie** (avec O_2) ou **anaérobie** (sans O_2)

Levure de bière observée au microscope optique après coloration à l'eau iodée



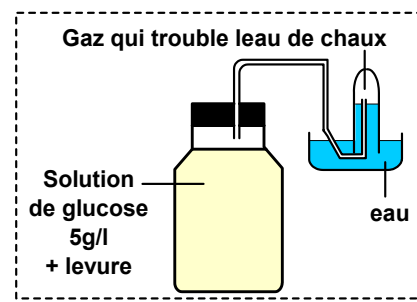
Doc 2 : des levures sont cultivées depuis 48 h dans un milieu de culture riche en O_2 et pauvre en nutriments organiques, ce qui provoque l'épuisement des réserves cytoplasmiques. Une suspension de ces cellules, est mise dans un réacteur d'ExAO qui permet de mesurer la concentration en O_2 et en CO_2 . Au temps t_1 , on ajoute au milieu 0,1 ml d'une solution de glucose 5 %. Le graphique ci-contre résume les résultats affichés sur l'écran de l'ordinateur. Une diminution du taux de glucose est révélée dans l'enceinte contenant la levure.



Le matériel ExAO (expérience assistée par ordinateur) permet de mesurer à l'aide d'un ordinateur en temps réel les variations de divers paramètres (CO_2 dégagé, O_2 consommé ... par un organisme ou un organisme)

Doc 3 : pour mettre en évidence le comportement des cellules de levure envers la matière organique dans un milieu anaérobie, on propose l'expérience suivante :

- On prépare une solution de glucose (5 g/l) contenant une suspension de cellules de levure.
- On remplit l'erenmeyer complètement comme indiqué dans le schéma pour éliminer O_2 . L'aération est alors presque nulle (milieu anaérobie).
- On laisse le dispositif 40 min, on note les résultats suivants :
 - Le gaz qui se dégage fait troubler l'eau de chaux.
 - Un alcool (éthanol) apparaît dans le milieu.
 - La concentration de glucose diminue dans l'erenmeyer.



Pistes d'exploitation

- 1 **Quelle hypothèse** peut-on formuler des données du doc 1 concernant la libération d'énergie par la cellule de la levure?
- 2 **Analyser** les résultats du document 2, **en déduire** la voie responsable de la libération d'énergie mise en évidence par cette expérience.
- 3 **Expliquer** les résultats obtenus dans l'expérience du document 3.
- 4 **Effectuer** une petite recherche concernant la fermentation lactique.
- 5 **Conclure** les deux voies métaboliques responsables de la libération d'énergie par la cellule

Activité 1 : Exploitation des documents :

① **Hypothèse** : Les cellules de levures utilisent sans doute deux modalités de production d'énergie : **une voie aérobie et une voie anaérobie.**

② → **Analyse du graphique du doc 3 :**

- Le graphique représente la variation de CO_2 et d' O_2 en fonction du temps avant et après l'ajout du glucose au milieu contenant les cellules de levure.

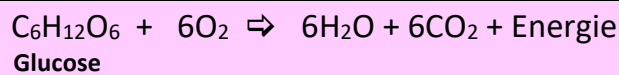
- Avant l'ajout du glucose au milieu, on note une constance de la concentration du CO_2 (50mmol/l) et d' O_2 (200mmol/l)

- L'ajout du glucose dans le milieu au temps t_1 , entraîne une diminution de la concentration d' O_2 (de 200 à 50mmol/l après un délai de 8mn30s) et une augmentation de la concentration de CO_2 (de 50 à 200mmol/l après un délai de 8mn30s)

→ **Conclusion :**

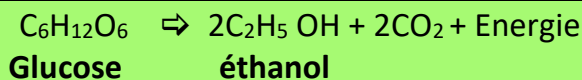
- La cellule de levure consomme l' O_2 et rejette le CO_2 , donc elle respire, on parle du phénomène de **la respiration cellulaire.**

- Le phénomène de respiration cellulaire est lié à la consommation du glucose par la cellule, donc la respiration cellulaire est une **voie aérobie de dégradation de la matière organique pour la production d'énergie.** On peut écrire l'équation globale de cette réaction comme suit :



Glucose

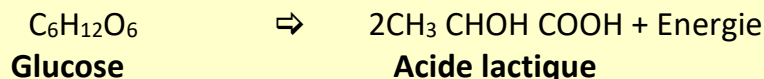
③ En absence d' O_2 , la levure produit son énergie en dégradant le glucose et en le transformant en **éthanol (= alcool éthylique : $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)** avec libération de CO_2 . Cette **voie anaérobie** de dégradation de la matière organique est appelée : **fermentation alcoolique.** On peut écrire l'équation globale de cette réaction comme suit :



Glucose

éthanol

④ - **La fermentation lactique** est un autre mode de production d'énergie en milieu anaérobie, le produit de cette fermentation est **l'acide lactique** ($\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$). La réaction globale est la suivante :



Glucose

Acide lactique

- La fermentation lactique peut être réalisée par la cellule musculaire et par quelques bactéries par exemple les bactéries du lait (lactobacilles). La production d'acide lactique provoque une acidification du milieu, c'est la cause de la coagulation du lait par exemple et sa transformation en yaourt.

Bilan de l'activité 1

Il existe deux voies métaboliques de dégradation du glucose des métabolites pour la production d'énergie utilisable par la cellule lui permettant toute activité :

- Une voie aérobie (présence d' O_2) appelée respiration cellulaire.

- Une voie anaérobie (sans O_2) appelée : fermentation (lactique : transformation du glucose en acide lactique, ou bien alcoolique : dégradation du glucose en alcool éthylique)

Mots clés :

Métabolite : nutriment riche en énergie exemple le glucose.

Métabolisme : désigne l'ensemble des réactions chimiques se déroulant dans la cellule et indispensables à la vie.

Activité 2 : Devenir du glucose dans la cellule au cours de la fermentation et la respiration

Mise en situation problème

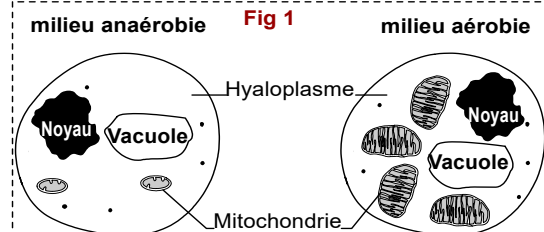
La respiration et la fermentation sont deux voies métaboliques qui permettent de libérer l'énergie emmagasinée dans les métabolites

- Dans quelle partie de la cellule se déroule chacune des deux voie, y'a-t-il des relations entre les deux ?

Des cultures de levures sont réalisées en présence ou en absence d'O₂ dans un milieu contenant une faible quantité de glucose marqué au carbone 14.

♦ La figure 1 représente des microphotographies de la levure dans chacun des deux milieux.

♦ D'autre part, des prélèvements effectués à différents temps permettent de détecter et d'identifier les molécules radioactives présentes à différents niveaux de la cellule, le document 2 représente les résultats pour chaque prélèvement :



Temps	Milieu externe	Milieu aérobie		Milieu anaérobie
		Hyaloplasme	Mitochondrie	Hyaloplasme
T ₀	G+++			
T ₁	G+	G++		G++
T ₂	G+	P++	P+	P+++
T ₃			P++, K+	P+, E++
T ₄	CO ₂ ⁺		K+++	E+++

G : glucose
 P : acide pyruvique
 K : acides du cycle de Krebs
 E : alcool, éthanol
 + concentration faible
 ++ concentration moyenne
 +++ concentration forte

Figure 2 : Evolution de la radioactivité dans la cellule et dans le milieu extérieur au cours du temps

- Quelle hypothèse peut-on formuler à partir de la comparaison des deux cellules de levure en milieu aérobie et en milieu anaérobie (Fig 1)
- Repérer au cours du temps les différents lieux de la localisation de la radioactivité et déduire le devenir du glucose dans la cellule au cours de la respiration et de la fermentation (Fig 2).
- Représenter sous forme d'un schémas récapitulatif simple le devenir du glucose dans la cellule au cours de la respiration et de la fermentation

Mots clés :

Hyaloplasme = cytosol : substance fondamentale du cytoplasme dans laquelle sont noyés les organites.
Mitochondrie : organe cellulaire (voir ultérieurement la structure et la fonction de cet organe)

Réponses :

- Comparaison : la levure cultivée dans un milieu aérobie est riche en mitochondries (organe cellulaire), bien développées et de grande taille, alors qu'en milieu anaérobie la cellule contient un nombre réduit de mitochondries, de petite taille et moins développées.
 - Hypothèse : La respiration cellulaire nécessite l'intervention des mitochondries, alors que la fermentation n'a pas besoin de cet organe.
- Les différents lieux de la localisation de la radioactivité :
 - Au temps T₁ on remarque une diminution du glucose radioactif dans le milieu externe et qui apparaît dans l'hyaloplasme des cellules des deux milieux. Au temps T₂, le glucose

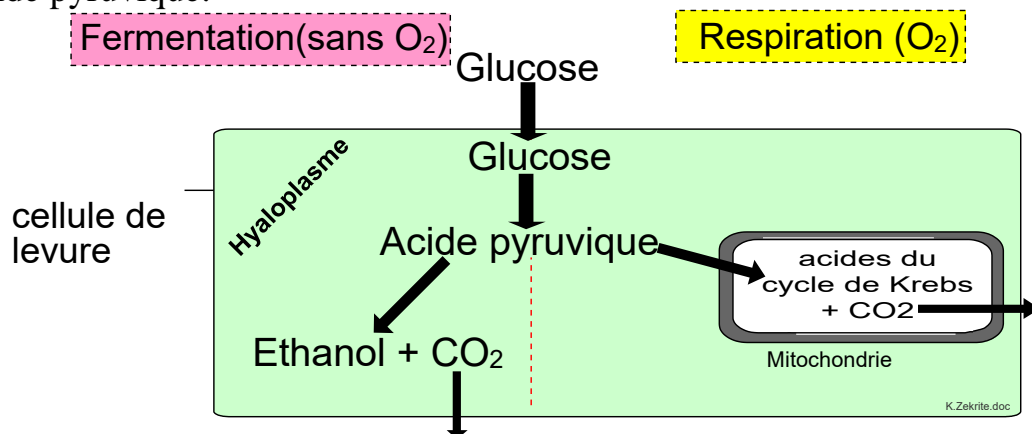
radioactif disparaît et l'acide pyruvique radioactif apparaît dans l'hyaloplasme des deux cellules avec une faible quantité dans les mitochondries du milieu aérobie. Ceci s'explique par la pénétration du glucose du milieu extérieur au hyaloplasme des deux cellules où il se transforme en acide pyruvique.

- En milieu aérobie : au temps T_3 la radioactivité apparaît dans les mitochondries sous forme d'acide pyruvique et d'acides du cycle de Krebs. Au temps T_4 , l'acide pyruvique disparaît le taux des acides du cycle de Krebs augmente dans les mitochondries, le CO_2 radioactif apparaît dans le milieu extérieur. On explique ces résultats par le passage de l'acide pyruvique de l'hyaloplasme vers les mitochondries où il se transforme en acides du cycle de Krebs avec libération de CO_2 qui échappe vers le milieu extérieur.

- En milieu anaérobie, la radioactivité reste toujours au niveau de l'hyaloplasme, sous forme d'acide pyruvique puis en alcool éthylique. On explique ces résultats par la transformation d'acide pyruvique en éthanol au niveau de l'hyaloplasme avec libération de CO_2 qui échappe vers le milieu extérieur.

Bilan de l'activité 2

- La fermentation et la respiration cellulaire sont des *séries de réactions chimiques*.
- Toutes les réactions de la fermentation se déroulent dans *l'hyaloplasme*.
- Les réactions de la respiration se déroulent dans *l'hyaloplasme et dans la mitochondrie*.
- La fermentation et la respiration commencent par une phase commune qui se déroule dans l'hyaloplasme appelée *la glycolyse* au cours de laquelle le glucose se transforme en acide pyruvique.



Activité 4 : Les mitochondries, organites clés de la respiration

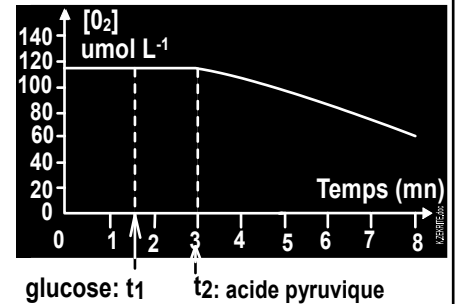
Mise en situation problème

Les mitochondries, sont indispensables pour la respiration.

- Quelles est la structure et le rôle de cet organite ?

Doc 1: On effectue un broyage (سحق) des cellules hépatiques. Le broyat obtenu est alors centrifugé pour séparer les mitochondries des autres organites.

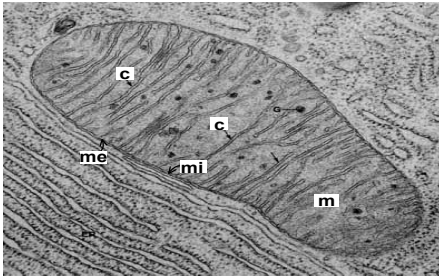
- On met une suspension de mitochondries dans une solution bien aérée au sein d'un dispositif ExaO muni d'une sonde pour mesurer la concentration d'O₂.
- Le milieu contient une bonne quantité d'ADP + Pi.
- Au temps t₁, on ajoute une faible quantité de glucose.
- Au temps t₂, on ajoute de l'acide pyruvique.
- Le graphique ci-contre traduit les résultats obtenus.



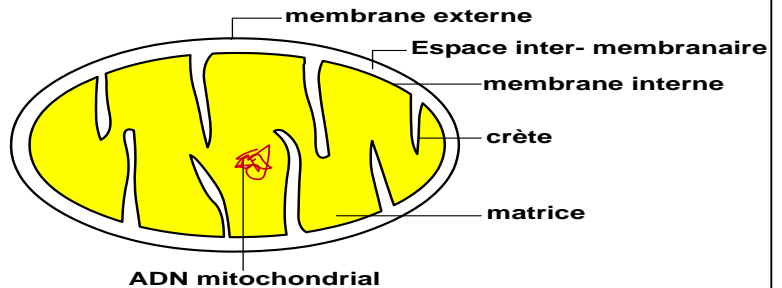
Doc 2: Ultrastructure de la mitochondrie

a) électronographie de mitochondrie

m: matrice
c: crête
mi: membrane interne
me: membrane externe

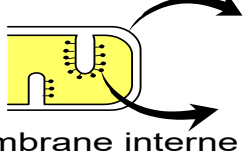


b) Schéma d'une mitochondrie

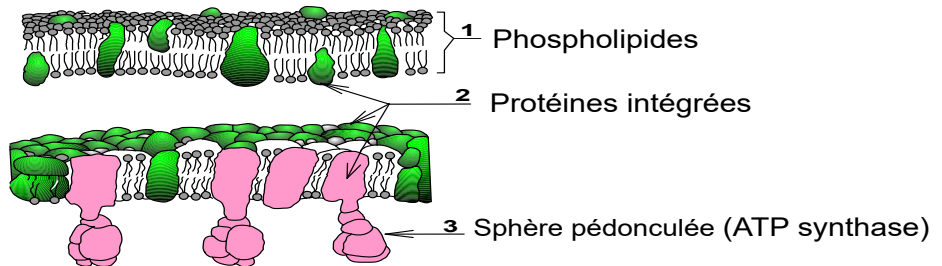


Doc 3: Structure moléculaire des membrane de la mitochondrie

membrane externe



membrane interne



1 Phospholipides

2 Protéines intégrées

3 Sphère pédonculée (ATP synthase)

K Zekrite.doc

Doc 3 : Composition chimique des différentes structures de la mitochondrie

Structure étudiée	Particularités de la composition chimique	Équipement enzymatique
Membrane externe	Protéines (62%), Lipides (38%)	Protéines similaires à celles de la membrane plasmique
Membrane interne	Protéine (80%), Lipides (20%)	Nombreuses enzymes en particulier des ATP synthase
Matrice	Absence de glucose, présence de pyruvate, ATP, ADP, Pi, composés oxydés (R) ou réduits (RH)	Enzymes : déshydrogénases et décarboxylases

ATP synthase : protéine enzymatique qui catalyse la synthèse de l'ATP selon la réaction suivante $ADP + Pi \rightarrow ATP$

Décarboxylase : une enzyme qui catalyse la décarboxylation d'un substrat, c a d qui provoque la perte d'un groupe carboxyle (COOH).

