

Unité I :

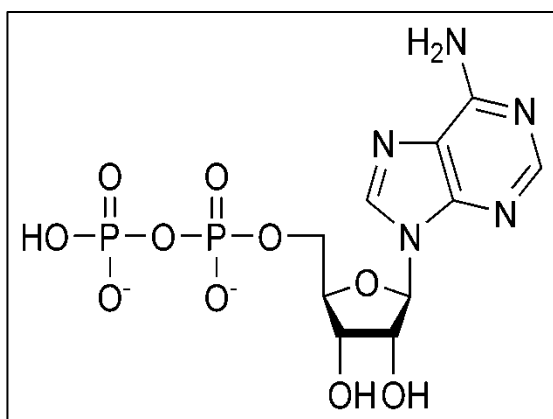
CONSOMMATION DE LA MATIERE ORGANIQUE ET FLUX D'ENERGIE

*INTRODUCTION ET MISE EN SITUATION PROBLEME :

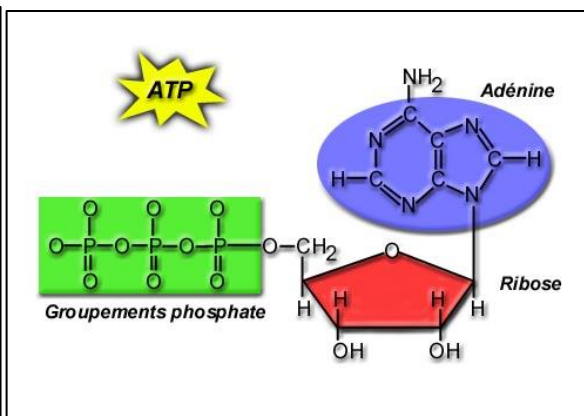
- Grace au phénomène de la photosynthèse(étudié l'année précédente), les végétaux produisent de la matière organique, cette dernière emmagasine de l'énergie dans les liaisons chimiques (après avoir converti l'énergie lumineuse en énergie chimique)

-lors de la consommation de la matière organique, il y aura libération de cette énergie stockée dans les liaisons chimiques pour être utilisée dans les activités biologiques(biosynthèses cellulaires, contraction musculaire)

Or la cellule utilise directement l'énergie fournie par l'hydrolyse d'une molécule appelée **Adénosine Triphosphate** selon la réaction suivante :



La molécule d'ADP
(Adénosine diphosphate)



La molécule d'ATP
(Adénosine triphosphate)

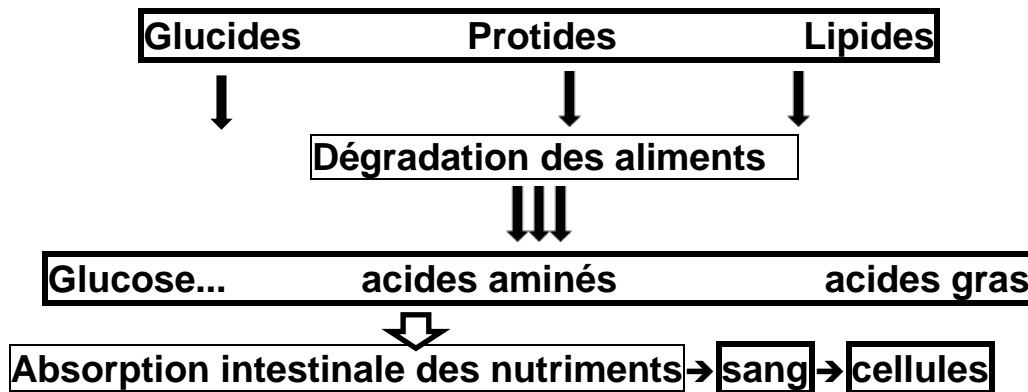
Cette ATP doit être régénérée en permanence donc :

- Comment se fait la dégradation des molécules organiques au niveau de la cellule et comment se fait la libération de son énergie potentielle ?
- Comment et où se fait la synthèse de l'ATP dans la cellule ?
- Comment se fait la conversion de l'énergie chimique (ATP) en énergie mécanique et énergie thermique (dans la cellule musculaire) lors d'un mouvement musculaire ?
- Quelles sont les différentes réactions chimiques qui aboutissent à la régénération de l'ATP lors d'un exercice physique ?

Chapitre 1

Les Réactions responsables de la libération de l'énergie emmagasinée dans la matière organique

- Rappel : rôle de la digestion :



I- MISE EN EVIDENCE DES REACTIONS CHIMIQUES RESPONSABLES DE LA LIBERATION DE L'ENERGIE POTENTIELLE DE LA MATIERE ORGANIQUE

A- Données expérimentales : page 7

11 Mise en évidence des réactions chimiques responsables de la libération de l'énergie potentiel de la matière organique.

La levure *Saccharomyces cerevisiae* est un champignon unicellulaire, elle extrait de l'énergie nécessaire à sa croissance de la molécule de glucose.

La levure est capable de vivre dans un milieu aérobie (avec O_2) ou anaérobie (sans O_2)

Pour étudier quelques phénomènes biologiques qui produisent de l'énergie on propose les données expérimentales suivantes :

On cultive des cellules de levure dans un milieu de culture qui contient du glucose ; avec des conditions expérimentales différentes ; le tableau ci-contre résume les conditions et les résultats obtenus.




Conditions expérimentales	Quantité d'éthanol (alcool) produite par les levures	Rendement de la culture exprimée en mg de levures formées par g de glucose consommé
Expérience 1 : Au contact du dioxygène de l'air  solution de glucose	Traces	250
Expérience 2 : Air appauvri en dioxygène  air tube pour analyses solution de glucose + levures	++	40
Expérience 3 : Absence de dioxygène  air tube pour analyses solution de glucose + levures	+++++	5

Figure 3 : Expérience historique de Pasteur

1 Analyser les trois expériences et comparez les résultats.

2 Déduez les caractéristiques des phénomènes mis en évidence par ces expériences et nommez les.

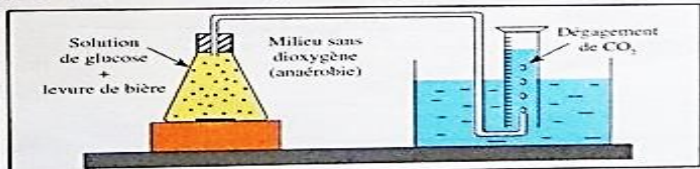
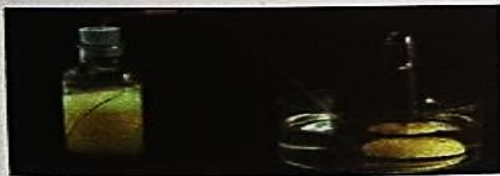


Figure 4 : Montage expérimental de la fermentation alcoolique du glucose

La figure 5 montre l'observation au microscope électronique de des levures ayant séjourné dans des conditions aérobies (B) et celle des levures ayant séjourné dans des conditions anaérobies (A).

3 Déterminez les caractéristiques de la levure dans les deux milieux aérobie et anaérobie.

4 Quel est l'organe responsable de la respiration cellulaire ?

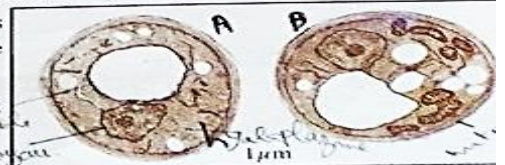


Figure 5 : Cellules de levures observées au microscope électronique

Réponses :

1- En milieu aérobie (riche en O_2), la multiplication cellulaire (poids de levures) ainsi que la consommation du glucose sont beaucoup plus importantes qu'en milieu anaérobie.

- De plus, la dégradation du glucose en anaérobiose est incomplète et il se forme de l'alcool éthylique (éthanol).

2 -> Sachant que la multiplication cellulaire nécessite de l'énergie, On pourrait admettre que la production d'énergie (à partir de la dégradation du glucose) peut se faire selon deux voies :

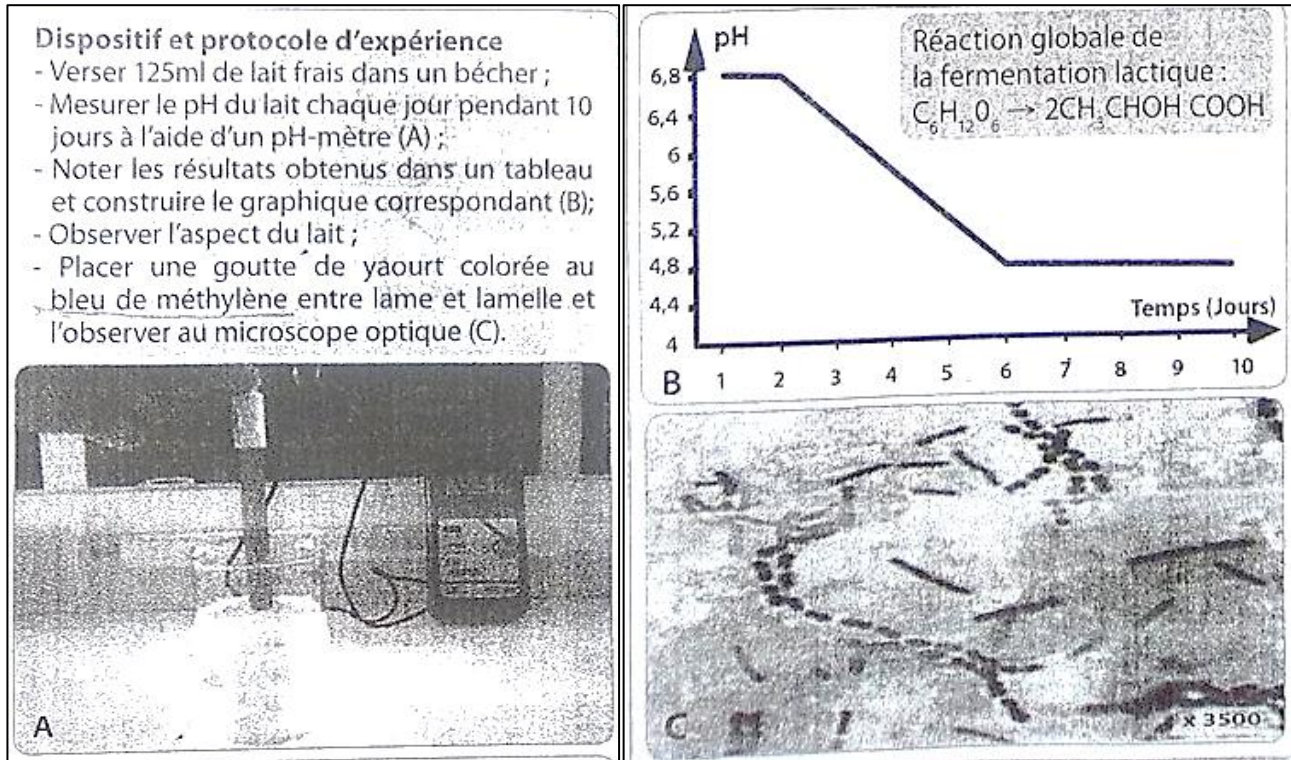
Voie anaérobie : La fermentation ou voie aérobie : la respiration.

Cette dernière produit plus d'énergie.

3- Les deux levures présentent un noyau et des vacuoles. Par contre, seule la levure provenant du milieu oxygéné présente des mitochondries bien développées.

4- La respiration et la présence de mitochondries sont liées. Le mode fermentation ne nécessite pas de mitochondries. Ces derniers sont donc des organites cellulaires impliqués dans la respiration cellulaire.

Remarque :* Expérience de fermentation lactique svt + doc 3 page 9



Analyse : on constate qu'au cours du temps il y'a diminution du pH du lait.

Interprétation : la diminution du pH (milieu acide) est due à la production de l'acide lactique par les **lactobacilles** du lait à partir du sucre lactose en milieu **anaérobie**.

B- ***. Bilan :

Respiration	Fermentation
<ul style="list-style-type: none"> -Milieu aérobie - Absorption de dioxygène -Rejet de dioxyde de carbone -Consommation (dégradation) du glucose - Beaucoup d'énergie produite -Nécessite la présence de mitochondrie 	<ul style="list-style-type: none"> -Milieu anaérobie - Rejet de dioxyde de carbone, et de molécules organiques (éthanol dans le cas des levures - Consommation (dégradation) du glucose - Peu d'énergie produite - Se déroule dans l'hyaloplasme

C- Conclusion :

Deux types de réactions chimiques permettent d'extraire l'énergie responsable du fonctionnement cellulaire :

La respiration cellulaire : c'est une dégradation (oxydation) complète de matière organique (glucose) en milieu aérobie, elle nécessite l'intervention des mitochondries et produit une quantité importante d'énergie

La fermentation : c'est une dégradation (oxydation) incomplète (partielle) de matière organique en milieu anaérobie, elle se déroule dans le hyaloplasme et produit une faible quantité d'énergie et des molécules organiques contenant encore une énergie potentielle.