Déshydrogénase : Une enzyme qui oxyde un substrat par le transfert d'un ou plusieurs protons (H⁺) à un accepteur, généralement un coenzyme type NAD⁺ ou FAD.

Pistes d'exploitation

- 1 **Que peut-on déduire** de l'analyse des résultats de l'expérience du document 1
- 2 **Annoter** la figure du doc 2b et décrire l'ultrastructure et la biochimie de la mitochondrie (doc 2, 3, 4)
- 3 **Relever**, à partir des doc 3 et 4 le rôle probable de la matrice et de la membrane interne, dans la respiration cellulaire.

Réponses :

1 - Analyse du graphique :

Au début de l'expérience, La concentration d'O₂ dans la suspension mitochondriale est constante (120umol/l), elle ne varie pas même après addition du glucose. L'addition d'acide pyruvique provoque une diminution considérable de la concentration d'O₂ dans l'enceinte qui passe de 120umol/l à 60umol/l au bout de 5mn.

- Conclusion : La mitochondrie n'utilise pas le glucose comme métabolite, mais elle consomme le pyruvate (produit de la glycolyse) en présence d'O₂, Elle réalise donc des réactions d'oxydations respiratoires.

2 La mitochondrie est un organelle clos de forme ovoïde, délimitée par deux membranes: la membrane externe et la membrane interne. La membrane interne délimite un espace dit matrice :

- La membrane externe : perméable à de nombreuses substances.

- La membrane interne : présente de nombreux replis appelés crêtes. Elle est riche en protéines intégrées, parmi lesquelles on trouve les sphères pédonculées. La tête des sphères pédonculée est orientée vers la matrice elle joue le rôle d'**ATP synthase**.

- La matrice : espace interne rempli d'un gel composé de plusieurs molécules.

3 -La présence du pyruvate, des décarboxylases, des déshydrogénases d'ADP, et d'ATP dans la matrice laisse supposer que l'acide pyruvique subit une dégradation dans la matrice pour donner de l'énergie (ATP).

- La composition particulière de la membrane interne et sa richesse en ATP synthase révèlent que cette membrane participe dans la synthèse d'ATP

Activité 5 : Rôle des mitochondries dans l'oxydation respiratoire : Les réactions chimiques dans la matrice

Mise en situation problème

Bien équipée par une composition unique, la mitochondrie reçoit l'acide pyruvique issu de la glycolyse et poursuit sa dégradation afin de produire de l'énergie.

- Quelles sont les étapes de l'oxydation de l'acide pyruvique dans la matrice mitochondriale ?

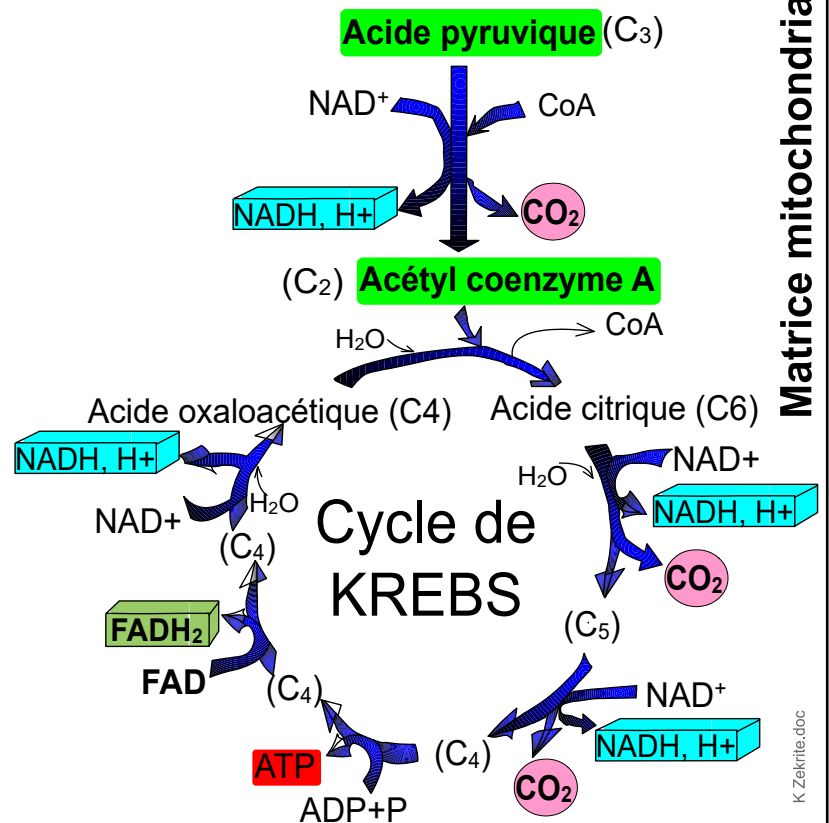
↳ Décrire les réactions au niveau de la matrice mitochondriale en précisant le devenir de l'acide pyruvique.

↳ Donner le bilan chimique et énergétique de la dégradation d'une molécule d'acide pyruvique dans la matrice

FAD : La Flavine adénine dinucléotide (FAD) dérive de la vitamine B₂, est un coenzyme d'oxydo-réduction semblable à NAD.



Doc 1: Dégradation de l'acide pyruvique dans la matrice



Réponses :

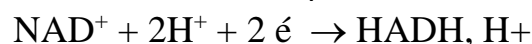
↳ Description des réactions au niveau de la matrice mitochondriale et devenir de l'acide pyruvique :

Chaque molécule d'acide pyruvique, issue de la glycolyse pénètre dans la matrice mitochondriale et subit une série de réactions d'oxydation qu'on peut diviser en deux étapes :

❶ La première étape :

🌻 Le pyruvate subit une décarboxylation (perte d'un carbone) ce qui libère une molécule de CO₂ et le pyruvate se convertit en acétyle CH₃CO

🌻 Le pyruvate subit une déshydrogénation et une oxydation, les protons et les électrons perdus sont captés par une molécule de NAD⁺ qui se réduit et donne NADH, H⁺ :



🌻 Le radical acétyle (CH₃CO) se lie avec un coenzyme A pour former l'acétyl coenzyme A (Acétyl CoA).

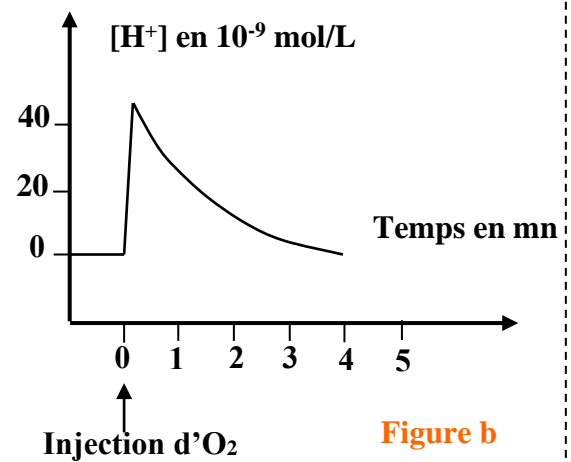
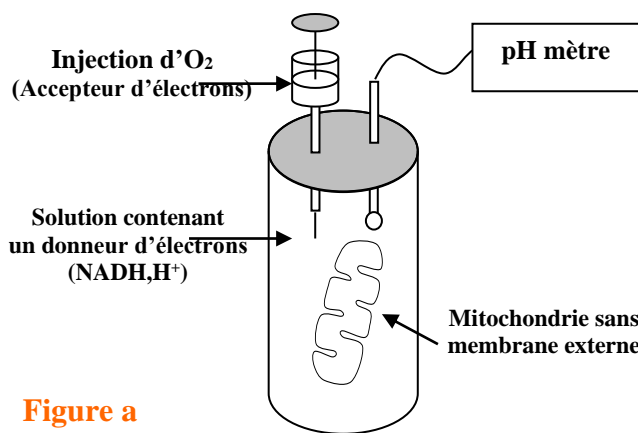
Activité 6 : Rôle des mitochondries dans l'oxydation respiratoire : Le rôle de la membrane interne mitochondriale

La grande partie de l'énergie produite au cours de la glycolyse et le cycle de Krebs se trouve contenue dans les réducteurs NADH ; H⁺ et le FADH₂, elle sera convertie en ATP au niveau de la membrane interne de la mitochondrie.

- Comment se fait cette conversion de l'énergie ?

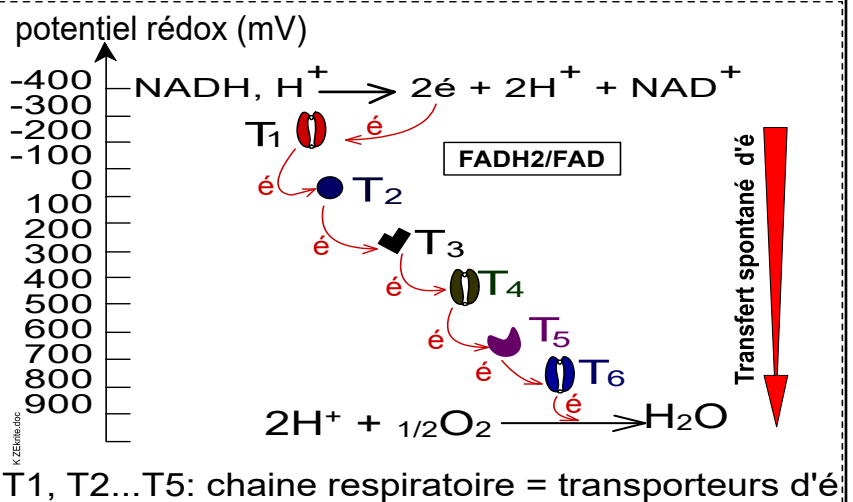
I/ Travail de la chaîne respiratoire

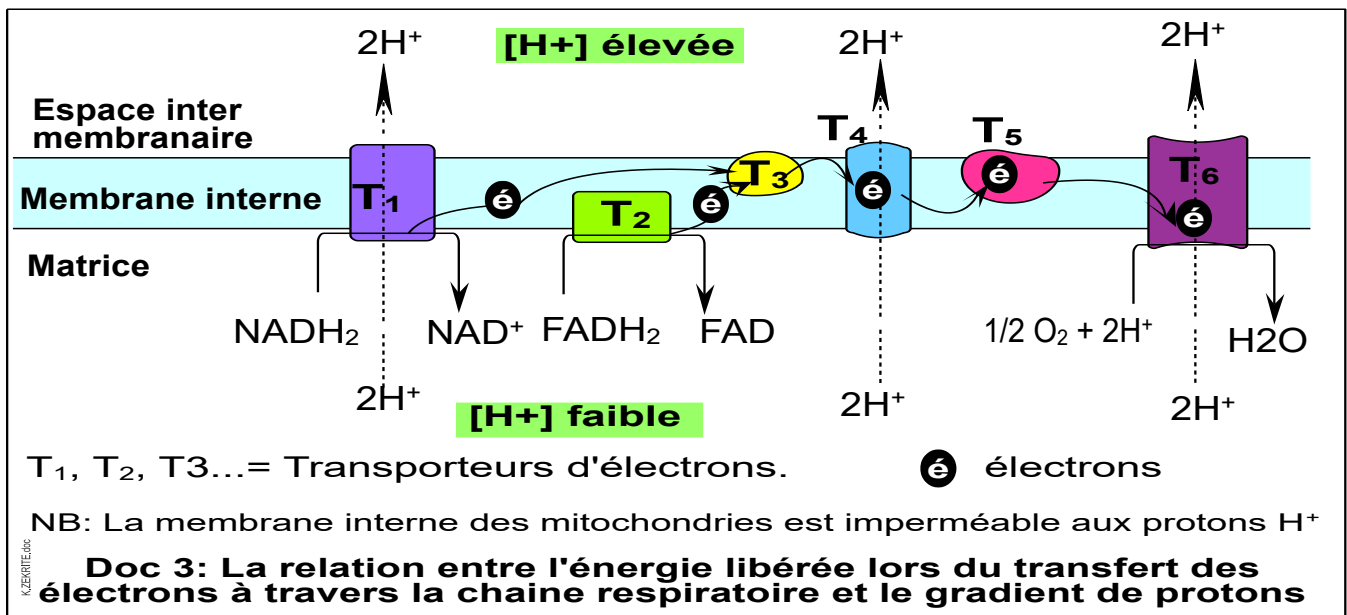
Doc 1: après élimination des membranes externes de mitochondries isolées de cellules vivantes, on les place dans une solution dépourvue du dioxygène et enrichie de donneurs d'électrons (NADH, H⁺). On suit la variation de la concentration des protons H⁺ avant et après l'addition du dioxygène (O₂). Les figures a et b donnent les conditions et les résultats de cette expérience.



Doc 2: La membrane interne mitochondriale est constituée d'un ensemble de protéines appelées chaîne respiratoire ou transporteurs d'électrons. Ces molécules se caractérisent par des valeurs de potentiel redox différentes, ce qui leur permet de céder ou capter des électrons au cours des réactions d'oxydoréduction. La figure suivante présente quelques transporteur de la chaîne respiratoire et leur potentiel redox

Potentiel redox : chaque couple redox est caractérisé par son potentiel redox qui mesure de façon relative son pouvoir réducteur ou oxydant. C'est une tension électrique.





- Fig b doc 1 : **Décrire** l'évolution de la concentration des ions H⁺, puis **expliquer** la variation de la concentration des protons H⁺ enregistrée.
- Indiquer, par une flèche**, sur la figure du document 2 le sens du transfert spontané des électrons et déterminer, parmi les transporteurs de la chaîne respiratoire l'accepteur final des électrons.
- Doc 3 : **expliquer** le devenir des transporteurs réduits (NADH et FADH₂) au niveau de la membrane interne mitochondriale et le rôle de l'O₂ dans ces réactions.

Activité 6 I / : Exploitation des documents :

1 Description des résultats :

- avant l'addition d'O₂, la concentration des protons H⁺ dans le milieu extérieur est nulle.
- Après l'addition d'O₂, on constate une **augmentation rapide** de la concentration des ions H⁺ dans la solution jusqu'à atteindre une valeur maximale (45.10⁻⁹ mol/L).
- Après environ 20s, on observe une **diminution progressive** de la concentration des ions H⁺ jusqu'à rétablissement de la valeur initiale après 4 min.

- Explication des résultats :

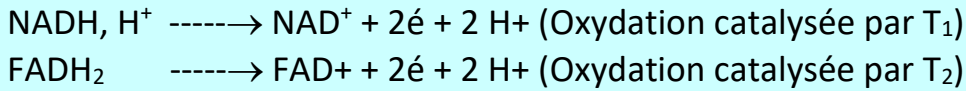
- L'augmentation rapide de la concentration des ions H⁺ dans la solution, observée directement après l'addition d'O₂, est due à une **sortie rapide** de ces ions de la matrice à travers la membrane interne de la mitochondrie. Les ions H⁺ résultent de l'oxydation des donneurs des électrons (NADH, H⁺). Cette oxydation de NADH, H⁺ dépend de la présence d'O₂.
- La diminution progressive de la concentration des ions H⁺ ne peut être expliquée que par une entrée lente de ces ions à travers la membrane interne vers la matrice mitochondriale.
- la sortie rapide des protons H⁺ engendre une inégalité de concentration de part et d'autre de la membrane interne ([H⁺] élevée dans le milieu inter membranaire et faible dans la matrice), cette différence est appelée **gradient de concentration**.

2 Sens du transfert spontané des électrons et détermination de l'accepteur final des électrons :

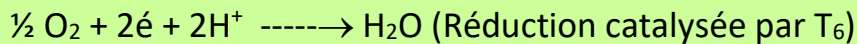
Les électrons se transmettent spontanément d'un transporteur à un autre selon un potentiel d'oxydoréduction croissant. NADH transfère ses électrons à plusieurs intermédiaires en chaîne et finalement à la molécule d'O₂ qui se réduit et se combine à des protons pour former la molécule d'eau. Le dioxygène est donc l'accepteur final d'électrons. Ce transfert d'électrons est appelé oxydation respiratoire.

③ Mécanisme de travail de la chaîne respiratoire :

- Les transporteurs d'hydrogène NADH, H⁺ et FADH₂ se réoxydent au niveau de la membrane interne. Cette oxydation est catalysée par des protéines de la chaîne respiratoire :



- Les électrons riches en énergie issus de cette oxydation se déplacent successivement du transporteur à bas potentiel redox (T₁ en cas de NADH) vers un autre à potentiel plus élevé. Le dernier transporteur de la chaîne (T₆) cède ces électrons au dioxygène (O₂) qui, en présence des protons de la matrice se réduit et donne une molécule d'eau selon la réaction suivante :



- La membrane interne mitochondriale, malgré imperméable aux ions H⁺, cependant ils sont expulsés par transport actif de la matrice vers l'espace inter membranaire grâce à l'énergie libérée au cours du transfert spontané des électrons,
 - Ce flux crée de part et d'autre de la membrane interne, un gradient de concentration d'ions H⁺ (donc un gradient de pH : la matrice devient plus basique).
 - Ce gradient de concentration est considéré comme réservoir énergétique.

Remarque : En absence d'O₂, accepteur final des électrons, la chaîne respiratoire s'arrête ainsi que le flux des protons vers l'espace inter membranaire.

II/ Rôle des sphères pédonculées

Doc 4: on soumet des mitochondries isolées à l'action des ultra-sons pour fragmenter leurs membranes internes et former des vésicules fermées portant des sphères pédonculées dirigées vers l'extérieur (voir figure a). On place ensuite ces vésicules dans des solutions contenant une quantité convenable d'ADP et de Pi, et qui diffèrent par leur pH ou par le port de sphères pédonculées. Le tableau de la figure b résume les conditions expérimentales ainsi que les résultats obtenus.

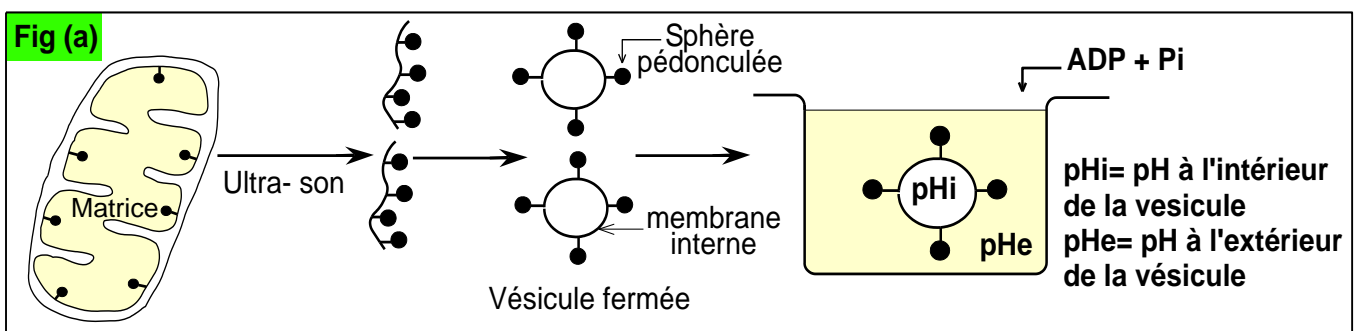


Fig (b)	Conditions expérimentale	Résultats
1	Vésicules complètes avec $pH_i < pHe$	Synthèse d'ATP
2	Vésicules complètes avec $pH_i > pHe$	Pas de synthèse d'ATP
3	Vésicules complètes avec $pH_i = pHe$	Pas de synthèse d'ATP
4	Vésicules sans sphères pédonculées avec $pH_i < pHe$	Pas de synthèse d'ATP

Le pH (potentiel Hydrogène) permet d'évaluer la concentration des ions hydrogène dans une solution. Plus $[H^+]$ d'une solution est grande, plus la valeur du pH est faible et inversement.

- En exploitant ces résultats, **déduire** les conditions principales nécessaire à la synthèse d'ATP au niveau de la mitochondrie.
- Sachant que la membrane interne mitochondriale est imperméable au protons H^+ sauf au niveau des sphères pédonculées qui joue l'équivalent d'une pompe à protons et d'ATP synthase, expliquer le rôle du gradient de protons et des sphères pédonculées dans la synthèse d'ATP.

Réponses :

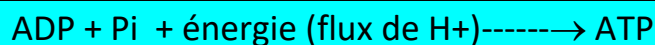
① Conditions nécessaire à la synthèse d'ATP au niveau de la mitochondrie.

La production d'ATP au niveau de la mitochondrie nécessite :

- Une différence de pH : la concentration des ions H^+ dans l'espace inter membranaire doit être supérieur à la concentration de ces protons dans la matrice
- La présence des sphères pédonculées dans la membrane interne des mitochondries.

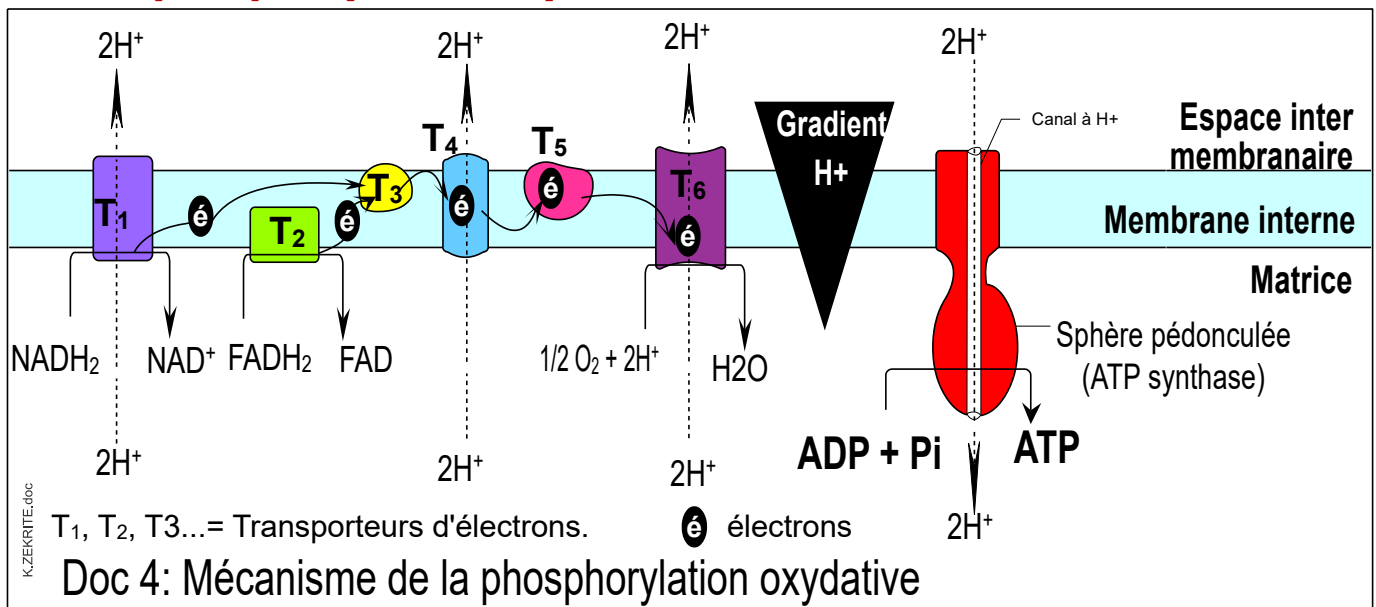
② Rôle du gradient de protons et des sphères pédonculées dans la synthèse d'ATP :

Le gradient de protons provoque un reflux des ions H^+ de l'espace inter membranaire vers la matrice, ce retour se fait uniquement à travers la sphère pédonculée (ATP synthétase). Ce passage des protons fournit l'énergie nécessaire à la phosphorylation d'ADP et la formation d'ATP selon la réaction suivante :



III/ La phosphorylation oxydative.

III/ La phosphorylation oxydative.



En Exploitant le document 4 et l'ensemble des données précédents, expliquer dans un texte correctement rédigé le couplage entre le fonctionnement de la chaîne respiratoire et la synthèse de l'ATP au niveau des sphères pédonculées.

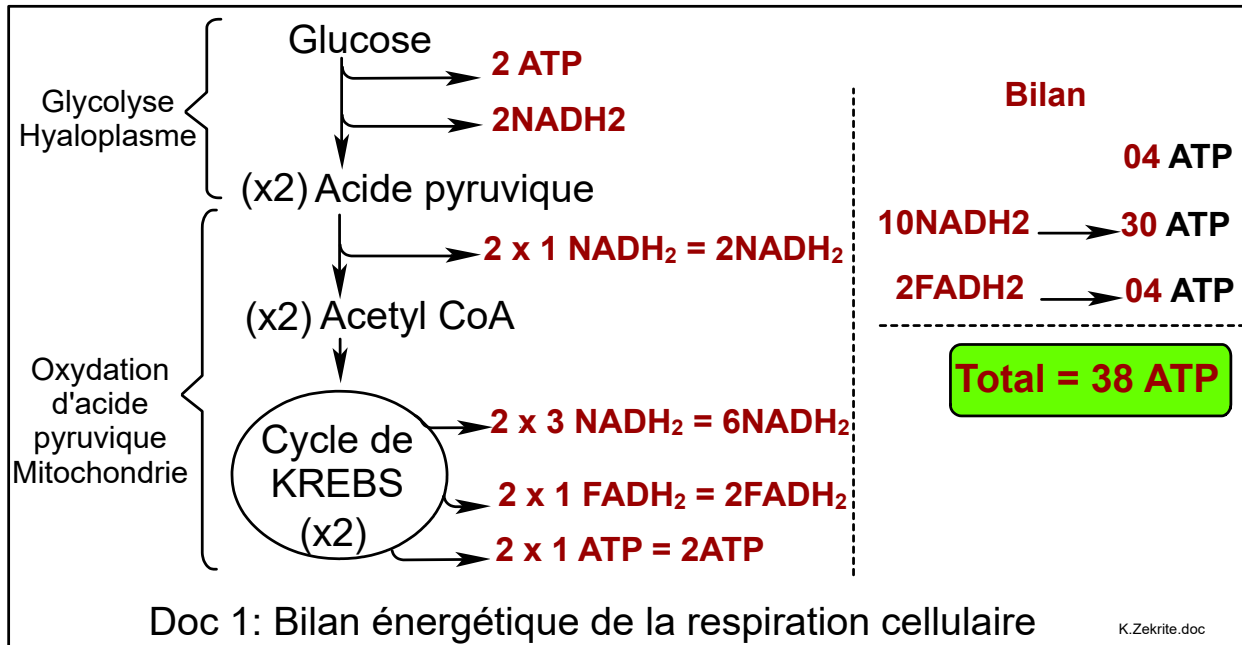
Réponses

- ◆ Les transporteurs réduits (NADH , H^+ et FADH_2) issus de la glycolyse et du cycle de Krebs et stocké dans la matrice mitochondriale, cèdent leurs deux électrons à un système de transporteurs qui, par une cascade de réactions d'oxydo-réduction, amène ces électrons jusqu'à l'accepteur final, l'oxygène moléculaire qui se réduit en molécule d'eau.
- ◆ L'énergie cédée au cours du transfert d'électrons est exploitée pour pomper les protons H^+ de la matrice vers l'espace inter membranaire ce qui engendre un gradient de concentration de part et d'autre la membrane interne mitochondriale.
- ◆ La membrane interne est imperméable aux protons sauf au niveau des sphères pédonculées. L'énergie du gradient est exploitée lors du retour des protons vers la matrice, traversant l'ATP synthase, pour activer la synthèse de l'ATP ($\text{ADP} + \text{P}_i \rightarrow \text{ATP}$).
- ◆ La phosphorylation de l'ADP est couplée à l'oxydation des transporteurs d'électrons. C'est pour cela qu'on parle de « **phosphorylation oxydative** » ou « **oxydation phosphorylante** ».
- ◆ L'oxydation d'une mole de NADH , H^+ donne l'énergie nécessaire à la synthèse de 3 moles d'ATP.
- ◆ L'oxydation d'une mole de FADH_2 donne l'énergie nécessaire à la synthèse de 2 moles d'ATP.

Activité 7 : Bilan énergétique de la respiration cellulaire

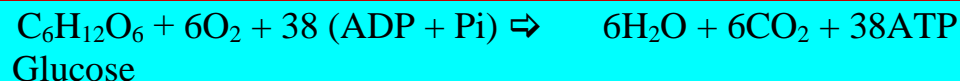
Au cours des différentes étapes de la respiration cellulaire, la cellule gagne des molécules d'ATP :

- Quel est le rendement en ATP et la réaction globale de l'oxydation de chaque mole de glucose pendant la respiration ?