II- Quelle est la première étape de la dégradation du métabolite (glucose) lorsqu'il arrive dans la cellule ?

A-Mise en évidence du devenir du glucose dans la cellule ?

- Expérience : page 9 fascicule fig2 tableau

② Mise en évidence du devenir du glucose dans la cellule :
Des cultures de levures sont réalisées en présence ou en absence de O₂ dans des milieux contenant une faible quantité de glucose marqué au C¹⁴.
Des prélèvements effectués à différents temps permettent de détecter et d'identifier les molécules radioactives présentes à différents niveaux.

① Décrivez les transformations du glucose dans les milieux aérobie et anaérobie.
② Quel est le devenir du glucose ?

Temps	Milieu externe	Milieu aérobie		Milieu anaérobie
		hyaloplasme	Mitochondrie	hyaloplasme
T ₀	G +++++			
T ₁	G ++	G +++		G ++
T ₂	G +	P +++++		P +++++
T ₃		P ++	P +++	
T ₄			P ++ K +++	P ++ E +++
T ₅	CO ₂ +++		K +++	E +++

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

Figure 1

• Réponse

1- **Description** : D'après le document On observe:

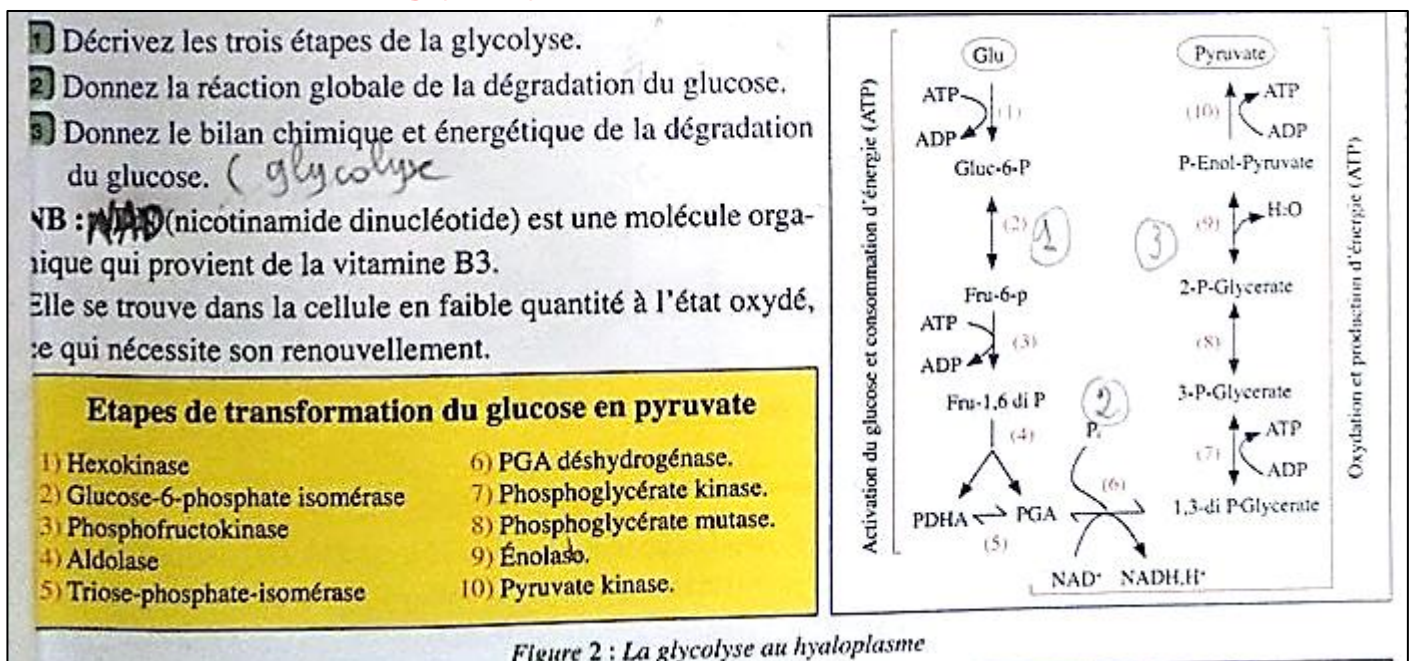
- au temps T₀ il n'y a que du glucose dans le milieu externe
- au temps T₁, le taux de glucose du milieu extérieur diminue on en le voit apparaitre dans l'hyaloplasme. Cela signifie que le glucose est entré dans les cellules placées dans les deux milieux aérobie et anaérobie.
- Au temps T₂, il n'y a plus de glucose dans l'hyaloplasme, la radioactivité se retrouve dans les molécules de pyruvate.

Donc Le glucose a été transformé en pyruvate dans l'hyaloplasme de la cellule en anaérobie et en aérobie. C'est la réaction de **la glycolyse**

- Puis Au temps T₃ et T₄ on observe qu'il apparait, progressivement, du pyruvate dans la matrice mitochondriale pour se transformer en acides du cycles de Krebs cela dans le milieu aérobie alors qu'en milieu anaérobie il se transforme en éthanol .
- Enfin à T₅ la radioactivité est retrouvée dans les molécules de dioxyde de carbone émises dans le milieu extérieur.

2- La première étape de la dégradation du glucose dans la cellule est **la Glycolyse** elle se réalise au niveau du hyaloplasme (cytosol), elle n'a pas besoin de O₂ (réactions anaérobie) et produit de l'acide pyruvique (pyruvate).

B- Les étapes de la glycolyse : fig 2 page 9 fasc



Réponse :

1- Les étapes de la glycolyse :

- 1^{er} étape: le glucose est converti en fructose diphosphate par des réactions enzymatiques avec consommation de 2 ATP.
- 2^{ème} étape : le fructose diphosphate est clivé en 2 trioses (C₃ P) , puis chacun d'eux subit une oxydation par déshydrogénation : les protons et les électrons libérés sont captés par **un transporteur T (=NAD⁺)** qui sera réduit en **TH₂ (=NADH+H⁺)**
- 3^{ème} étape : chaque triose (P-C-P) se transforme en acide pyruvique générant 2 molécules d' ATP

2- Réaction globale de la glycolyse :



3- Pour une molécule de glucose consommée, il y a formation de :

- 2 molécules de pyruvate ;
- 2 molécules d'ATP ;
- 2 molécules de coenzymes (ou transporteurs) réduits NADH, H⁺

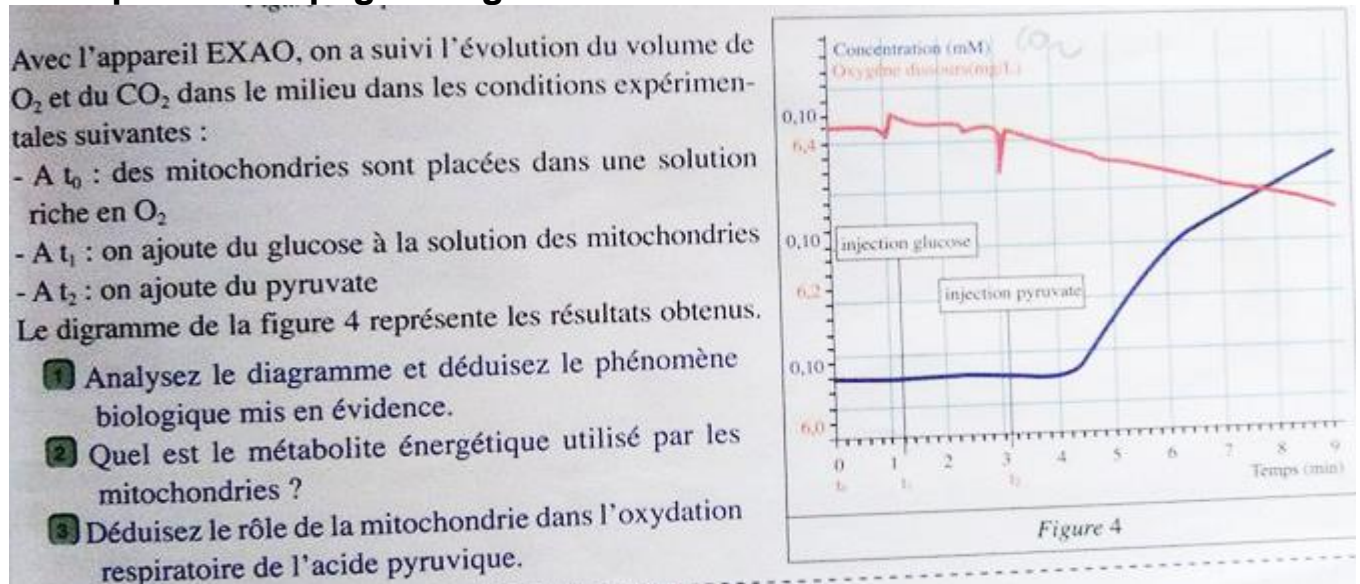
• la glycolyse est un phénomène **anaérobie** (ne nécessite pas O₂) Elle est une suite de réactions qui ont lieu dans le hyaloplasme (cytosol) de la cellule. C'est **une étape commune** à la respiration et à la fermentation.

III- Quel est le devenir du pyruvate ?

A) En aérobie : Oxydation respiratoire (respiration) :

1- Rôle des mitochondries dans les oxydations respiratoires :

- **Expérience :** page 11 fig 4



Réponse : *Analyse :

- En T₁ : La concentration du O₂ et du CO₂ restent constantes avant et après l'ajout du glucose, → les mitochondries ne respirent pas.
 - En T₂ : L'ajout de pyruvate provoque une diminution de la concentration de O₂ et l'augmentation du CO₂ dans le milieu, → les mitochondries respirent
- On déduit que les mitochondries utilisent l'acide pyruvique comme métabolite énergétique et non pas le glucose.
- Elles représentent le siège des réactions d'oxydation respiratoires aboutissant à la production de l'énergie (synthèse de l'ATP).

2- Etude de la structure et l'ultrastructure de la mitochondrie : page 13 doc 2 - 3

Document 2 : structure et ultrastructure de la mitochondrie

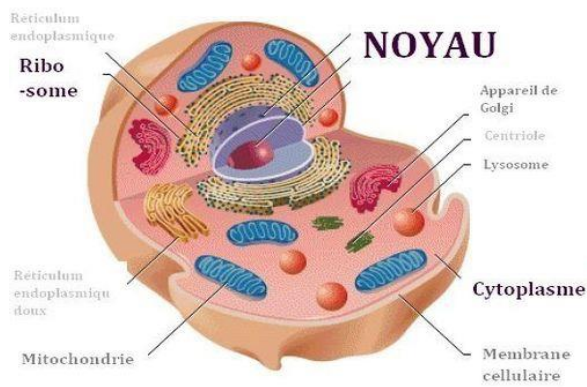


Fig1 : bloc diagramme d'une cellule eucaryote

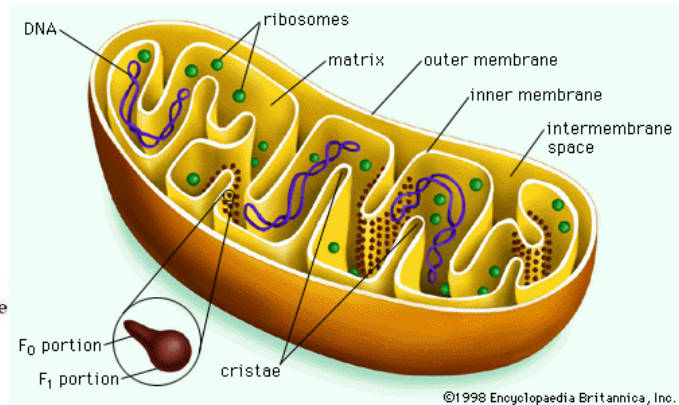


Fig2 : bloc diagramme d'une mitochondrie

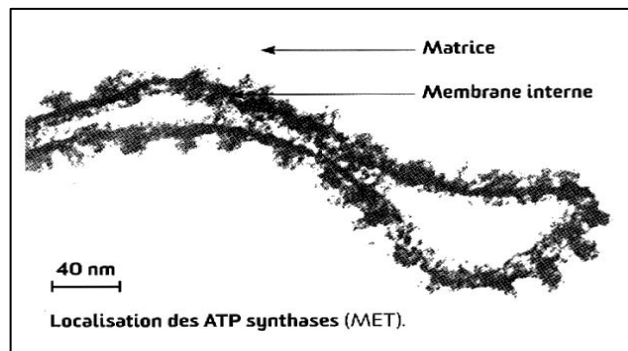
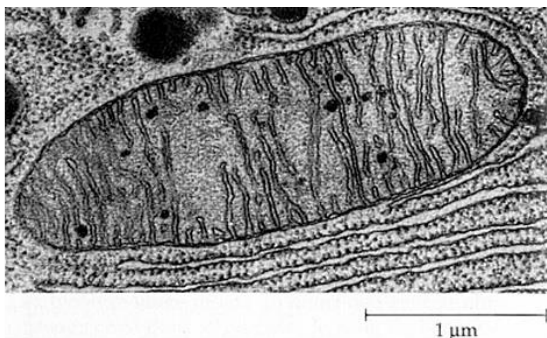
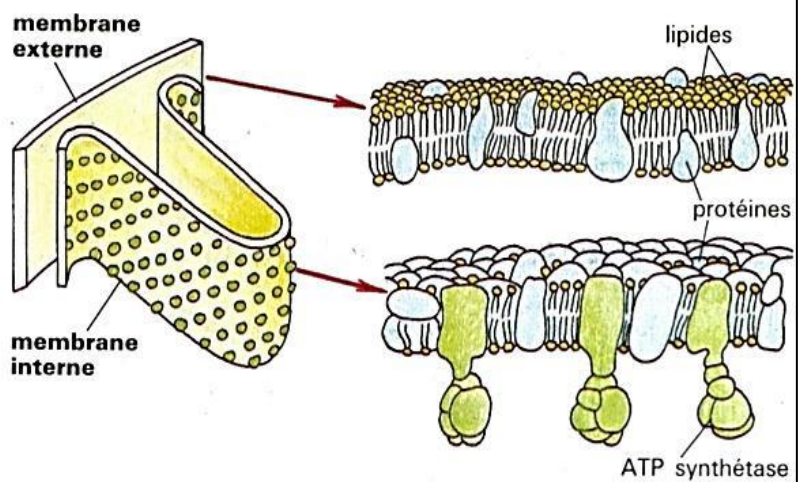


Fig3 : électronographie d'une mitochondrie Fig 4 : électronographie d'une crête

Document 3 : Etude des constituants biochimiques de la mitochondrie

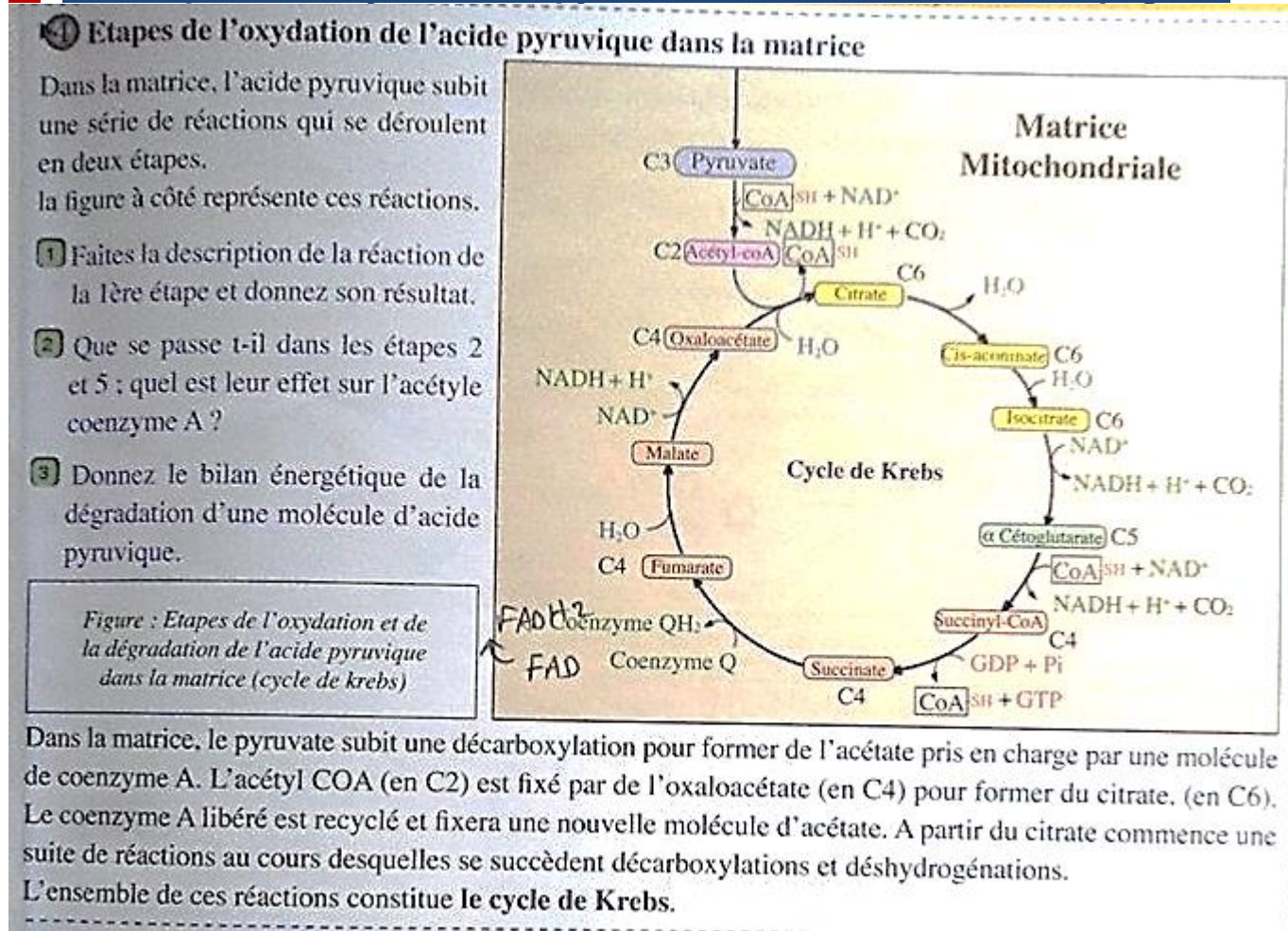
	Particularités de la composition chimique	Équipement enzymatique
Membrane externe	40 % à 50 % lipides 50 % à 60 % protéines	comparable à celui de la membrane cellulaire
Membrane interne	20 % lipides 80 % protéines	nombreuses enzymes en particulier des ATP synthétases
Matrice	<ul style="list-style-type: none"> pas de glucose présence d'acide pyruvique et d'ATP 	déshydrogénases et décarboxylases
Hyaloplasme	présence de glucose et d'acide pyruvique	déshydrogénases



Description : Les mitochondries sont des organites clos délimités par deux membranes : la membrane externe et la membrane interne qui présente des replis appelés crêtes mitochondriales. Entre ces deux membranes se trouve l'espace intermembranaire. La membrane interne limite la matrice à l'intérieur. Elle est caractérisée par sa richesse en enzymes et porte des **sphères pédonculées (ATP synthétase)** tournées vers la matrice.

3- Les réactions de l'oxydation respiratoire dans les mitochondries.

a- Les étapes de l'oxydation du pyruvate dans la mitochondrie : page 15



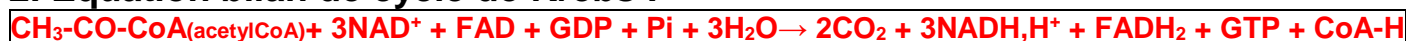
Réponse :

1-. Dans la matrice, le pyruvate issu de la glycolyse va subir un ensemble de réactions chimiques qu'on peut résumer en deux étapes :

Étape 1 : l'acide pyruvique subit **une décarboxylation** (enlèvement de CO₂) et **une déshydrogénation** (enlèvement de H⁺) dont le résultat est un groupement acétyle CH₃CO qui se fixe sur un composé appelé coenzyme A pour donner **l'acétyl coenzyme A (C₂)**

Étape 2 : l'acétyl coenzyme A se fixe sur un corps en C₄ pour donner un corps en C₆. Ce dernier subit un ensemble de réactions de décarboxylation et de déshydrogénation constituant le cycle de KREBS.

2. Equation bilan de cycle de Krebs :



3. bilan énergétique :

Pour une molécule d'acide pyruvique consommée, il y a eu production de :

- * 4NADH, H⁺ * 1FADH₂
- * 1ATP (GTP) * 3CO₂

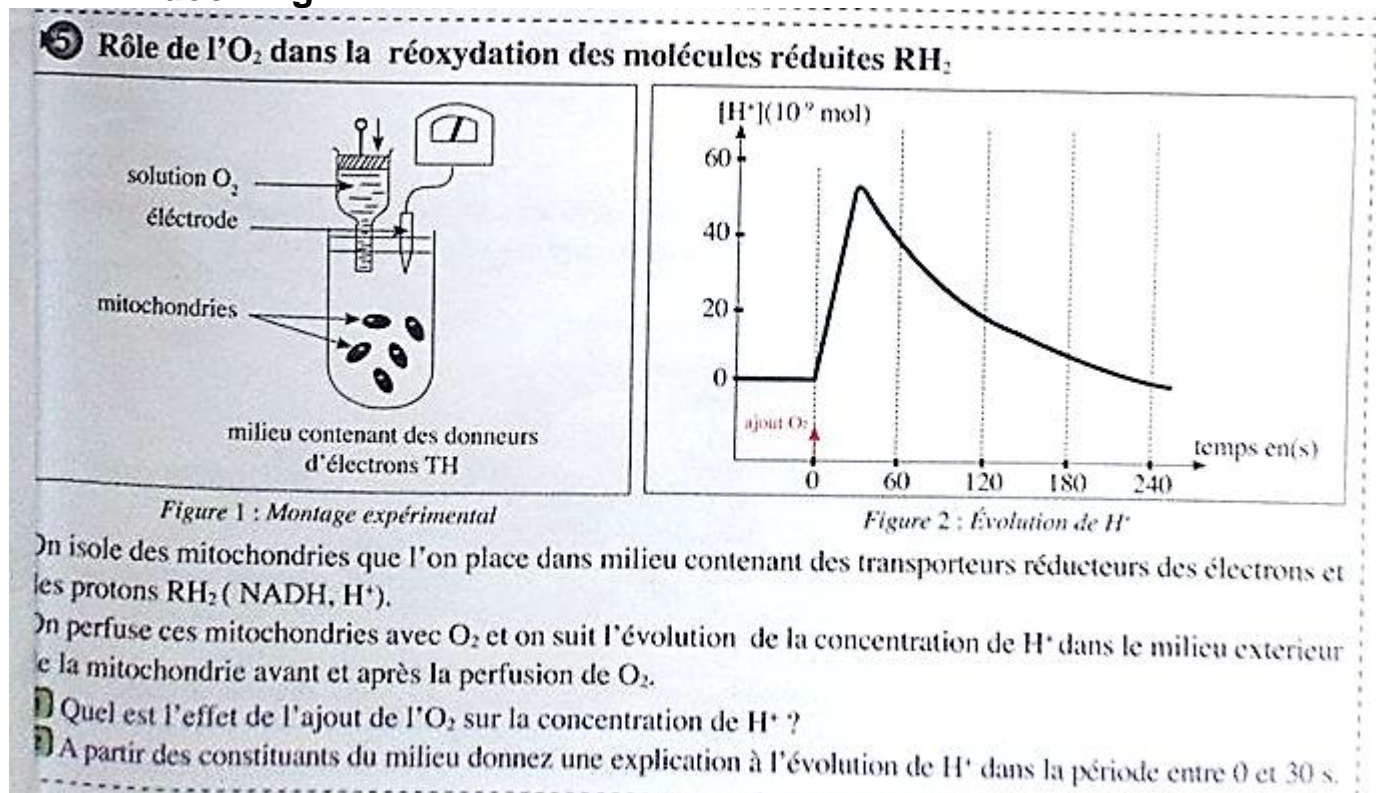
Equation bilan de **l'oxydation du pyruvate** dans la mitochondrie:



Problématique: Pour que le phénomène continue les Transporteurs réduits RH_2 (NADH_2 ; FADH_2) doivent être réoxydés?

b- La réoxydation des transporteurs réduits et la production d'ATP dans la chaîne respiratoire de la membrane interne mitochondriale.

b-1 : rôle de l' O_2 dans la réoxydation des molécules réduites RH_2 :page 15 doc 2 fig1-2



Analyse des résultats

-Avant l'injection d' O_2 , on observe que la concentration en H^+ du milieu extérieur est nulle

-Juste après l'injection d' O_2 , on observe une augmentation rapide suivie d'une diminution lente de la concentration en H^+ .

Explication :

En présence de dioxygène(O_2), il y a oxydation des coenzymes réduits RH_2 et les protons H^+ sont d'abord transférés de la matrice vers l'espace intermembranaire puis vers le milieu extérieur d'incubation ce qui explique la forte augmentation de la concentration en H^+ début. Elle diminue au fur et à mesure de la réduction de O_2 , une fois tout l'oxygène est réduit les H^+ retournent dans la matrice.

b-2 Rôle de la chaîne respiratoire :

- Qu'est-ce que la chaîne respiratoire ? doc 3 page 19 fas

Document 3 : Qu'est ce que la chaîne respiratoire ?