➤ **Calculer** le nombre total de molécules d'ATP produites par une mole de glucose au cours de la respiration cellulaire.

Le bilan de la respiration cellulaire :



La respiration est une oxydation complète du glucose qui s'accompagne de la synthèse de **36 à 38 ATP** avec des résidus minéraux (H_2O et CO_2)

Remarque :

Théoriquement, l'oxydation complète d'une molécule de glucose produit 38 ATP, mais en fait, et à l'exception des cellules cardiaques et hépatiques (du foie), les autres cellules produisent 36 molécule d'ATP seulement. En effet, les 2 molécules de NADH_2 formées dans l'hyaloplasme pendant la glycolyse, ne peuvent pas traverser la membrane mitochondriale, ce qui empêche leur réoxydation ainsi ils sont remplacés par 2 molécules de FADH_2 .

Fermentation lactique :



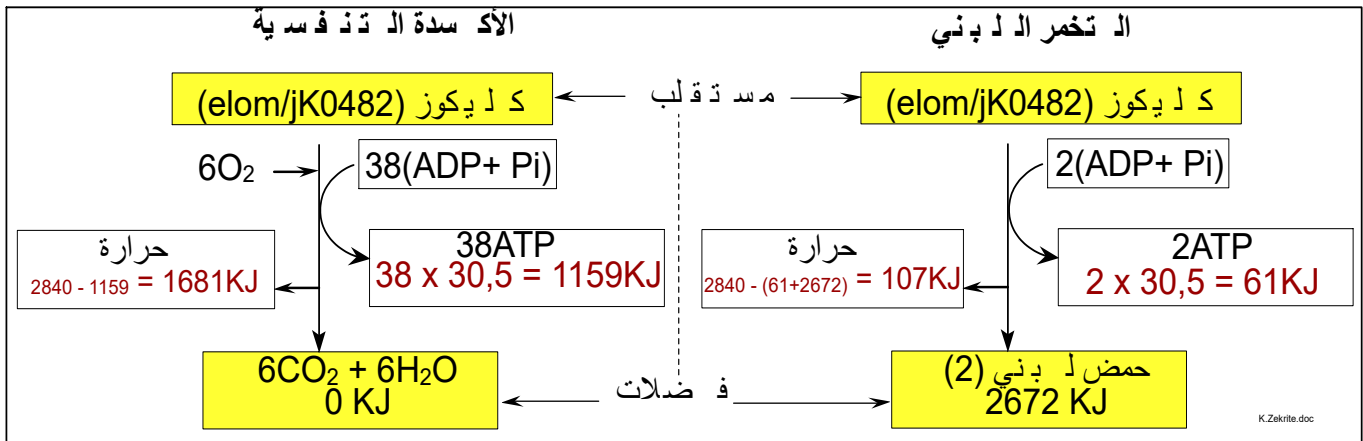
Le bilan énergétique de la fermentation est **2 molécules d'ATP** (ceux de la glycolyse), lors de la dernière phase de la fermentation, il n'y a pas de supplément d'ATP.

L'importance de cette phase réside dans **la réoxydation du NADH, H⁺** pour renouveler NAD⁺ indispensable à la continuation de la glycolyse. Il faut noter que la quantité des transporteurs d'électrons est faible dans la cellule, et que toutes ces réactions sont couplées.

Activité 9 : Comparaison du rendement énergétique de la fermentation et de la respiration cellulaire

La respiration et la fermentation sont deux voies métaboliques de production d'énergie
 - Parmi ces deux voies quelle est la plus rentable ?

Doc 1 : Comparaison du rendement de la respiration et de la fermentation.



1 Calculer l'énergie potentielle contenue dans les molécules d'ATP produites par une mole de glucose lors de la respiration et de la fermentation, **Déduire** l'énergie perdue sous forme de chaleur. Tenir compte des données suivantes :

- ↳ L'hydrolyse d'une mole d'ATP libère 30,5 KJ
- ↳ L'énergie potentielle d'une mole de glucose est de 2840 KJ.

2 Sachant que le rendement représente le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie qu'il a fallu pour la produire, **calculer**, en pourcentage le rendement énergétique de la fermentation et de la respiration.

3 **Comparer** le bilan et le rendement énergétique des deux voies métaboliques, **expliquer** la différence observée.

4 **Comparer** sous forme d'un tableau les données des deux voies métaboliques. **Conclure**.

Réponses

1 Voir figure.

2 **Rendement énergétique de la fermentation et de la respiration :**

	Fermentation	Respiration
Rendement énergétique R		
$R = \frac{\text{énergie produite}}{\text{énergie utilisée}} \times 100$	$R = \frac{61}{2840} \times 100 = 2,14\%$	$R = \frac{1159}{2840} \times 100 = 40,8 \%$

③ Comparaison du bilan et du rendement énergétique des deux voies métaboliques et explication de la différence observée

- A partir d'une molécule de glucose, la cellule synthétise, au cours de la respiration 36 à 38 ATP, cependant le bilan énergétique de la fermentation est plus faible, se réduit à 2 ATP.
- Cette différence résulte du fait que la respiration provoque *la dégradation complète* du glucose (déchets minéraux sans valeur énergétique) alors que la fermentation provoque *la dégradation est partielle*, le résidu organique (acide lactique ou éthanol) est encore riche en énergie.
- Le rendement énergétique de la respiration (40%) est supérieur à celui de la fermentation (2%).
- L'énergie potentielle est partiellement transférée à des molécules d'ATP ; tandis que le reste est convertie en chaleur, forme d'énergie perdue non utilisable par les cellules.

④ Comparaison entre la respiration et la fermentation.

Métabolisme	Respiration	Fermentation lactique
Métabolite	Glucose : $C_6H_{12}O_6$	Glucose : $C_6H_{12}O_6$
Conditions	Aérobie (O_2)	Anaérobie (sans O_2)
Lieu de la cellule	Hyaloplasme + mitochondrie	Hyaloplasme
Résidus	$CO_2 + H_2O$: 0Kj	Acide lactique : riche en énergie
Nombre d'ATP produit	36 à 38 ATP	2 ATP

Bilan

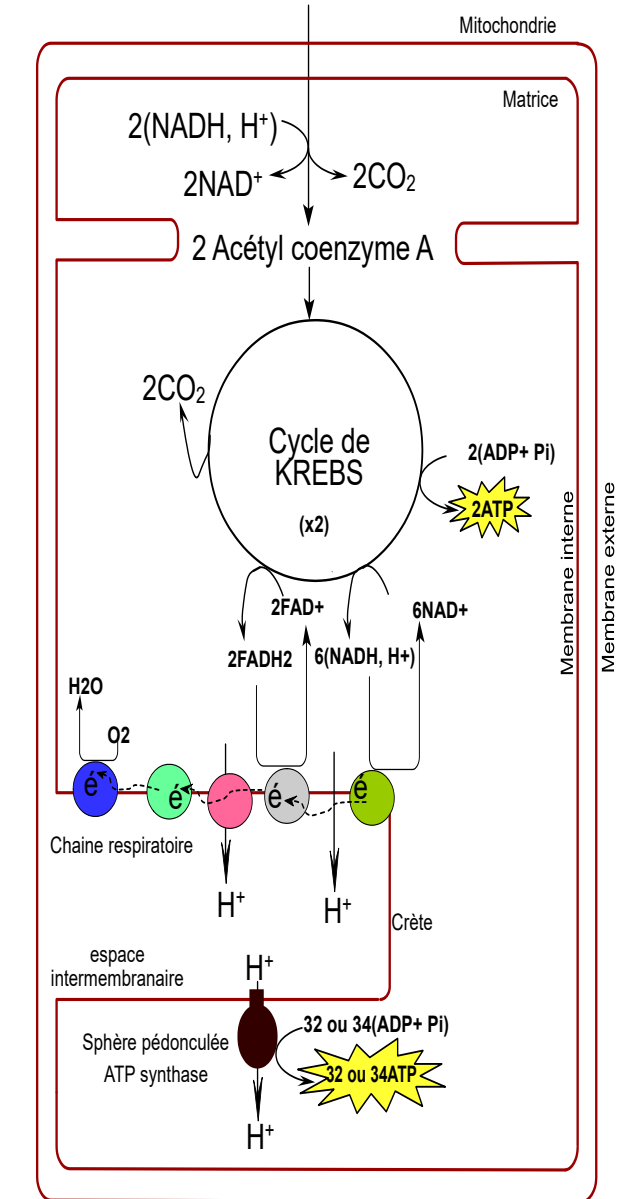
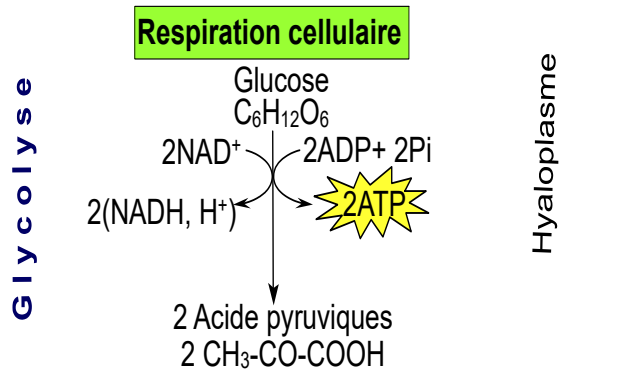
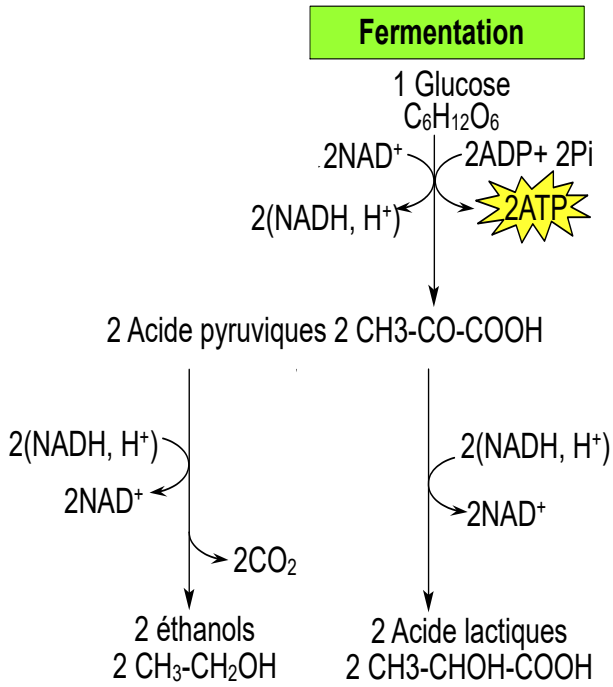
La respiration cellulaire est un phénomène cellulaire responsable de *la dégradation complète du glucose en présence d' O_2* en libérant des déchets minéraux sous forme de CO_2 et H_2O et aboutissant à la formation d'une *grande quantité d'énergie* stocké dans les molécules d'ATP. La respiration cellulaire est une voie métabolique aérobie

La fermentation est un phénomène cellulaire responsable de *la dégradation partielle du glucose en absence d' O_2* en libérant des déchets organiques et aboutissant à la formation d'une *faible quantité d'énergie* stocké dans les molécules d'ATP. La fermentation cellulaire est une voie métabolique anaérobie.

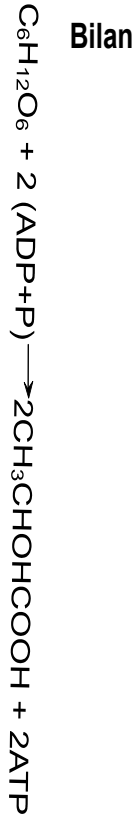
Schémas bilan des activités

Compléter le schéma

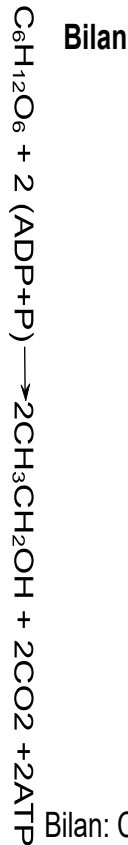
Bilan de la consommation de la matière organique et libération de l'énergie



Fermentation alcoolique



Fermentation lactique



Oxydation incomplète

Oxydation complète

Chapitre 2 : Le rôle du muscle squelettique dans la conversion de l'énergie

La molécule énergétique universelle dans la cellule est l'ATP. Les muscles squelettiques, constitués de cellules musculaires, se contractent et sont à l'origine du maintien de la posture et des mouvements des différentes parties du corps. Au sein des cellules musculaires il existe donc une conversion de l'énergie chimique de l'ATP en énergie mécanique.



Questions posées

- ◆ Quelle sont les manifestations de la contraction musculaires ?
→ **Activité 1 et 2.**
- ◆ Quels sont les structures qui permettent au muscle strié squelettique de se contracter ?
→ **Activité 3.**
- ◆ Comment l'énergie chimique de l'ATP est convertie par le muscle en énergie mécanique ?
→ **Activité 4.**
- ◆ Comment la cellule musculaire renouvelle ses molécules d'ATP ?
→ **Activité 5.**

Les muscles squelettiques striés ont pour fonction d'assurer la motricité du corps dans son environnement, en permettant de faire bouger le squelette. Ils sont caractérisés par la présence de stries en microscopie.

Les manifestations mécaniques de l'activité musculaire du muscle strié squelettique

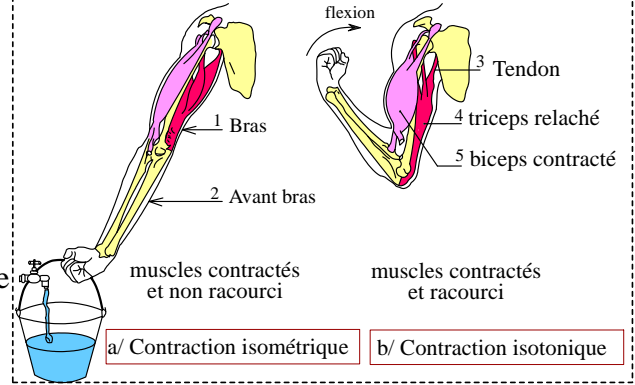
Les muscles squelettiques striés se contractent en réponse à une activité volontaire ou à une excitation externe, ainsi ils assurent la posture de l'organisme et des mouvements multiples.

- Comment peut – on enregistrer les contractions musculaires ?
- Comment le muscle réagit-il à des excitations d'intensités différentes ?

I/ Enregistrement des contractions musculaires

Doc 1 : Le muscle se caractérise par deux dimensions : la longueur et la tension. Il existe deux types de contractions :

- **Contraction isométrique** (longueur constante) : le muscle se contracte : durcit, sa tension augmente sans que sa longueur diminue. Ex muscles qui maintiennent la posture.
- **Contraction isotonique** (tension constante) : le muscle se raccourcit, durcit sans que sa tension augmente. Ex les muscles qui font un mouvement.



Doc 2 : Technique expérimentale d'enregistrement d'une contraction isotonique

- Une grenouille est décérébrée et déméduillée et posée sur une planchette, le genou est immobilisé.
- On dégage le nerf sciatique et le muscle Gastrocnémien (fig a).