C'est l'étape finale de la respiration cellulaire (cellules aérobies), elle constitue un ensemble de réactions de transfert d'électrons permettant ainsi la réoxydation des coenzymes réduits où l'accepteur final d'électron est l'oxygène. Cette chaîne respiratoire est localisée dans la membrane interne des mitochondries.

La réoxydation s'accompagne de la création d'un gradient transmembranaire de protons.

On a isolé des complexes dans la membrane mitochondriale qui sont constitués de plusieurs enzymes impliquées dans le transfert des H^{2+} é.

Exemple :

- Complexe I : NADH-DH / centre fer-soufre.
- Complexe III : Cytochromes b et c1
- Complexe VI : Cytochrome a, a3

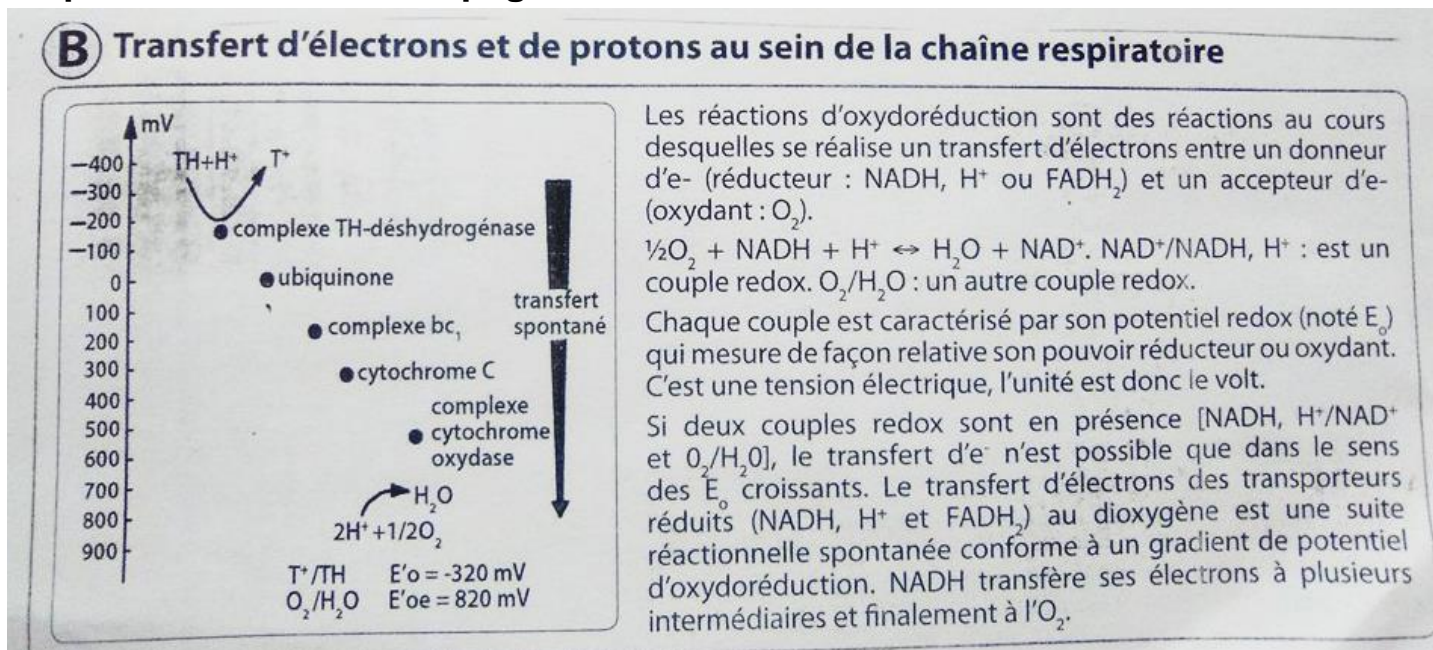
1. Décrivez les constituants de la membrane interne de la mitochondrie.

2. Quel est le devenir des électrons provenant de la réoxydation des transporteurs (NADH, H^+) et $FADH_2$?

3. Résumez le rôle de la chaîne respiratoire dans la réoxydation de RH_2 et la réduction de O_2 .

Figure : Evolution du potentiel d'oxydo-réduction des transporteurs des électrons de la chaîne respiratoire

- Comment se fait le transfert d'électrons et de protons au sein de la chaîne respiratoire ? doc 4 svt + page 17



Bilan :

Chaîne respiratoire : Ensemble de divers transporteurs d'électrons (complexes enzymatiques) situés dans la membrane interne mitochondriale, assurant par oxydoréductions successives le transfert des électrons à partir des coenzymes réduits ($NADH, H^+$, $FADH_2$) jusqu'au O_2 qui va être réduit sous forme d' H_2O .

Le donneur d'électrons est le $NADH, H^+$ (ou $FADH_2$) qui subit une oxydation selon la réaction :



Réduction de O_2 :

L'accepteur final des électrons est l'O₂ qui subit une réduction selon la réaction :

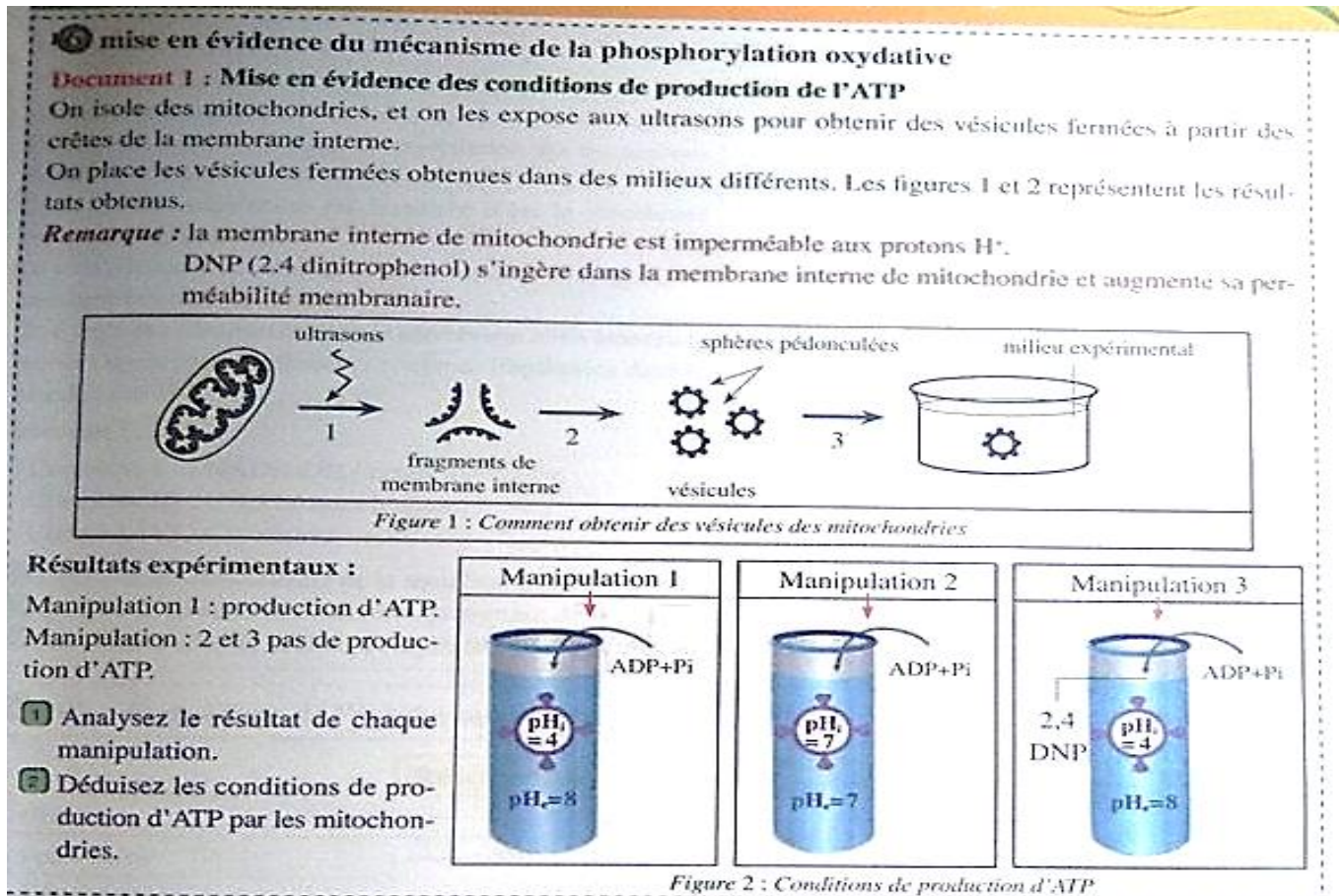


Problématique :

À quoi va aboutir l'accumulation de H⁺ dans l'espace intermembranaire ?

b-3 : Phosphorylation oxydative et synthèse de l'ATP :

b-3-1 : Mise en évidence des conditions de production de l'ATP : doc 1 p 17



1- Les conditions permettant la synthèse d'ATP :

* La présence d'ADP et de Pi

* Un pH extra vésiculaire > que le pH de l'intérieur des vésicules (pH_i < pH_e).
Or le pH dépend de la concentration de H⁺ du milieu (plus [H⁺] est forte, plus le pH est faible).

Dans notre cas, [H⁺]_i > [H⁺]_e → une tendance des protons à sortir des vésicules → **gradient ou flux de proton**.

* La présence des sphères pédonculées (ATP synthétase)

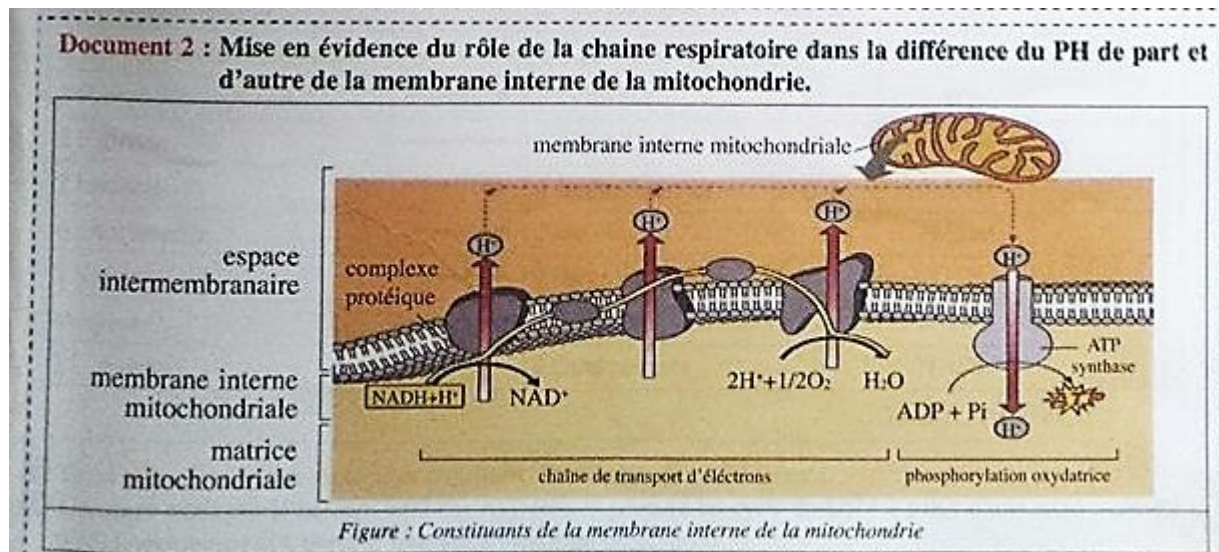
2- Bilan :

Dans les conditions cellulaires, les sphères pédonculées de la membrane interne des mitochondries catalysent la synthèse d'ATP dans la matrice.

L'énergie nécessaire à cette synthèse vient du flux de protons.

(Les protons, présents en concentration plus importante dans l'espace intermembranaire que dans la matrice (gradient de H^+) , gagnent la matrice en passant par les sphères pédonculées.)