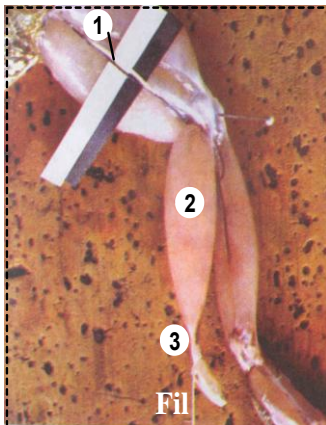
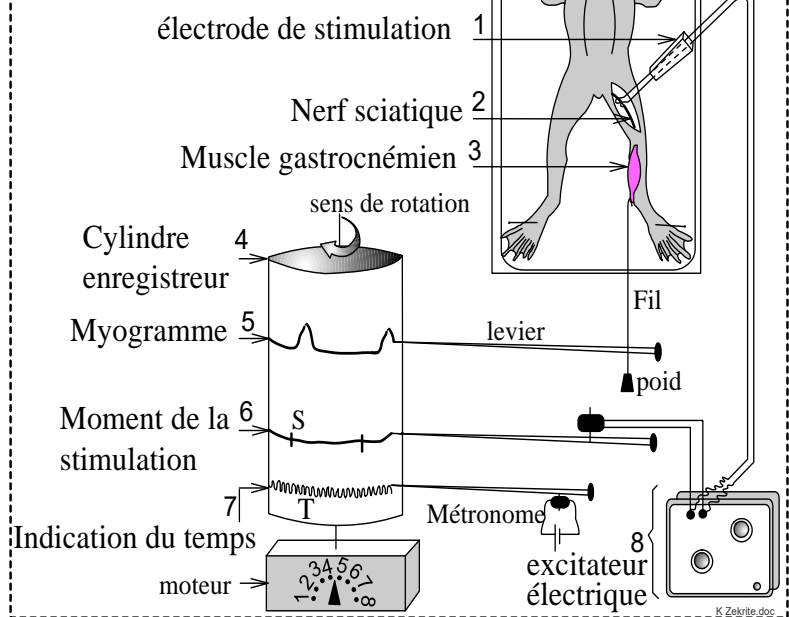


Fig (a): Patte de grenouille

- 1 nerf sciatique
- 2 muscle gastrocnémien
- 3 Tendon

Fig b: Dispositif expérimental pour l'enregistrement de la contraction musculaire



- On sectionne le tendon inferieur du muscle et on le relie à un appareil d'enregistrement appelé myographe (fig b)
- Des électrodes excitatrices sont placées sur le nerf sciatique.
- On déclenche une (ou plusieurs) excitation électrique dont l'intensité et la fréquence est réglables
- On enregistre sur le cylindre enregistreur la (les) contraction musculaire sous forme d'une secousse musculaire = myogramme

1 Annoter le schéma du document 1.

2 Annoter le schéma du document 2 et expliquer brièvement le principe d'enregistrement de la contraction musculaire.

Chez un animal décérébré et déméduillé (à qui on a détruit l'encéphale et la moelle épinière), l'ensemble des organes autres que l'encéphale demeurent en vie, le cœur bas, le sang circule. Cependant l'animal est mort.

Réponses

① Voir figure, à signaler, le biceps et le triceps sont deux *muscles antagonistes*.

② - Pour enregistrer le phénomène mécanique de la contraction musculaire on se sert d'un appareil nommé myographe. Ce dernier est constitué d'un système d'excitation et d'un système d'enregistrement.

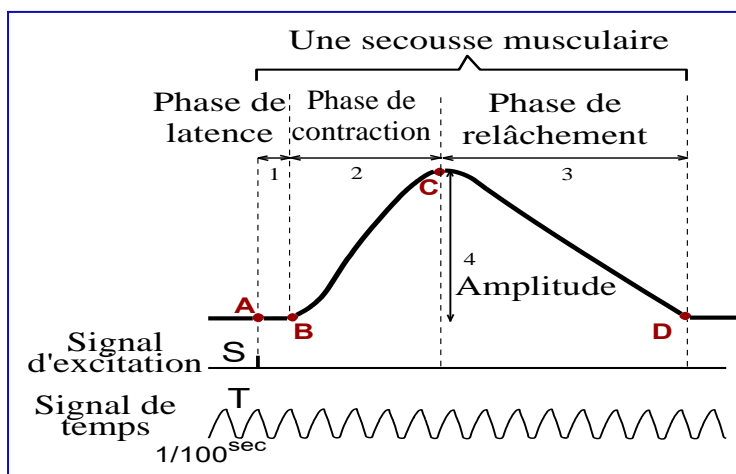
- Pendant que le muscle reste *au repos*, le levier inscripteur marque sur le cylindre enregistreur en mouvement, une *ligne droite*.

- Si le muscle *se contracte* et se relâche la ligne droite devient *une courbe* qu'on nomme myogramme = secousse musculaire et qui rend visible la manière dont le muscle s'est contracté.

Remarque : si le cylindre enregistreur n'est pas en mouvement, le myogramme est réduit à un trait oblique.

II/ Les enregistrements de la contraction musculaires

1/ Réponse du muscle à une seule excitation efficace



Suite à une excitation efficace, on enregistre une secousse musculaire isolée composée de trois étapes :

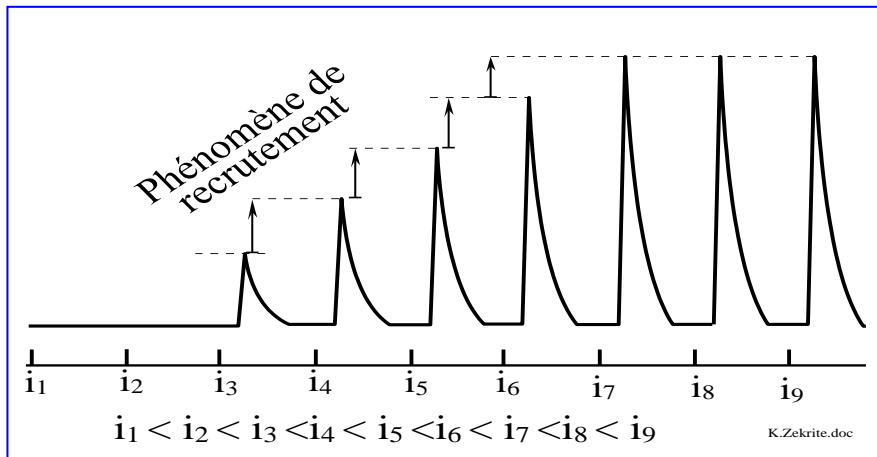
- La phase de latence (AB) : elle correspond à la durée entre le moment de l'excitation et le moment du début de la réponse, c'est le temps nécessaire à l'arrivée de l'influx nerveux au muscle.

- La phase de contraction (BC) : C'est l'intervalle de temps entre le début du raccourcissement et le maximum de raccourcissement.

- La phase de relâchement (CD) : au cours de laquelle le muscle reprend ses dimensions initiales, sa durée est légèrement supérieure à celle de la contraction.

2/ Réponse du muscle à des excitations éloignées d'intensité croissante.

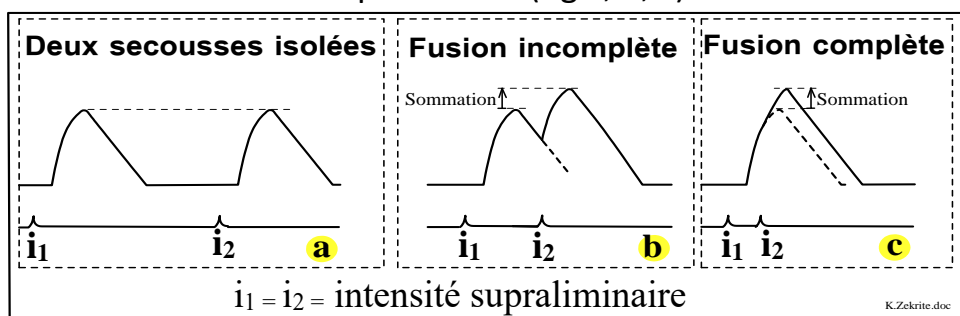
On excite le muscle par des excitations d'intensité croissantes espacées dans le temps de façon que chacune d'elle atteigne le muscle après son relâchement.



- ✱ Les stimulations inférieures au seuil d'excitation électrique (inférieures à la rhéobase) comme i_1 et i_2 ne donnent pas de réponse.
- ✱ Les stimulations dont l'intensité est égale ou supérieure à la rhéobase donnent une réponse, elles sont dites efficaces.
- ✱ Lorsque l'intensité de l'excitation augmente, l'amplitude de la réponse s'accroît jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur maximale qui ne peut être dépassée même si l'intensité de la stimulation continue à augmenter. L'augmentation de l'amplitude est expliquée par le **phénomène de recrutement** : le nombre de fibres musculaires augmente en fonction de l'augmentation de l'intensité de l'excitation. Lorsque toutes les fibres musculaires sont excitées, l'amplitude est alors maximale et reste constante :

3/ Réponse du muscle à deux excitations successives de même intensité.

On excite le muscle par deux excitations efficaces successives de même intensité (115mv) séparées par un intervalle de temps variable (fig a, b, c).



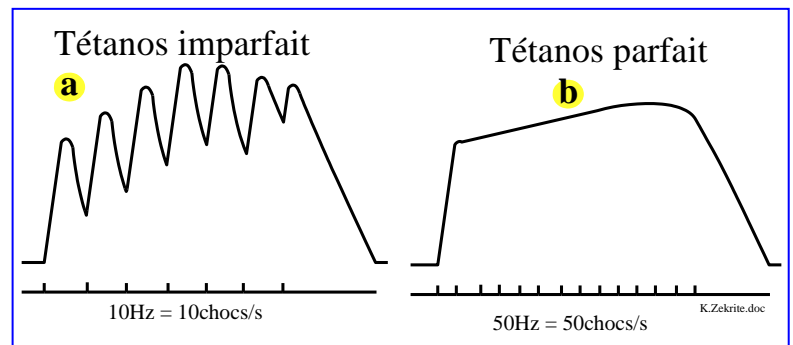
- Lorsqu'on soumet le muscle à deux excitations efficaces successives, on obtient :
- **Deux secousses distinctes** de même amplitude : si la deuxième excitation atteint le muscle après la phase de relâchement.
 - **Une fusion incomplète des deux secousses** avec une sommation : si la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de relâchement.
 - **Une fusion complète des deux secousses en une seule** avec une sommation : Si la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de contraction.

- Si la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de latence, le muscle ne répond pas à la deuxième excitation

4/ Réponse du muscle à une série d'excitations identiques de fréquence variable.

On excite le muscle par une série d'excitations efficaces de même intensité (500mv) avec un rythme variable :

- chaque excitation arrive au muscle pendant la phase de relâchement de la secousse précédente (Fig a)
- chaque excitation arrive au muscle pendant la phase de contraction de la secousse précédente (Fig b)

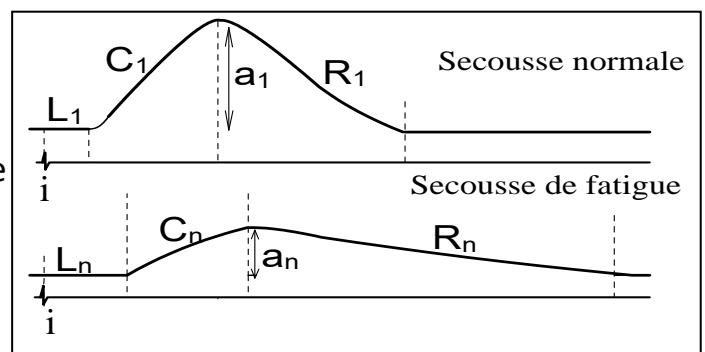


Lorsqu'on soumet le muscle à des excitations répétées de même intensité, il se téétanise, on dit que le muscle est **tétanisable**, en effet on obtient :

- **Un téétanos imparfait** : lorsque chacune des excitations atteint le muscle pendant la phase de relâchement.
- **Un téétanos parfait** : lorsque chacune des excitations atteint le muscle pendant la phase de contraction.

5/ Fatigue musculaire

On excite le muscle par plusieurs excitations de grande fréquence, la figure suivante représente la première secousse normale et la dernière secousse (secousse de fatigue)



Quand un muscle subit un grand nombre d'excitations successives, il se fatigue, on dit que le muscle est **fatigable**.

La fatigue musculaire se manifeste par :

- **Une diminution de l'amplitude**.
- **Une augmentation de la durée** des différentes phases de la secousse et de la durée totale de la secousse.

Bilan

Le muscle squelettique strié est caractérisé par les caractéristiques suivantes : **excitable**, **conductible**, **contractile**, **tétanisable** et **fatigable**.

Les manifestations thermiques de la contraction musculaire

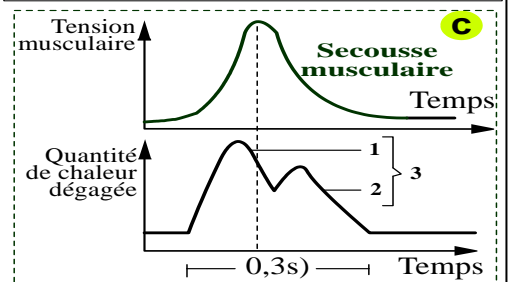
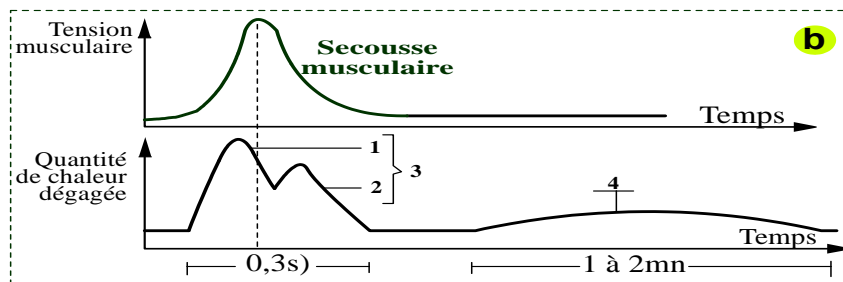
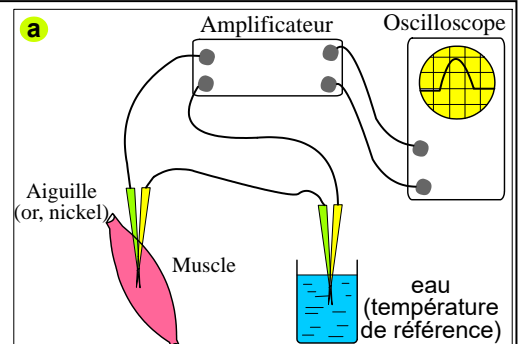
En plus des phénomènes mécaniques, la contraction musculaire s'accompagne de phénomènes thermiques.

- **Comment évaluer ces phénomènes thermiques et quelles sont leur origine ?**

Doc 1 : Fig (a) Montage expérimental pour mesurer le dégagement de chaleur.

Fig (b) dégagement de chaleur par un muscle placé dans un milieu riche en oxygène.

Fig (c) dégagement de chaleur par un muscle placé dans un milieu pauvre en oxygène.



- 1- Chaleur de contraction
- 2- Chaleur de relâchement
- 3- Chaleur initiale
- 4- Chaleur retardée

① **Dégager**, de la fig (b) les types de chaleur dégagés par le muscle en activité mis dans un milieu aérobie, **décrire** les caractéristiques de chacune d'elle.

② **Comparer** le dégagement de chaleur par le muscle en milieu aérobie et anaérobie (fig b et c). **Que peut-on déduire** en ce concerne l'origine des chaleurs produites.

Réponses

① Au cours d'une activité musculaire, le muscle dégage la chaleur en deux temps :

- **La chaleur initiale** : libéré au cours de la secousse musculaire pendant une courte durée mais en grande quantité, une partie est libérée au cours de la phase de contraction et l'autre partie au cours de la phase de relâchement.
- **La chaleur retardée** : se dégage après la secousse musculaire. Elle est d'intensité faible mais elle dure plus longtemps.

② En absence d'oxygène, la chaleur initiale persiste alors que la chaleur retardée disparaît.

Le dégagement de chaleur au cours de la contraction musculaire en deux temps confirme que le muscle est le siège de deux séries de réactions chimiques exothermiques (productrices d'énergie) :

- Des réaction anaérobie : origine de la chaleur initiale.
- Des réaction aérobie : origine de la chaleur retardée. (voir les détails ultérieurement : phénomène chimique et renouvellement de l'ATP)

Remarque : Seule une portion de l'énergie libérée par la contraction musculaire est convertie en travail utile le reste est transformé en chaleur, ce qui doit être pris en compte dans le maintien de la température de l'organisme.

Structure et ultrastructure du muscle strié squelettique

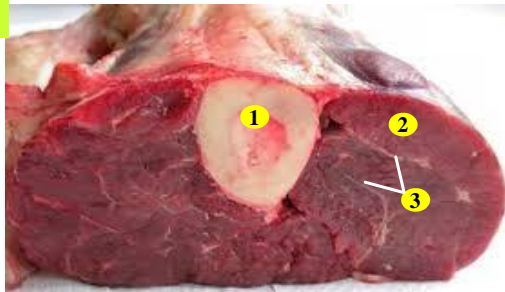
La contractibilité est une aptitude qui rend le muscle si différent de tous les autres tissus.

- Quelles sont les caractéristiques structurales qui permettent au muscle de se contracter ?

I/ La structure du muscle

Doc 1 : Structure du muscle : Observation à l'œil nu et au microscope optique

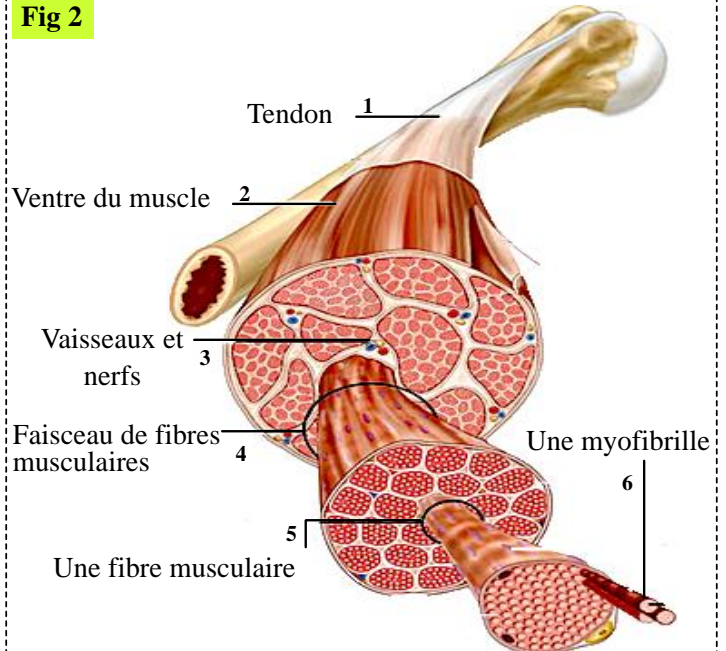
Fig 1



1 Os 2 Muscle 3 Tissu conjonctif

Coupe transversale dans une jambe de bœuf

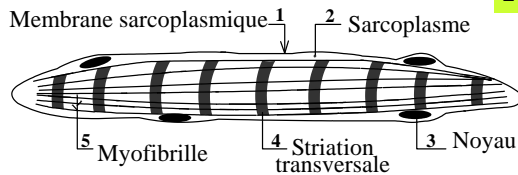
Fig 2



Tendon 1
 Ventre du muscle 2
 Vaisseaux et nerfs 3
 Faisceau de fibres musculaires 4
 Une fibre musculaire 5
 Une myofibrille 6

Coupe longitudinale du muscle squelettique avec détails structuraux

Fig 3



Dimensions - Longueur: quelques mm à plusieurs décimètres
 - Diamètre: 10 à 100µm

Schémas de la structure de la fibre musculaire

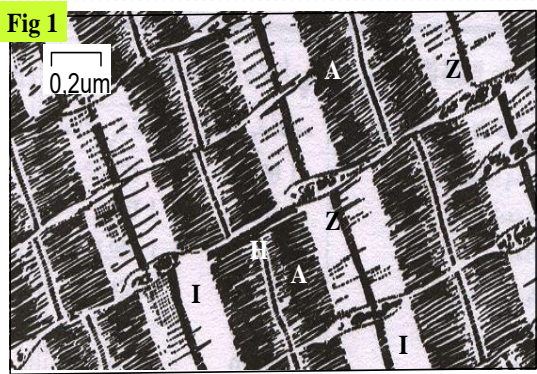
↳ Annoter les différentes figures, puis *décrire* la structure du muscle et *justifier* l'expression « muscle strié squelettique ».

Activité 3 I/ Exploitation des documents

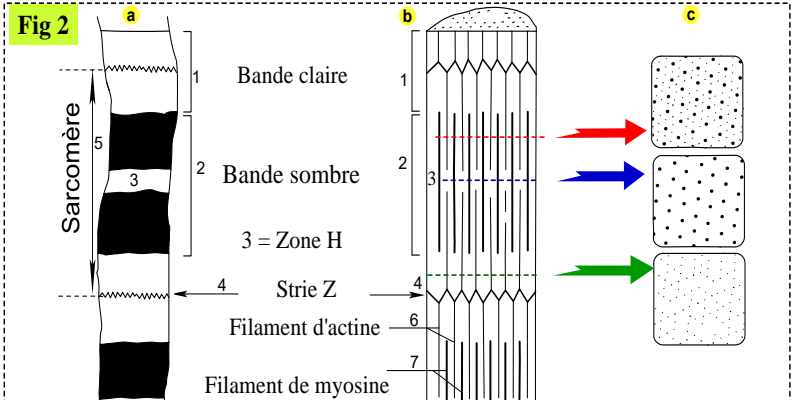
- Le muscle squelettique est constitué de plusieurs *faisceaux de fibres* musculaires entourés par *des membranes conjonctives* qui s'unissent pour former *les tendons* qui attachent le muscle aux os.
- *Une fibre musculaire* est une cellule géante qui possède plusieurs noyaux disposés en périphérie. Le cytoplasme de la fibre appelé *sarcoplasme* est occupé presque totalement par des *myofibrilles* (fibrilles musculaires) s'étendant sur toute la longueur de la fibre, ce qui donne à la fibre une striation longitudinale.
- La fibre musculaire présente une striation transversale très caractéristique qui est à l'origine du nom « *muscle strié squelettique* » que l'on donne aux muscles rattachés au os et responsables des mouvements.

II/ Ultrastructure de la fibre musculaire

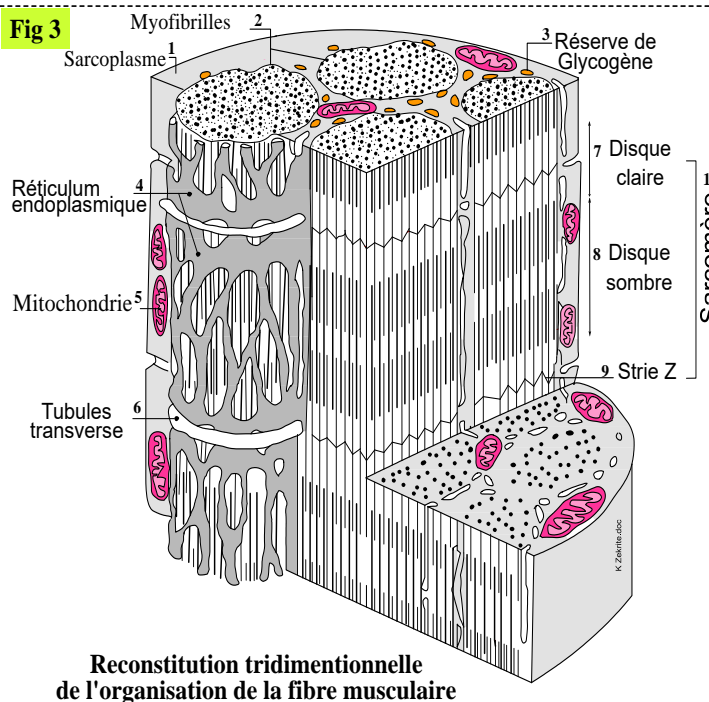
Doc 2 : Ultrastructure de la fibre musculaire : Observation au microscope électronique



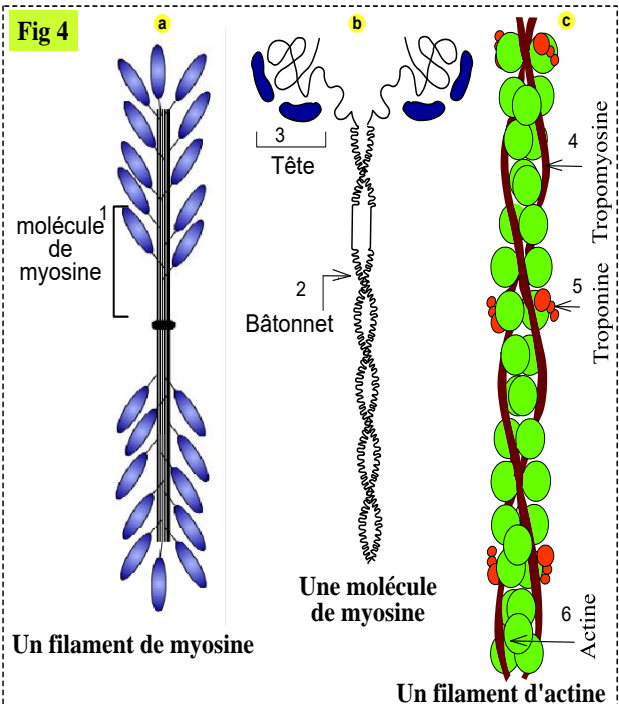
Coupe longitudinale de la fibres musculaires observées au microscope électronique



Coupe schématique longitudinale d'une myofibrille (a) et (b)
Coupe schématique transversale d'une myofibrille (c)



Reconstitution tridimensionnelle de l'organisation de la fibre musculaire



Un filament de myosine

Une molécule de myosine

Un filament d'actine

👉 Annoter les différentes figures.

👉 Décrire la structure du muscle de l'échelle de la fibre musculaire à l'échelle moléculaire.

Description de la structure du muscle de l'échelle de la fibre musculaire à l'échelle moléculaire.

👉 La myofibrille est constituée par une alternance de **bandes claires I** (Isotropique) et de **bandes sombres A** (Anisotropique). Chaque bande claire est traversée au milieu par **une strie Z** (de l'allemand *zwischen*, signifiant "entre"). Chaque bandes sombre est occupée en son milieu par **une zone H** (de l'allemand *heller*, plus pâle).

👉 La zone séparant deux stries Z successives constitue **le sarcomère** qui représente l'unité structurale et fonctionnelle de la fibre musculaire. Une myofibrille est donc constituée d'une suite de sarcomères.

- ↳ Au sein de chaque myofibrille on distingue deux types de myofilaments :
- *Myofilaments fins d'actines* : constituées de 3 catégories de protéines : *la tropomyosine, la troponine* et essentiellement de *l'actine*.
 - *Myofilaments épais* : sont des faisceaux d'environ 200 molécules de *myosines*. Chaque molécule de myosine a la forme d'un bâtonnet (tige) terminé par deux têtes. Les tiges se collent les unes aux autres pour former le myofilament épais, tandis que les têtes font saillie latéralement tout autour du myofilament.
- ↳ Au niveau de la bande sombre, il y'a des filaments fins et des filaments épais. La bande claire contient des filaments fins seulement. La zone H contient les filaments épais uniquement. La zone Z est le lieu de rencontres des filaments fins de deux sarcomères voisins.
- ↳ Le sarcoplasme est très riche en *mitochondries*, en *réticulum endoplasmique* (réservoir de calcium) entourant les myofilaments. Il contient une quantité importante de *glycogène* et de *myoglobine* (protéine qui transporte l'O₂ en se fixant avec).

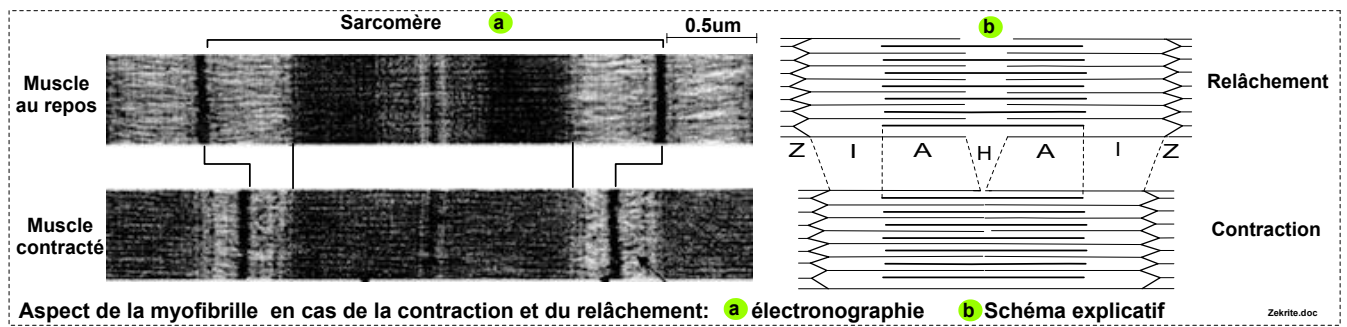
Mécanisme de la contraction musculaire

La fibre musculaire est constituée de la répétition de sarcomères constituées essentiellement d'actine et de myosine. La contractibilité du muscle serait la résultante du raccourcissement des sarcomères.

- Comment les éléments du sarcomère interviennent dans le mécanisme de la contraction musculaire
- Comment l'ATP intervient dans la contraction à l'échelle moléculaire ?