***Schéma explicatif Fig 3 page 17 fas



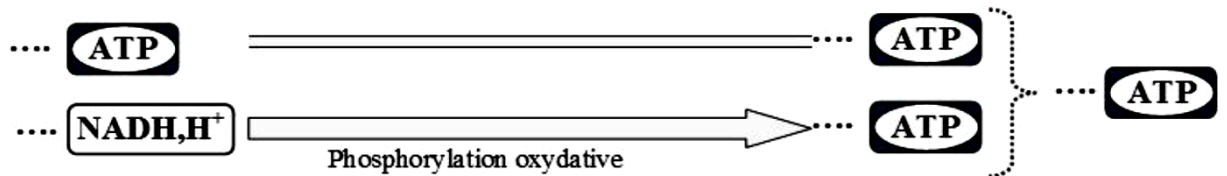
Remarque :

L'oxydation d'une molécule de NADH, H⁺ permet la synthèse **3ATP**

L'oxydation d'une molécule de FADH₂ permet la synthèse **2ATP**

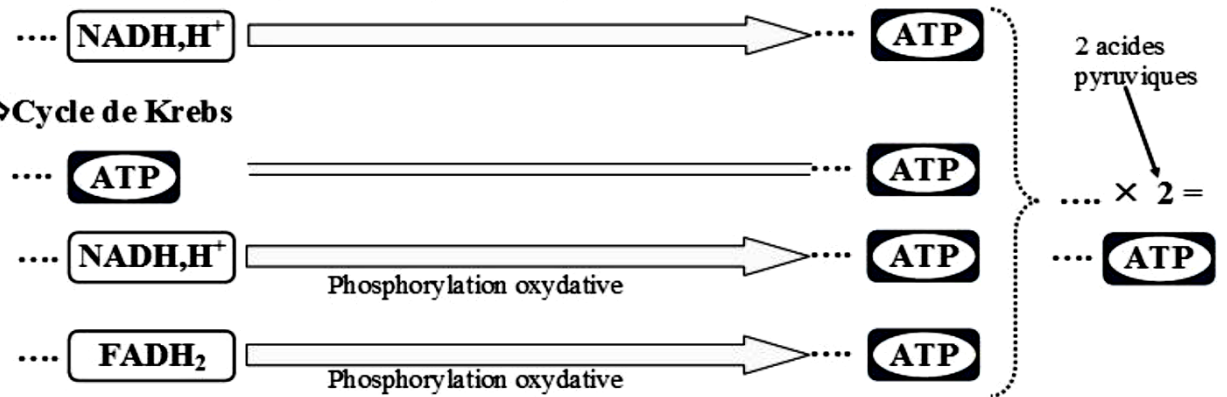
c- Bilan énergétique de la respiration

1) Glycolyse : oxydation du glucose en pyruvate



2) Les oxydations respiratoires

⇒ De l'acide pyruvique à l'acétyl coenzyme A



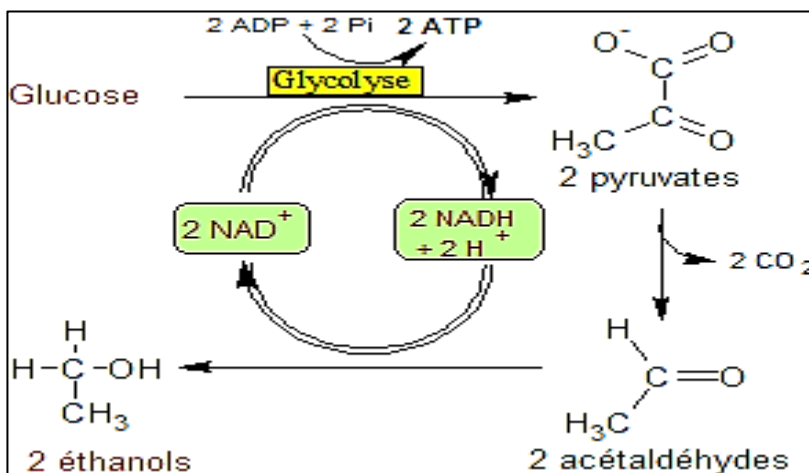
TOTAL : **ATP**

Equation bilan de la respiration cellulaire



B) En anaérobie : La Fermentation (autre voie de production de l'ATP)

1 – la fermentation alcoolique : doc 1 fig 1 page 23 fasc



La fermentation débute dans le cytoplasme des levures par la glycolyse, dans le cas de la fermentation alcoolique, l'acide pyruvique est décarboxylé puis réduit en éthanol avec régénération du transporteur (NAD⁺).

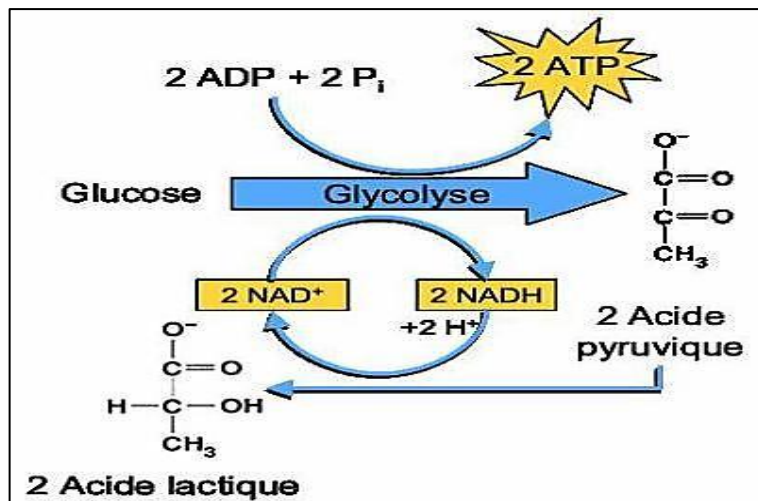
L'équation bilan de la fermentation alcoolique est :



Seule la glycolyse produit de l'ATP lors de la fermentation.

Le bilan en ATP de la fermentation alcoolique est donc de 2 moles d'ATP par mole de glucose oxydé.

2- La fermentation lactique : doc 1 fig 2 page 23 fasc



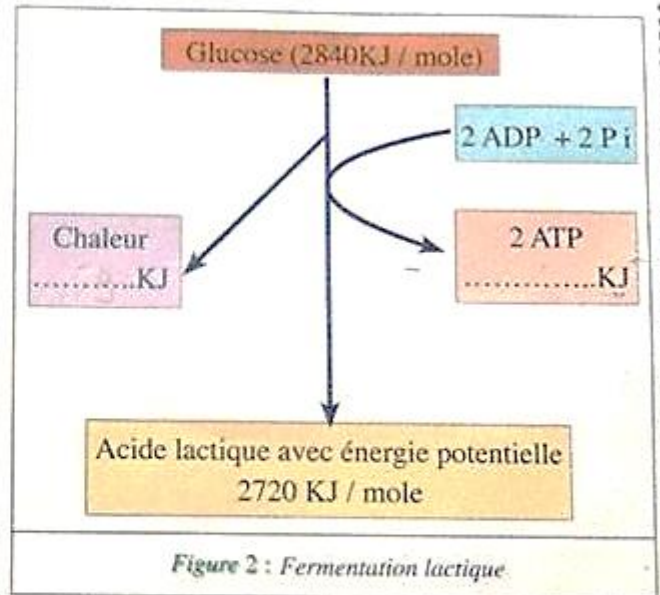
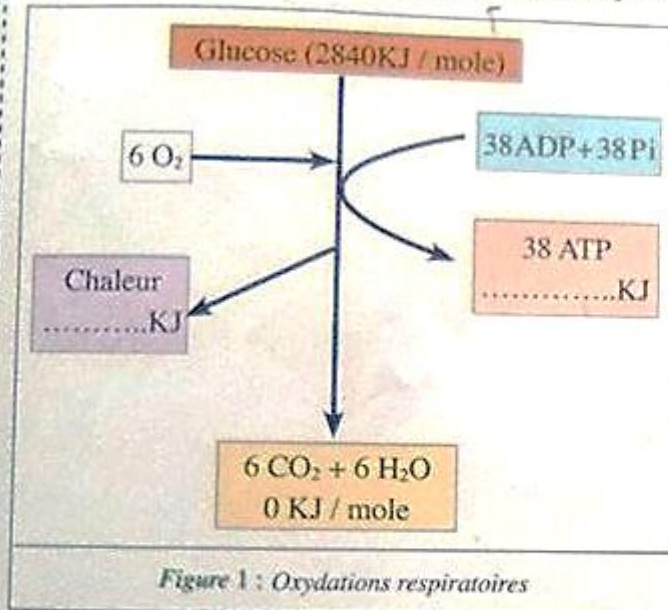
****Certains cellules, les bactéries lactiques et aussi les cellules musculaires sont capables de réaliser une fermentation dite lactique. Dans ce cas, la dégradation du glucose dans le hyaloplasme (cytosol) produit du pyruvate qui sera réduit en .acide lactique (CH₃-CHOH-COOH)**

L'équation bilan de la fermentation lactique est :



IV - Comparaison du rendement énergétique de la respiration et de La fermentation : doc 2 page fig 1-2 page 23

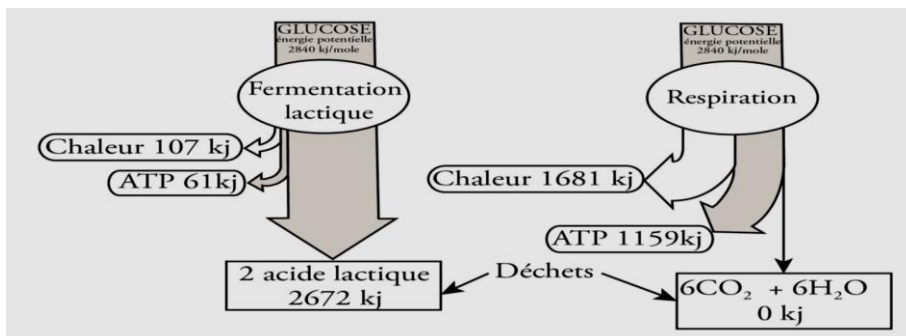
9 Comparaison du rendement énergétique de la respiration et de la fermentation



- 1 Sachant que l'hydrolyse d'une molécule d'ATP libère 30,5 KJ, calculez le rendement énergétique de la respiration et de la fermentation.
- 2 Comparez les deux rendements énergétiques.
- 3 Comment expliquez-vous cette différence ?

Réponse :

*Calcul de la quantité de l'énergie produite gagnée et perdue (voir figure1-2)



$$1- \text{Rendement} = \frac{\text{Quantité d'énergie sous forme d'ATP} \times 100}{\text{Quantité d'énergie chimique potentielle du glucose}}$$

	Respiration cellulaire	fermentation
Nombre de molécules d'ATP formées par molécule de glucose	38	2
Quantité d'énergie extraite à partir d'une molécule de glucose (kJ)	$38 \times 30,5 = 1159 \text{ kJ}$	$2 \times 30,5 = 61 \text{ kJ}$
Rendement énergétique (%)	$1159 / 2840 \times 100 = 40,8\%$	$61 / 2840 \times 100 = 2,14\%$

2.- Le rendement de conversion énergétique est plus élevé dans le cas de la respiration (environ 40 %) que dans celui de la fermentation (environ 2 %), (Toute l'énergie chimique potentielle contenue dans une molécule de glucose n'est ce pendant pas convertie en ATP, près de 50 % de cette énergie, dans le cas de la respiration, est dissipée sous forme de chaleur).

3-Le rendement de la respiration est nettement supérieur à celui de la fermentation car :

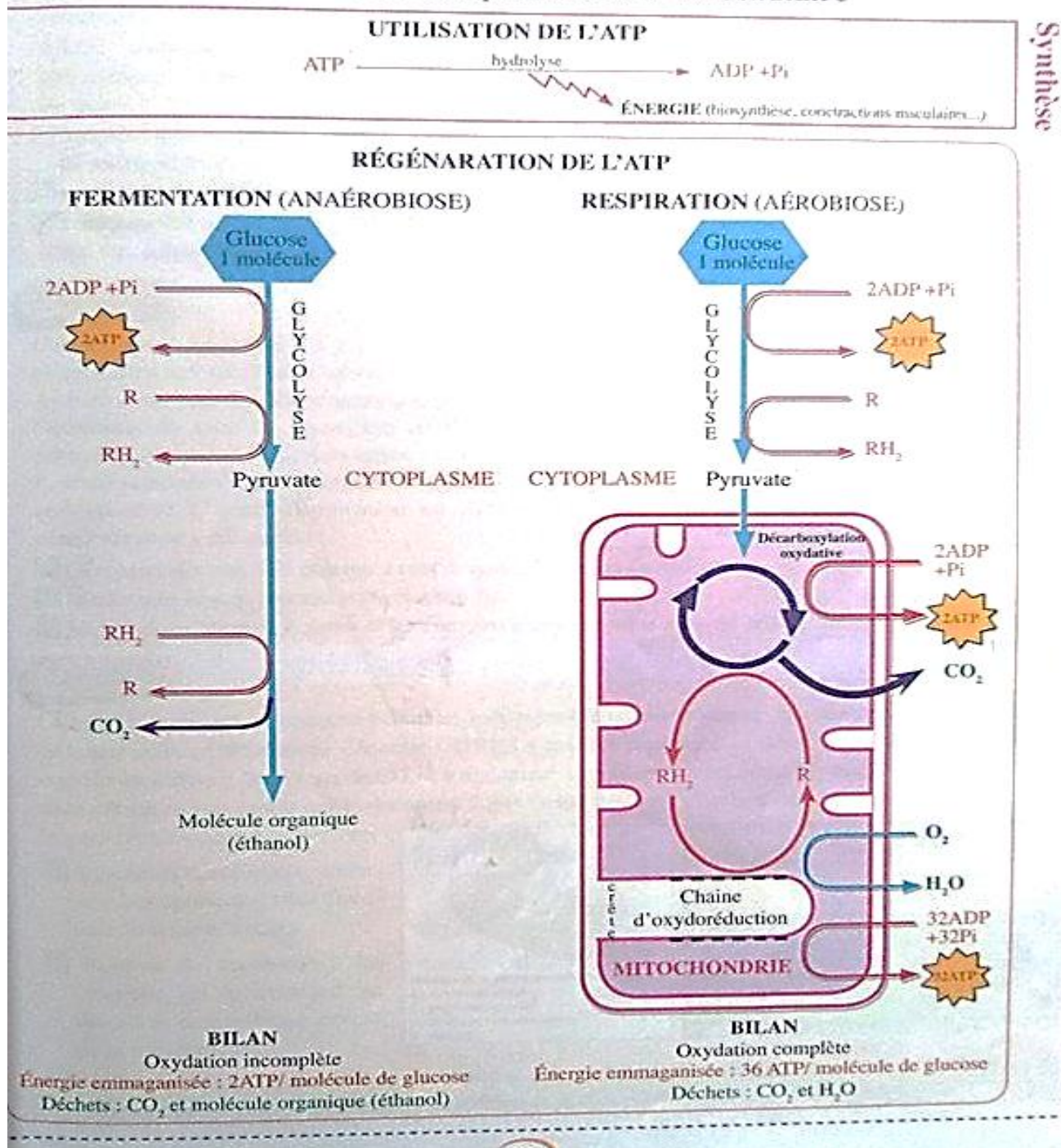
- * Au cours de la respiration la dégradation du glucose (substrat organique) est complète (les résidus minérales CO_2 et H_2O , ne contiennent aucune énergie).
- * Alors qu'au cours de la fermentation sa dégradation est partielle, le résidu carboné (éthanol ou acide lactique) contient encore de l'énergie chimique potentielle.