I/ Aspects et conditions de la contraction musculaire

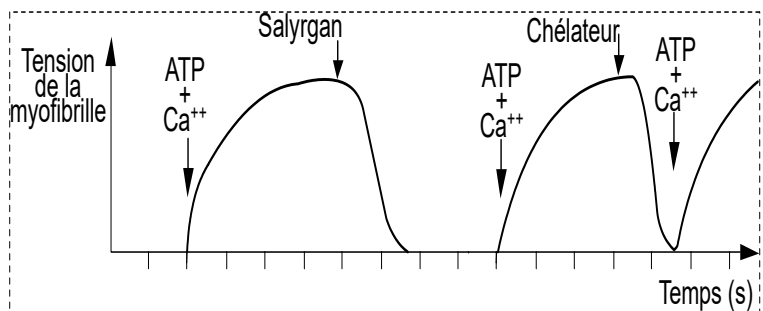
Doc 1 : Aspects de la contraction musculaire



Doc 2 : Besoins de la contraction musculaire

Des fibres musculaires isolées sont mis dans un montage qui permet de déterminer leur force de contraction (tension) dans différentes conditions :

- **Expérience a** : en présence ou en absence de salyrgan : poison qui bloque l'hydrolyse de l'ATP.
 - **Expérience b** : en présence ou en absence d'un chélateur de calcium : substance qui se fixe sur le calcium et empêche son action
- Les résultats des expériences sont présentées ci-contre.



Doc 3 : Rôle des ions calcium dans la contraction musculaire

Lorsque le muscle est au repos, la tropomyosine (liée à la troponine) cache le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine. Lors d'une excitation efficace, les ions Ca⁺⁺ se libèrent du réticulum endoplasmique de la fibre musculaire. Une fois libres dans le sarcoplasme musculaire, ces ions Ca⁺⁺, se fixent sur la troponine celle-ci change de conformation et déplace la tropomyosine, ce qui libère le site de fixation des têtes de myosine, un complexe acto-myosine (pont) se forme alors.

- 1 **Comparer** l'aspect des sarcomères au repos et en état de contraction (doc 1), **comment expliquer** cette modification de structure.
- 2 En exploitant le doc 2, **conclure** les exigences de la contraction musculaire.
- 3 **Résumer à partir** du doc 3 le rôle des ions dans la formation des ponts acto-myosine.

Réponses

- 1 Comparaison entre un sarcomère contracté et un sarcomère au repos montre que la contraction se traduit par :
 - Un raccourcissement des sarcomères : les stries Z se rapprochent.
 - une réduction de la longueur des bandes claires et de la zone H.

- Une constance de la longueur des bandes sombres.

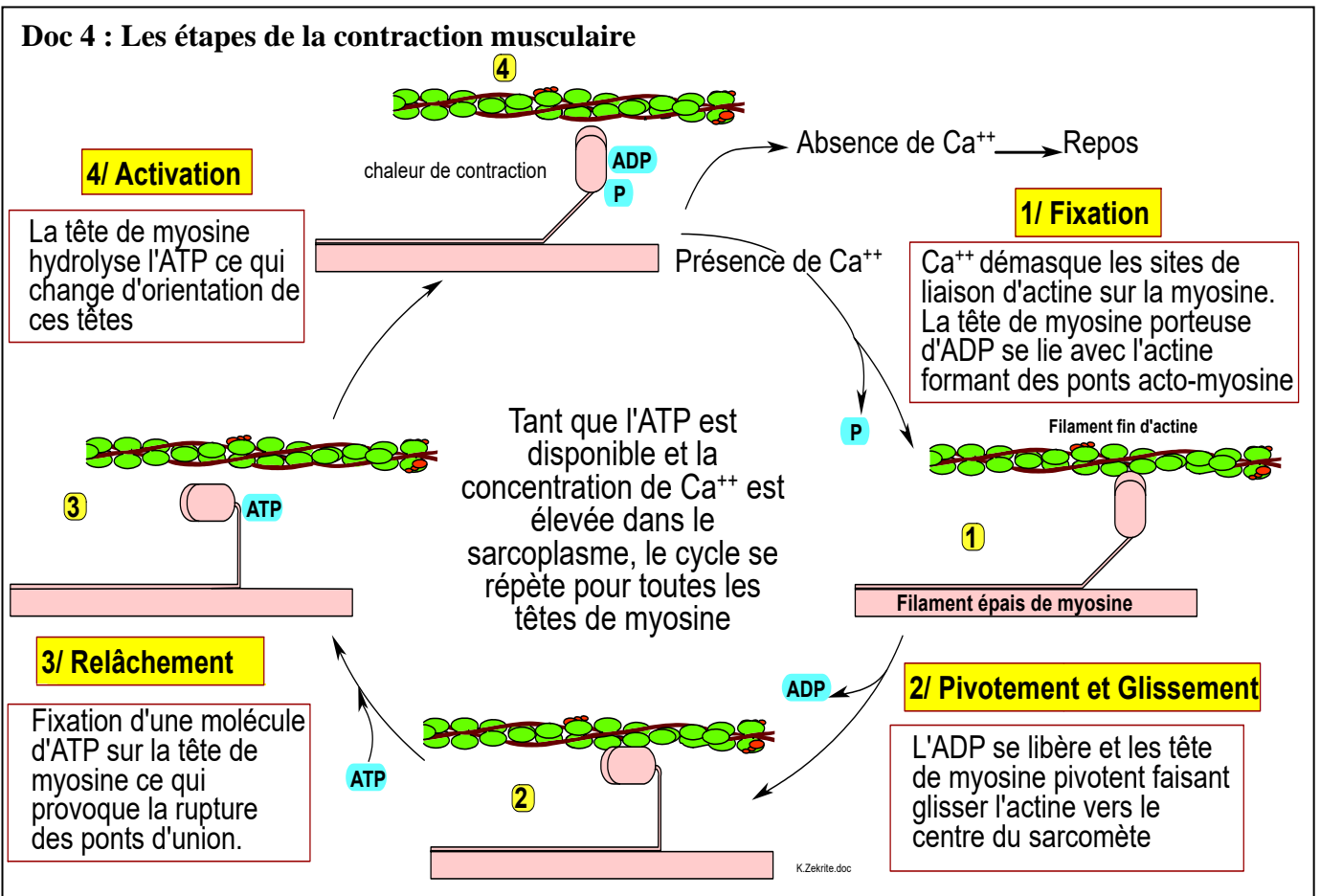
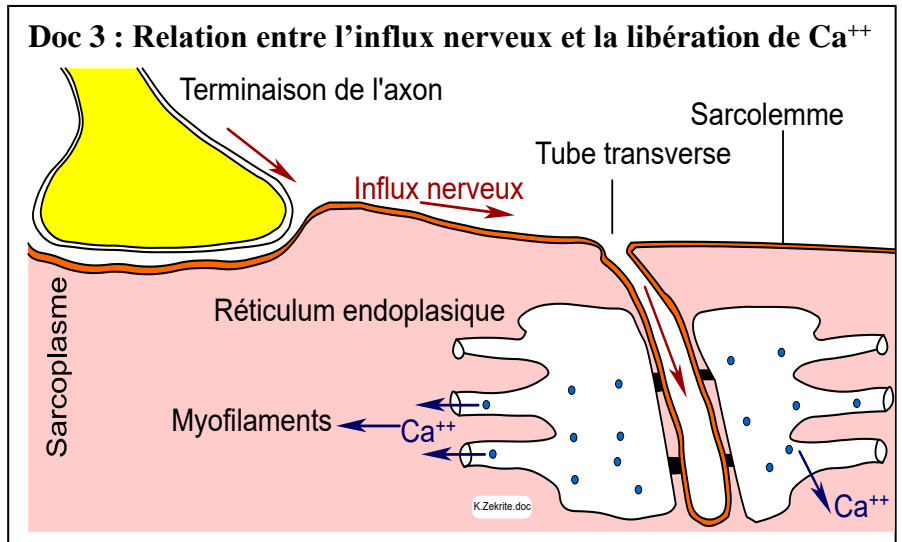
Ceci prouve qu'au cours de la contraction musculaire, les filaments d'actines et de myosine ne changent pas de dimension, mais il y'a un glissement des myofilaments d'actine par rapport aux myofilaments de myosine, ce glissement provoque le raccourcissement des sarcomères et par conséquent le raccourcissement des fibres musculaire : C'est la théorie des filaments glissants.

② La contraction musculaire nécessite la présence d'ATP et d'ions Ca^{++}

③ Les ions Ca^{++} démasquent le site de fixation de l'actine sur la tête de myosine, il se forme alors un complexe appelé complexe actine-myosine = ponts actine-myosine

II/ Mécanisme de la contraction musculaire

↪ En exploitant les doc 3 et 4, **élaborer un texte** simple décrivant le mécanisme de la contraction musculaire suite à l'arrivée d'un influx nerveux et **montrer** le rôle du muscle dans la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique.



Réponses

● Le mécanisme de la contraction musculaire suite à l'arrivée d'un influx nerveux :

La contraction musculaire nécessite la présence des molécules d'ATP et des ions Ca^{++} . Elle s'effectue suivant les étapes suivantes :

↪ En cas de repos, les filaments d'actines sont détachés des filaments de myosine. La tête de myosine porte une molécule d'ADP et de Pi. (Étape 4 du doc 3).

↪ L'arrivée de l'influx nerveux au sarcolemme de la fibre musculaire, provoque la libération des ions Ca^{++} par le réticulum sarcoplasmique et leur transfert dans le sarcoplasme.

↪ Les ions Ca^{++} se fixent sur la troponine, ce qui déplace la tropomyosine, les sites de liaison de l'actine sur la myosine sont alors exposés.

↪ Ainsi, La tête de myosine porteuse d'ADP et Pi se lie avec l'actine, permettant la formation d'un pont acto-myosine.

↪ Le départ du Pi puis de l'ADP entraîne le pivotement de la tête de myosine $90^\circ \rightarrow 45^\circ$ (état désactivé de la myosine).

↪ Ce pivotement permet le glissement des filaments d'actine vers le centre du sarcomère et donc le raccourcissement de ce dernier (contraction).

↪ Le complexe actine myosine reste stable (complexe de rigidité), et seul l'union de la tête de myosine avec une molécule d'ATP, permet la rupture de cette liaison. En effet les phénomènes se déroulent comme suit : une molécule d'ATP se fixe sur la tête de myosine lié à l'actine, ce complexe a le pouvoir d'une enzyme ATP^{ase} qui catalyse l'hydrolyse de l'ATP, l'énergie libérée active la tête de myosine qui s'oriente perpendiculairement à l'axe du filament d'actine, ainsi la myosine se détache de l'actine progressivement. L'actine revient alors passivement à son état initial : état de relâchement. D'autre part la tête de myosine reste fixé à la molécule d'ADP et de Pi (état de repos)

↪ Un autre cycle commence tant que les ions Ca^{++} sont disponibles par des concentrations convenables.

↪ Lorsque les excitations s'arrêtent, il y'a retour actif des ions Ca^{++} vers le réticulum sarcoplasmique, le cycle contraction /relâchement s'arrête alors.

↪ En absence d'ATP, les têtes de myosine restent fixées sur l'actine, ce qui explique la rigidité cadavérique après la mort de l'organisme (التيبس الجثي).

↪ En absence des ions Ca^{++} , l'attachement de la myosine à l'actine est impossible, ce qui empêche la contraction.

Une partie de l'énergie libérée par l'hydrolyse de l'ATP est perdue sous forme de chaleur (chaleur initiale de contraction).

● Le rôle du muscle dans la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique.

la libération du Pi et d'ADP provenant de l'hydrolyse de l'ATP (énergie chimique) provoque un pivotement des têtes de myosine et un glissement d'actine (mouvement) donc la cellule musculaire a la capacité de la convention de l'énergie chimique (ATP) en énergie mécanique (mouvement). D'autre part une partie de l'énergie issue de l'hydrolyse d'ATP est dissipée sous forme de chaleur (chaleur initiale de contraction).

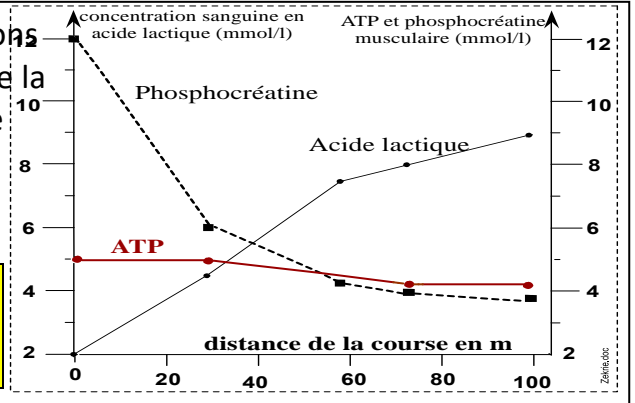
Renouvellement de l'ATP au cours de la contraction musculaire

Dans un muscle, les réserves en ATP sont faibles : 5mmol/kg de muscle. Ces réserves peuvent être épuisées après une contraction de quelques secondes. La régénération de l'ATP est donc obligatoire

- Comment l'ATP est-elle régénérée au niveau du muscle ? Quel sont les phénomènes chimiques qui interviennent ?

Doc 1 : Chez un coureur, on mesure les concentrations musculaires en ATP et en phosphocréatines, ainsi que la concentration sanguine en acide lactique, lors d'une course rapide (100m). le graphique suivant traduit les résultats obtenus.

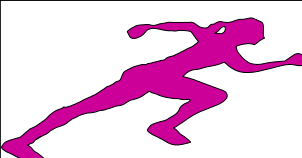



La phosphocréatine est un dérivé phosphorylé de la Créatine servant au stockage de l'énergie dans le muscle.