→ La fermentation est une perte d'énergie.

Résumé : schéma bilan page 25.

Bilan de la consommation de la matière organique et libération de l'énergie au niveau de la cellule.

L'ATP, molécule Indispensable à la vie cellulaire



Exercice à la maison :

Sujet de synthèse : Les étapes de la respiration cellulaire et les étapes de la fermentation

Chapitre 2 :

Rôle du muscle strié dans la conversion de l'énergie

Situation problème :

Au cours de la respiration et de la fermentation, une bonne partie de l'énergie potentielle contenue dans les molécules organiques est convertie en énergie potentielle contenue dans l'ATP. Cette énergie est restituée à l'occasion de l'hydrolyse de l'ATP pour être utilisée dans les activités biologiques de la cellule ((transport actif, synthèses cellulaires, travail mécanique...)

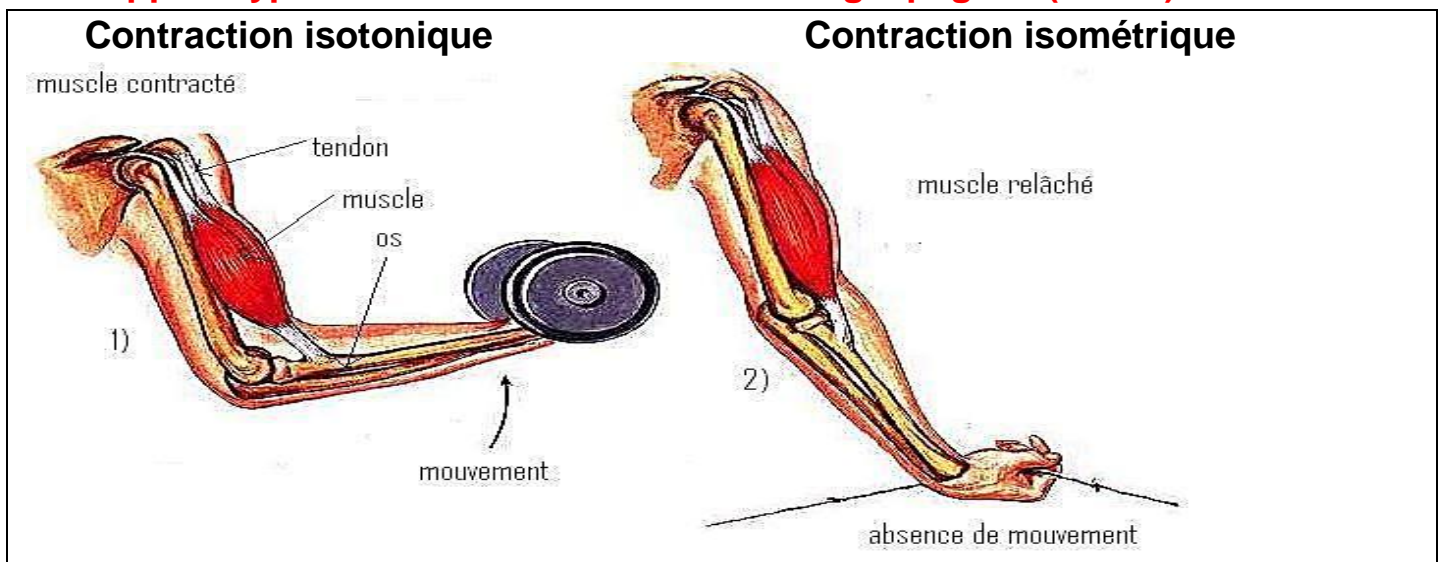
Le muscle squelettique strié est un organe spécialisé dans la production du travail mécanique. Les cellules qui le constituent s'appellent « fibres musculaires »

- *Quels sont les mécanismes de conversion de l'énergie au niveau de la fibre musculaire ?
- *Quel est le mécanisme de la contraction musculaire ?
- *Quels sont les phénomènes métaboliques accompagnant la contraction musculaire ?

I – Etude expérimentale de la contraction musculaire :

A- Enregistrement des phénomènes mécaniques de l'activité musculaire.

1- Rappel : types de contraction musculaire fig 1 page 31(svt 33)



Le muscle se caractérise par deux dimensions :

La longueur et la tension

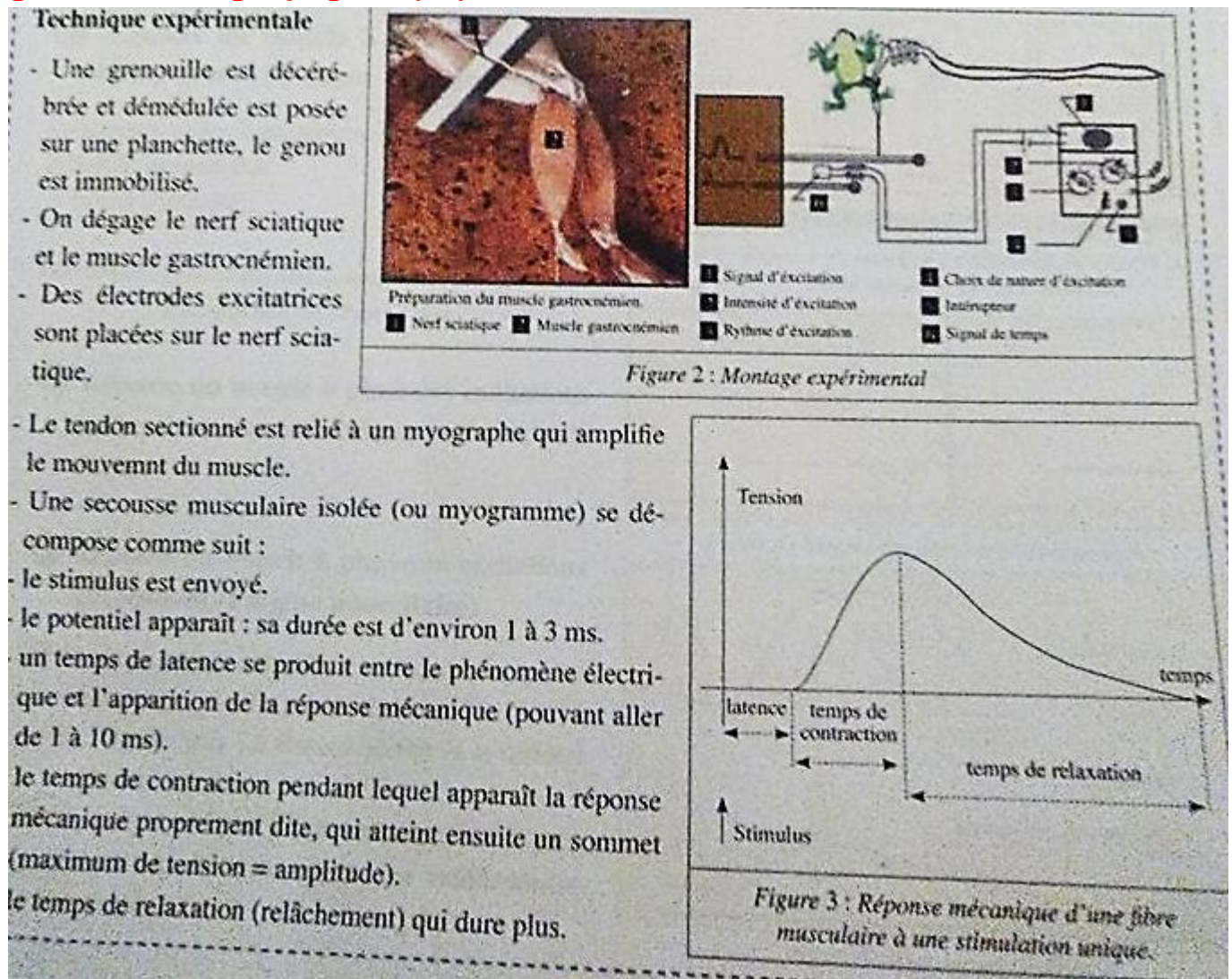
.il existe 2types de contractions ;

Contraction isométrique(longueur constante) :

Le muscle se contracte contre une force sans que sa longueur diminue .Ex : muscle qui maintient la posture.

Contraction isotonique (tension constante) : le muscle se raccourcit .Ex :les muscles qui font un mouvement

2- Dispositif expérimental pour étudier la contraction musculaire chez la grenouille : fig 2 page 31(33) fasc

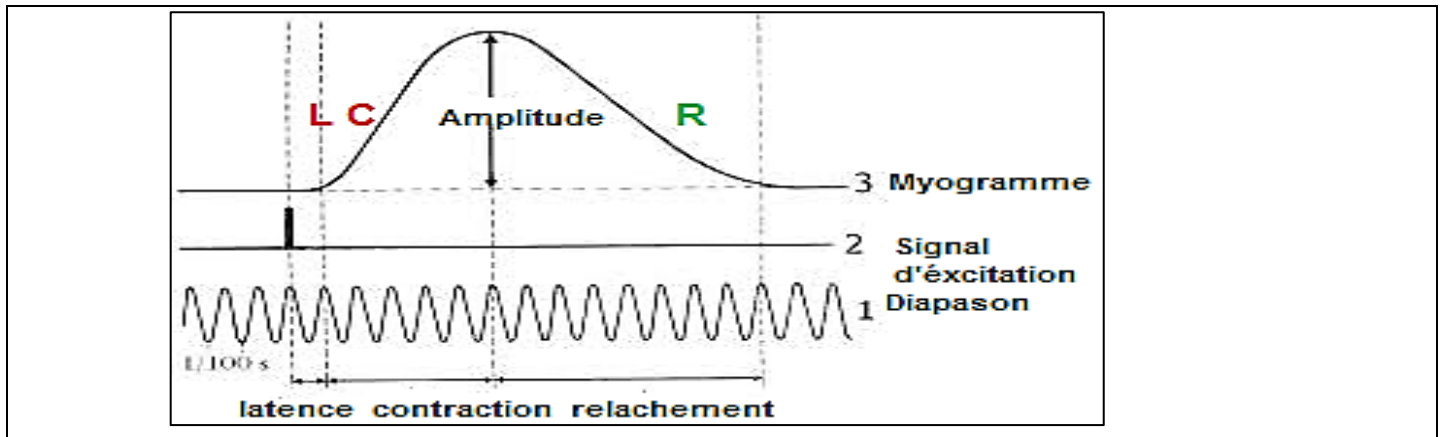


3- Enregistrement des contractions et analyses des myogrammes. :p 33 (35)

3-1- Réponse du muscle à une excitation efficace : Doc1

• Secousse musculaire isolée Figure 1 page 33(35):

On expose le muscle gastrocnémien à des excitations dans des conditions différentes du point de vue l'intensité et la durée qui les sépare : les figures du document 1 montrent les résultats obtenus.



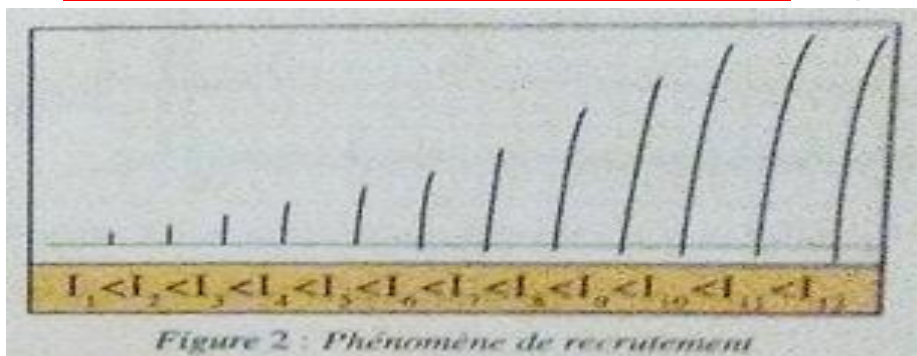
*** Analyse :**

La secousse musculaire isolé est une réponse du muscle à une stimulation efficace, le tracé (ou myogramme) obtenu est composé de 3 phases :

- **la phase de latence(L)** : période qui s'écoule entre le moment de l'excitation et le moment où le muscle commence à se contracter, elle dure 0.01s.
- **la phase de contraction(C)** : la phase ascendante au cours de laquelle la tension (ou raccourcissement) augmente progressivement jusqu'au maximum de raccourcissement ou de tension développée. Sa durée est de 0.05 s.
- **La phase de relâchement(R)**: la phase descendante au cours de laquelle la tension diminue progressivement pour revenir à sa valeur de repos. Elle dure 0.08s

La durée de relaxation est toujours supérieure à celle de la contraction.

- **Remarque : Phénomène de recrutement** : fig 2 page 33(35)



*** Analyse :**

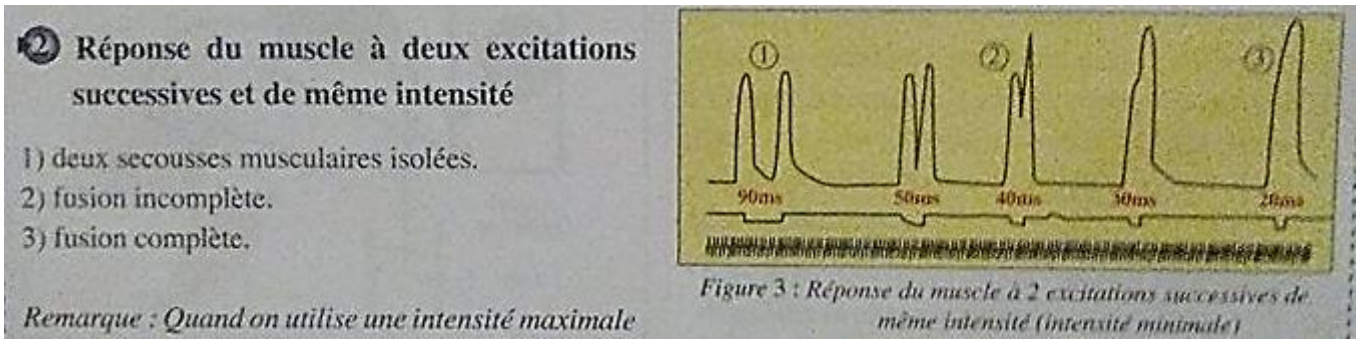
- l'excitation I_1 ne donne aucune réponse → au dessous du seuil
- lorsqu'on excite le muscle avec des intensités croissantes, on constate qu'il y'a augmentation de l'amplitude des contractions, et quand l'intensité atteint une valeur I_{11} , l'amplitude ne varie plus elle est maximale.

*** Explication :**

L'amplitude de la contraction dépend du nombre des fibres musculaires excitées, c'ad quand on excite le muscle (ou le nerf) avec des intensités croissantes le nombre des fibres excitées croît progressivement jusqu'à ce

que l'intensité de la stimulation atteint une valeur où toutes les fibres seront excités et par conséquent l'amplitude de la contraction reste constante. C'est **le phénomène de recrutement** des fibres musculaire dans la contraction.

3-2- Réponse du muscle à deux excitation efficace : fig 3 p 33 (55)

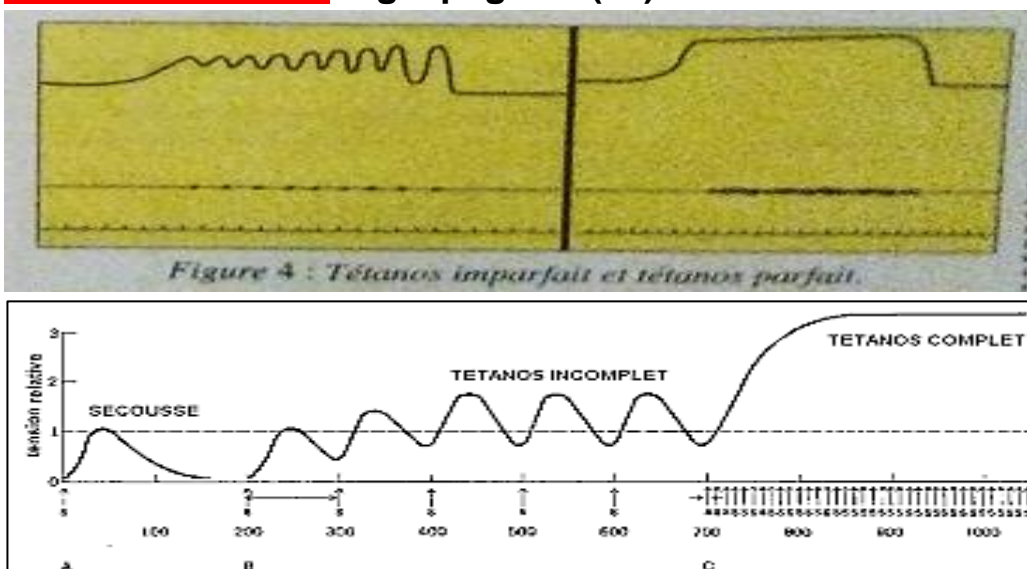


*Analyse :

- En 1 : si l'intervalle de temps entre les deux excitations est grand $>90\text{ms}$ on obtient deux secousses musculaires isolées
- En 2 : lorsque l'intervalle entre les deux excitations entre 50 et 40ms la 2^{ème} excitation intervient au cours de la phase de relâchement de la 1^{ère} réponse alors on obtient une fusion incomplète des 2 tracées.
- En 3 : lorsque l'intervalle entre les deux excitations entre 30 et 20ms, la 2^{ème} excitation intervient au cours de la phase de contraction de la 1^{ère} réponse alors on obtient une fusion complète des 2 tracées et l'amplitude augmente.

3-3- Réponse du muscle à plusieurs excitations successives :

Notion de Tétanos : fig 4 page 33 (35)



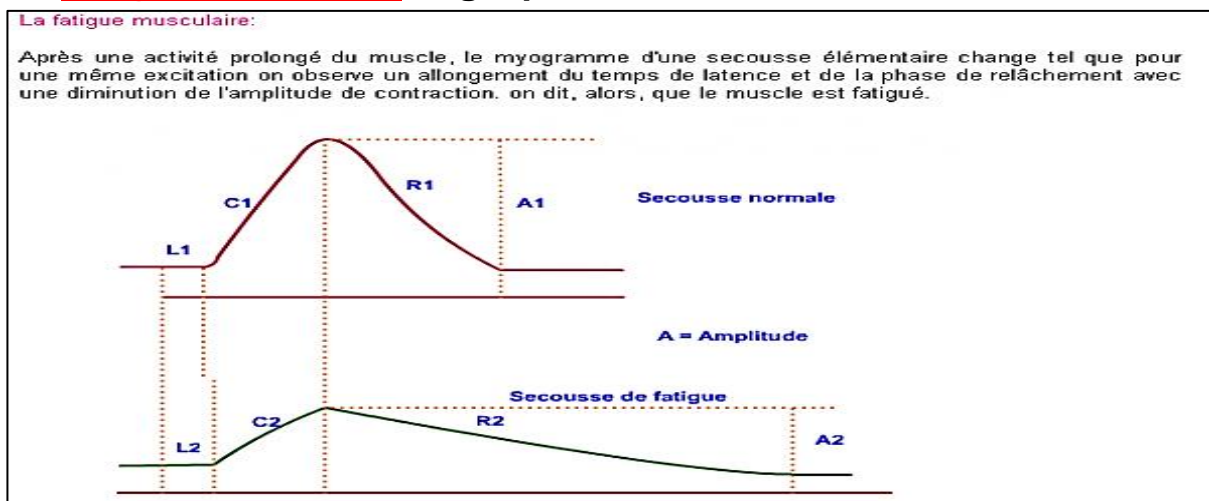
- Si on applique des stimulations, à amplitude maximale de la contraction musculaire, de tel sorte que la 2^{ème} stimulation se fait durant la phase de relâchement de la 1^{ère} réponse on obtient un tracé sinueux (fusion incomplète des secousses élémentaires) → le tétanos est dit **imparfait**.

- Si on applique des stimulations au maximum très rapprochées de telles sortes que la 2^{ème} stimulation se fait durant la phase de contraction de la 1^{ère} réponse on obtient une contraction permanente (plateau), avec fusion complète des secousses élémentaires → le tétanos est dit **parfait**.

Remarque : Le tétanos parfait est le mode de contraction des muscles dans notre organisme, les motoneurones envoient des volets d'influx et non des influx isolés. La tension tétanique peut atteindre 4 à 5 fois la valeur d'une secousse.

La force d'une contraction musculaire dépend surtout du nombre d'unités motrices se contractant simultanément, c'est la sommation spatiale.

- **Fatigue musculaire** : fig 5 p33



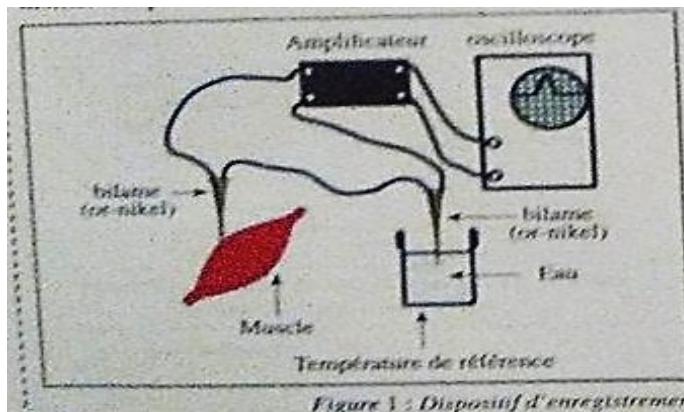
- Quand un muscle subit un grand nombre d'excitations successives il se **fatigue**, cela se traduit par un allongement du temps de latence, une diminution de l'amplitude et une augmentation de la durée de contraction (surtout la phase de relâchement)
- En cas de tétanos il y a diminution de l'amplitude du plateau.

II- Les phénomènes accompagnant la contraction musculaire

A- Phénomènes thermiques

- Expérience : document 1 fig 1 fig 2 fig3 page 35 (37)

Toute activité mécanique est accompagnée d'un dégagement de chaleur et d'un réchauffement de l'organisme. On peut mesurer la quantité de la chaleur dégagée au cours d'une activité mécanique :



Le dégagement de la chaleur au cours d'une activité mécanique confirme que le muscle est le siège des réactions chimiques exothermiques (productrices d'énergie thermique). La chaleur retardée n'est dégagée que dans un milieu aérobie. Les fibres musculaires produisent deux types de réactions chimiques exothermiques :

- Réactions chimiques exothermiques aérobies qui dégagent la chaleur retardée.
- Réactions chimiques exothermiques anaérobies qui dégagent la chaleur initiale.

Figure 1 : Dispositif d'enregistrement de la chaleur dégagée par le muscle.