Doc 2: Evolution de quelques paramètres musculaire avant et après un effort physique de longue durée

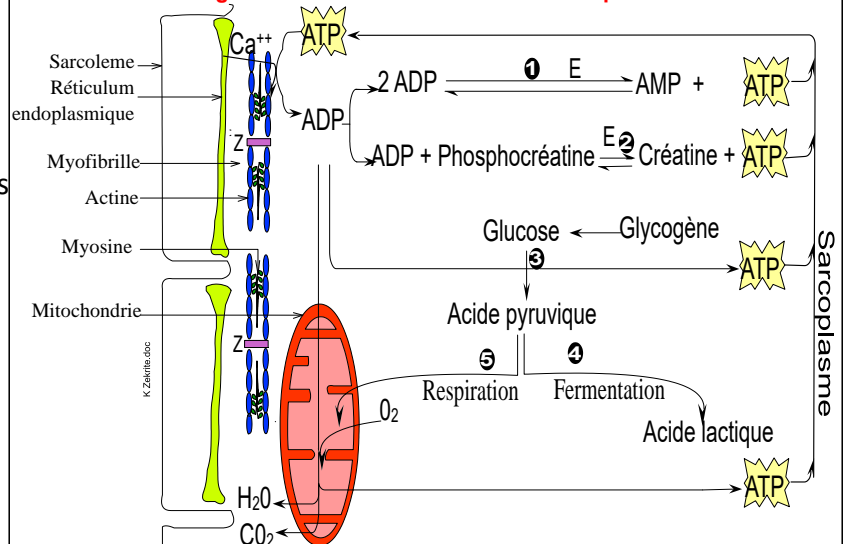
Mesures (en 1heure par kg du muscle)	Volume du sang traversant le muscle	Volume d'O ₂ utilisé par le muscle	Volume de CO ₂ rejeté par le muscle	Quantité de glucose utilisé par le muscle	Quantité de glycogène stockée dans le muscle
Muscle au repos	12,22L	0,30L	0,22L	2,04g	1,08g
Muscle en activité	56,32L	5,20L	5,95L	8,43g	0,80g

Doc 3: Les sources d'énergie au cours des exercices physiques de courte et de longue durée

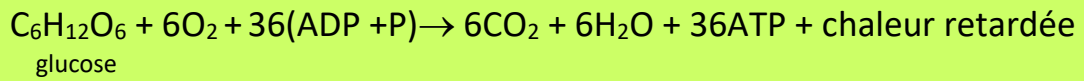
Exercice de courte durée				Exercice de longue durée	
					
6 secondes	10 secondes	30 à 40 secondes	Fin de l'exercice	heures	
Utilisation de l'ATP stocké dans le muscle	Synthèse d'ATP à partir de la phosphocréatine et de l'ADP	Production d'ATP par voie anaérobie lactique		Production d'ATP par voie aérobie	

- À partir de l'analyse du document 1, **montrer** que le muscle régénère son contenu en ATP et **dégager** les voies de ce renouvellement.
- Comparer** l'évolution des différents paramètres musculaires au repos et après l'activité musculaire. Que peut-on en **déduire** ?
- Utiliser le doc 3 pour **retrouver** la chronologie des ressources d'ATP au cours des activités musculaires.
- En exploitant toutes les données précédentes et le doc 4, **rédigé un texte** bilan expliquant les différentes voies de régénération d'ATP.

Doc 4: Voies de régénération de l'ATP et son utilisation par le muscle



■ La voie lente aérobie : lorsque l'activité musculaire se prolonge (dépasse une durée de 5mn), l'organisme accroit l'alimentation des muscles en O₂ la voie aérobie représentée par la respiration se met en route :

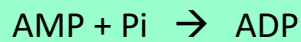
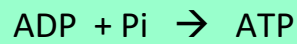


Cette voie fournit un important rendement énergétique qui permet de restaurer (renouveler) l'ATP et la phosphocréatine.



رجاء لا تنسوني من صالح دعائكم

Réactions de phosphorylation :

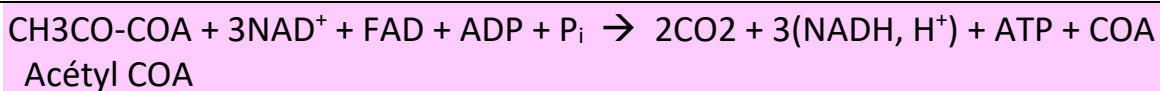


ATP synthase : protéine enzymatique qui catalyse la synthèse de l'ATP selon la réaction suivante $\text{ADP} + \text{P}_i \rightarrow \text{ATP}$

Décarboxylase : une enzyme qui catalyse la décarboxylation d'un substrat, c a d qui provoque la perte d'un groupe carboxyle (COOH).

Déshydrogénase : Une enzyme qui oxyde un substrat par le transfert d'un ou plusieurs protons (H^+) à un accepteur, généralement un coenzyme type NAD^+ ou FAD .

Cycle de Krebs : est une succession de réactions cycliques d'oxydoréduction catalysées par des enzymes spécifiques (décarboxylases et déshydrogénases ...) qui s'effectuent dans la matrice mitochondriale, au cours de ces réactions chaque radical d'acétyl ($\text{CH}_3\text{CO}-$) subit une dégradation totale et se convertit en CO_2 (déchet minéral de la respiration). La réaction globale du cycle de KREBS est

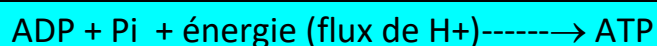


Chaîne respiratoire ou chaîne de transport d'électrons, elle correspond à un ensemble de complexes protéiques se localisant au niveau de la membrane interne mitochondriale. Elle permet le transport d'électrons provenant de coenzymes réduits: NADH, H^+ et FADH_2 . Ces électrons transitent le long de la chaîne par étape jusqu'à un accepteur final, le dioxygène. Les complexes protéiques de la chaîne utilisent l'énergie fournie lors du transfert des électrons pour pomper des protons (H^+) à travers la membrane, créant ainsi un gradient électrochimique de part et d'autre la membrane interne des mitochondries. Chaque mitochondrie contient des milliers d'exemplaires de la chaîne de transport d'électrons.

Potentiel redox : chaque couple redox est Caractérisé par son potentiel redox qui mesure de façon relative son pouvoir réducteur ou oxydant. C'est une tension électrique.

gradient de concentration : C'est la différence de concentration d'un composé chimique ou d'un ion d'un côté à l'autre d'une membrane. Le gradient de concentration est indispensable à la cellule. La cellule utilise beaucoup d'énergie afin de maintenir ce gradient de concentration et ne parvient jamais à atteindre l'équilibre. C'est le passage des ions H^+ dans les mitochondries qui va permettre la synthèse d'ATP.

Phosphorylation oxydative = oxydation phophorylante : C'est une série de réactions chimiques qui nécessite l'oxygène comme accepteur final des é et qui s'effectuent au niveau de la membrane interne mitochondriale par l'intervention de la chaine respiratoire et des sphères pédonculées. Cette série de réaction débute par l'oxydation des transporteurs (NADH, H^+ et FADH_2) et se termine par la phosphorylation de l'ADP (synthèse d'ATP)



L'oxydation d'une mole de NADH, H⁺ donne l'énergie nécessaire à la synthèse de 3 moles d'ATP. L'oxydation d'une mole de FADH₂ donne l'énergie nécessaire à la synthèse de 2 moles d'ATP.

Sphères pédonculées mitochondriales: sont des structures qui contiennent l'ATP synthétase qui est une enzyme permettant la synthèse de l'ATP (la phosphorylation de l'ADP en ATP) Elles se situent au niveau des crêtes mitochondriales plus précisément au niveau de la membrane mitochondriale interne.

Rendement énergétique : représente le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie qu'il a fallu pour la produire

Rendement énergétique R

$$R = \frac{\text{énergie produite}}{\text{énergie utilisée}} \times 100$$

Muscles squelettiques striés représentent une des deux sortes de muscle strié (l'autre étant le muscle cardiaque). Ils ont pour fonction d'assurer la motricité du corps dans son environnement, en permettant de faire bouger le squelette de manière volontaire ou involontaire. Ils sont caractérisés par la présence de stries en microscopie.

Contraction musculaire : Mouvement relatif des filaments d'actine et de myosine. La contraction musculaire correspond à un raccourcissement des sarcomères dû au glissement relatif des filaments d'actine et de myosine : les deux disques Z délimitant un sarcomère se rapprochent l'un de l'autre.

Contraction musculaire isométrique (longueur constante) : le muscle se contracte : durcit, sa tension augmente sans que sa longueur diminue. Ex muscles qui maintiennent la posture.

Contraction musculaire isotonique (tension constante) : le muscle se raccourcit, durcit sans que sa tension augmente. Ex les muscles qui font un mouvement.

Animal décérébré et démedulé : animal à qui on a détruit l'encéphale et la moelle épinière, suite à cette expérience, l'ensemble des organes autres que l'encéphale demeurent en vie, le cœur bat, le sang circule. Cependant l'animal est mort.

Myographe : Appareil qui sert à enregistrer le phénomène mécanique de la contraction musculaire.

Myogramme = secousse musculaire : Réponse mécanique d'un muscle après une excitation efficace. Suite à une seule excitation efficace, on enregistre une secousse musculaire isolée composée de trois étapes : **une phase de latence**, qui correspond à la durée entre le moment de l'excitation et le moment du début de la réponse, c'est le temps nécessaire à l'arrivée de l'influx nerveux au muscle, **la phase de contraction**, c'est l'intervalle de temps entre le début du raccourcissement (ou de l'augmentation de la tension) et le maximum de raccourcissement et **la phase de relâchement**, au cours de laquelle le muscle reprend ses dimensions initiales, sa durée est légèrement supérieure à celle de la contraction.

Seuil d'excitation = rhéobase: est l'intensité minimale de courant excitant qui permet de déclencher une réponse, en appliquant la définition aux cellules musculaires striées, on peut considérer que la rhéobase est le courant électrique minimal requis pour faire contracter artificiellement un muscle.

Recrutement : phénomène musculaire qui se traduit par l'augmentation de l'amplitude de la secousse musculaire en fonction de l'intensité de l'excitation. Il s'explique par l'augmentation du nombre des fibres musculaires intervenant lorsqu'on augmente l'intensité des excitations.

Fusion incomplète: C'est une sommation partielle de deux secousses musculaires, on obtient cette réponse lorsqu'on soumet le muscle à deux excitations efficaces successives de façon que la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de relâchement, le relâchement ne se termine pas, le muscle se contracte de nouveau, l'amplitude de la deuxième secousse est généralement plus élevée, même si l'intensité de la deuxième excitation est égale à celle de la première.

Fusion complète: C'est une sommation totale de deux secousses musculaires, on obtient cette réponse lorsqu'on soumet le muscle à deux excitations efficaces successives de façon que la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de contraction, on obtient une seule secousse avec une amplitude généralement plus forte que celle d'une secousse isolée même si l'intensité de la deuxième excitation est égale à celle de la première.

Tétanos imparfait : C'est une sommation partielle de plusieurs secousses musculaires, on obtient cette réponse lorsqu'on soumet le muscle à des excitations répétées de manière à ce que chacune atteigne le muscle pendant la phase de relâchement, le tracé enregistré s'élève en ligne sinueuse, décrit un plateau et retombe quand on arrête les excitations ou quand le muscle est fatigué. Il se produit une sommation des secousses musculaire avec fusion incomplète des secousses élémentaires

Tétanos parfait : C'est une sommation totale de plusieurs secousses musculaires, on obtient cette réponse lorsqu'on soumet le muscle à des excitations répétées plus rapprochées de manière à ce que chacune atteigne le muscle pendant la phase de contraction, le muscle reste contracté durant toute la durée des excitations, le relâchement est requis lorsqu'on arrête les excitations.

Fatigue musculaire : C'est un état de fatigue qui surgit quand un muscle subit un grand nombre d'excitations successives, l'amplitude de la réponse diminue, la durée des différentes phases de la secousse augmente. Ce sont les signes de la fatigue musculaire.

Thermographie : c'est une technique d'enregistrement de la chaleur émise par le corps lors d'un effort musculaire. Cette chaleur se propage sous forme de rayons infrarouges qui peuvent être enregistrés par des appareils appropriés. La couleur rouge indique les zones qui dégagent la plus grande quantité de chaleur.

Chaleur initiale : C'est une émission de chaleur libérée par le muscle au cours de la secousse musculaire, elle se caractérise par une courte durée mais une grande quantité, une partie est libérée au cours de la phase de contraction et l'autre partie au cours de la phase de relâchement. Elle résulte des réactions chimiques anaérobies (Hydrolyse d'ATP au cours de la contraction, réactions anaérobiques de régénération d'ATP dans la fibre musculaire par la réaction d'hydrolyse de la phosphocréatine, la réaction entre deux molécule d'ADP et la fermentation lactique).

Chaleur retardée : C'est une émission de chaleur libérée par le muscle après la secousse musculaire, elle se caractérise par une faible intensité, mais elle dure plus longtemps. Elle

résulte des réactions chimiques aérobies (réactions aérobiques de régénération d'ATP : la respiration cellulaire)

Fibre musculaire : est une cellule musculaire géante qui possède plusieurs noyaux disposés en périphérie. Le cytoplasme de la fibre appelé sarcoplasme est occupé presque totalement par des myofibrilles (fibrilles musculaires) s'étendant sur toute la longueur de la fibre, ce qui donne à la fibre une striation longitudinale. La fibre musculaire présente une striation transversale très caractéristique qui est à l'origine du nom « muscle strié squelettique » que l'on donne aux muscles rattachés au os et responsables des mouvements.

Myofibrilles sont les fibres contractiles localisées à l'intérieur de la cellule musculaire (la fibre musculaire), elles sont composés de deux sortes de myofilaments protéiques: des myofilament fins d'actine et des myofilaments plus épais de myosine. Une myofibrille fait apparaître une alternance de zones plus claires constituée de myofilaments d'actine uniquement et des zones plus sombres constituées de myofilaments d'actine et de myosine.

Myofilament d'actine, ou microfilament d'actine, est une sorte de filament de la myofibrille qui s'insèrent au niveau des stries Z, il est constitué par trois principales protéines différentes : l'actine globulaire formant une double hélice, la tropomyosine et la troponine. lorsque le muscle est au repos, la tropomyosine (liée à la troponine) cache le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine. Lors d'une excitation efficace, les ions Ca^{++} se libèrent du réticulum endoplasmique de la fibre musculaire. Une fois libres dans le sarcoplasme musculaire, ces ions Ca^{++} , se fixent sur la troponine celle-ci change de conformation et déplace la tropomyosine, ce qui libère le site de fixation des têtes de myosine, un complexe acto-myosine (pont) se forme alors.

Sous l'effet de la rotation des têtes de myosines fixées sur les filament d'actine, ces derniers glissent vers le centre du sarcomère créant un raccourcissement du sarcomère, ce qui induit la contraction musculaire.

Myofilament épais de myosine : ce sont des faisceaux d'environ 200 molécules de myosines. Chaque molécule de myosine a la forme d'un bâtonnet (tige) terminé par deux têtes. Les tiges se collent les unes aux autres pour former le myofilament épais, tandis que les têtes font saillie latéralement tout autour du myofilament. La tête de myosine comporte deux sites spécifiques, l'un pour l'ATP et l'autre pour l'actine.

Sarcomère : représente l'unité structurale et fonctionnelle de la fibre musculaire et correspond à la zone séparant deux stries Z successives. Une myofibrille est donc constituée d'une suite de sarcomères dont la sommation des raccourcissements provoque la contraction du muscle.

Sarcoplasme : c'est le cytoplasme d'une fibre musculaire striée. Son contenu est comparable au cytoplasme d'autres cellules eucaryotes, avec une grande quantité de granules de glycogène et d'importantes quantités de myoglobine et une grande richesse en mitochondries. La concentration de Calcium dans le réticulum endoplasmique du sarcoplasme est également un élément spécial de la fibre musculaire au moyen duquel les contractions sont produites et régulées.

Sarcolème : est la membrane de la cellule musculaire qui entoure le sarcoplasme.

La théorie des filaments glissants : selon cette théorie, la contraction musculaire est dû à un glissement des myofilaments fins d'actine par rapport aux myofilaments de myosine, ce glissement provoque le raccourcissement des sarcomères et par conséquent le raccourcissement des fibres musculaire. Cette théorie trouve ses justifications dans les manifestations de la contraction au niveau de la fibre musculaire : un raccourcissement des sarcomères, une réduction de la longueur des bandes claires et de la zone H avec une constance de la longueur des bandes sombres.