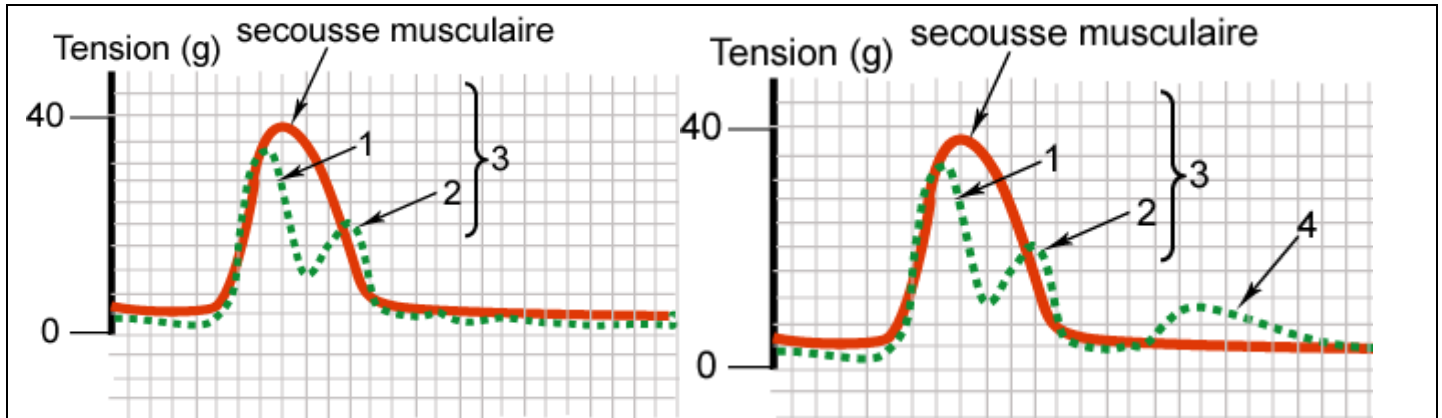


Fig2 : dégagement de la chaleur par un muscle placé dans un milieu pauvre en oxygène (en anaérobie)

Fig2 : dégagement de la chaleur par un muscle placé dans un milieu riche en oxygène (en aérobie)

1- Chaleur de contraction 2- chaleur de relâchement

3- chaleur initiale 4- chaleur retardée

1) Analysez les deux graphiques

2) Quel serait l'origine de la chaleur initiale et de la chaleur retardée ?

• Description:

* **fig 3** : Dans le milieu aérobie le muscle lors de son contraction libère 2 types de chaleurs :

- **Chaleur initiale** : échappée au cours de la secousse musculaire composée de 2 types chaleurs : chaleur de contraction (1) et chaleur de relâchement (2).

- **Chaleur retardée** : libérée après la secousse musculaire.

* **fig 2** Dans le milieu anaérobie on constate l'absence de la chaleur retardée.

* Déduction :

Il y a deux types de réactions chimiques **exothermiques** responsables de cette chaleur :

Réactions **anaérobies** qui dégagent la chaleur **initiale**

Réactions **aérobies** qui dégagent la chaleur **retardée**.

B- Phénomènes chimiques et énergétiques:

- **Données expérimentales** : document 2 page 37 (39)

Des prélèvements simultanés de sang artériel afférant et de sang veineux efférent d'un muscle comme le releveur de la lèvre supérieur du cheval .
les résultats sont représentés dans la figure 1 :

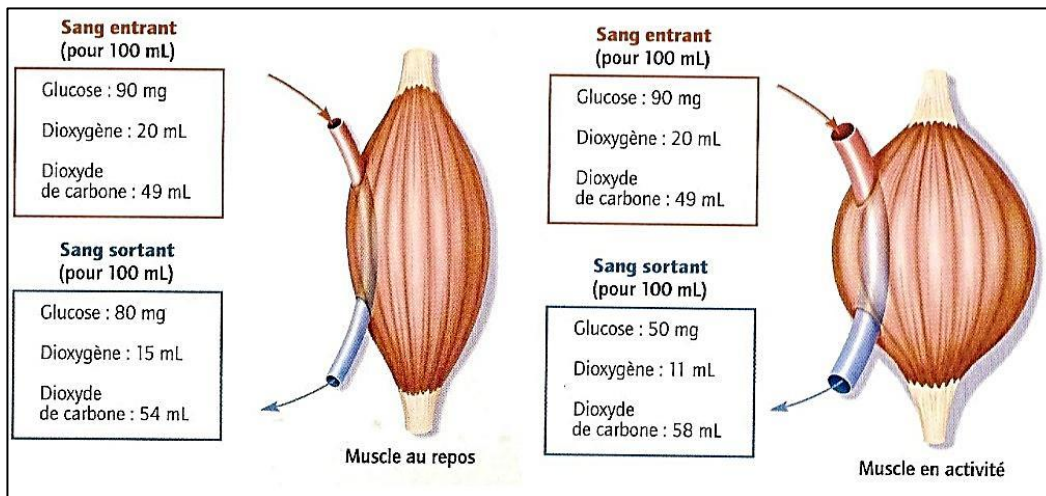


Fig 1 : composition du sang d'un muscle au repos et en activité

***Analyse fig 1 :**

Au cours de l'activité physique le muscle augmente sa consommation en dioxygène et en glucose avec plus de dégagement de CO_2 .
(il y a aussi augmentation du débit sanguin).

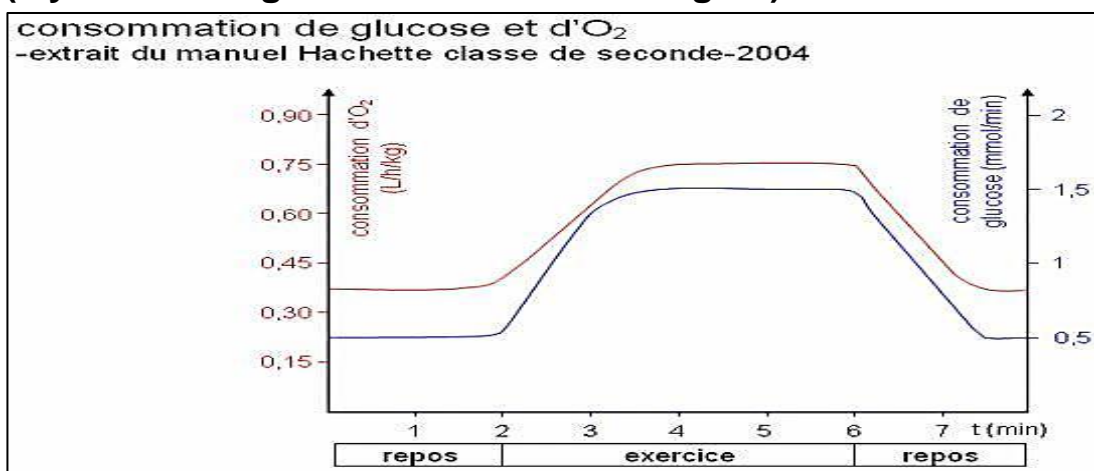


Fig2 : variation du taux du glucose et d' O_2 d'un muscle au repos et en exercice

***Analyse fig2 :**

Au repos la consommation de glucose et d' O_2 est faible alors que pendant l'exercice elle augmente en parallèle pour diminuer une autre fois lorsque le muscle se repose.

*****Déduction** -> lors de son contraction le muscle tire son énergie par l'oxydation du glucose (**respiration**).

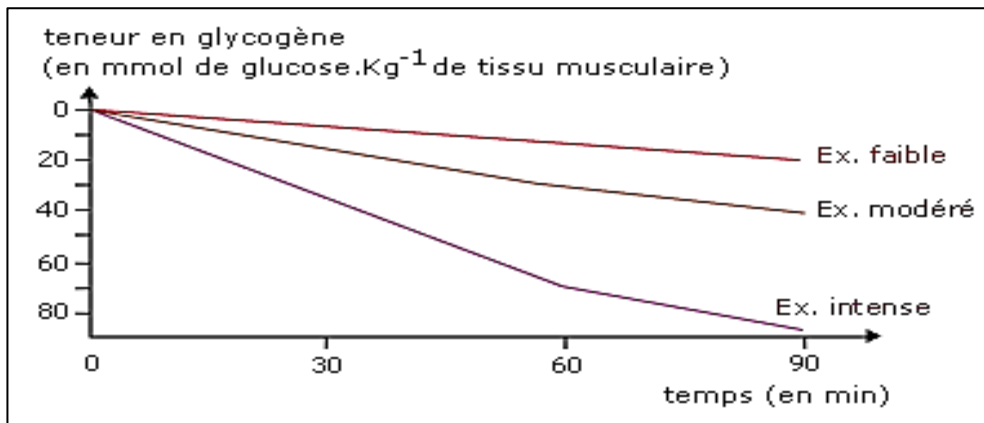


Fig3 : la teneur en glycogène des muscles mesurée au cours d'exercices d'intensités différents

*** Analyse et déduction fig3**

On constate que lorsque l'intensité de l'exercice physique augmente la quantité du glycogène musculaire diminue

→ Le glucose utilisé pour la production de l'énergie nécessaire à la contraction musculaire provient de la dégradation du glycogène musculaire

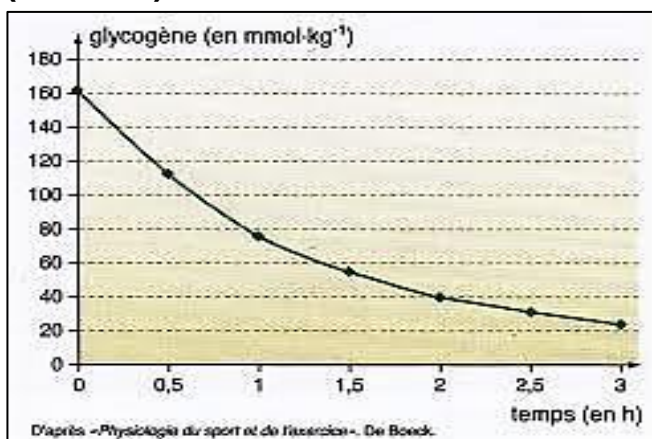
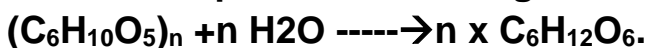


Fig4 : évolution du glycogène d'un muscle en activité

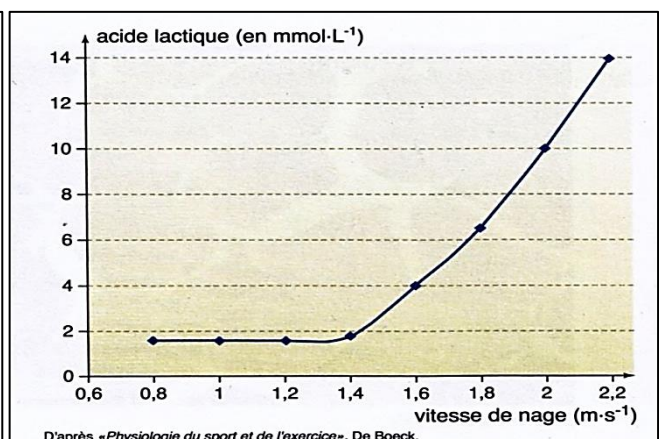
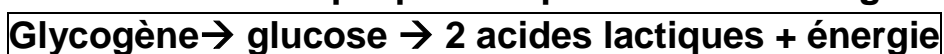


fig5 : évolution de l'acide lactique d'un muscle en activité

*** Analyse et déduction fig 4 -5 :**

Au cours d'un exercice physique prolongée on constate la diminution du glycogène musculaire au cours du temps et un moment donné il y a apparition et augmentation de l'acide lactique

--→ Avec l'augmentation de l'effort physique, le muscle fait recours à la fermentation lactique pour se procurer de l'énergie nécessaire à son activité :



Conclusion générale :

l'énergie nécessaire à la contraction musculaire provient de **la respiration** et aussi de **la fermentation lactique**.

III- Structures musculaires responsables de la contraction musculaire

A- Observation à l'œil nu : document 1 fig 1 page 39(41)

Fig1 : coupe longitudinale du muscle avec détails structuraux

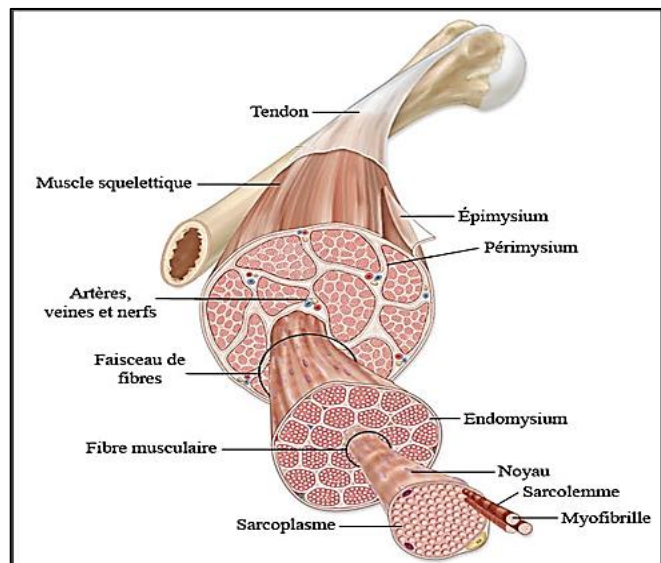
Les muscles constituent environ 40% de notre poids.

Le muscle squelettique est formé de plusieurs faisceaux de fibres musculaires chaque faisceau est lui-même constitué de plusieurs fibres musculaires appelés myofibres

La cellule musculaire possède plusieurs noyaux

Il y'a trois types de muscles :

- les muscles striés squelettiques
- les muscles lisses
- le muscle strié cardiaque



microscopique :

***-Structure de la fibre musculaire fig 2 ; 3 page39 (41)

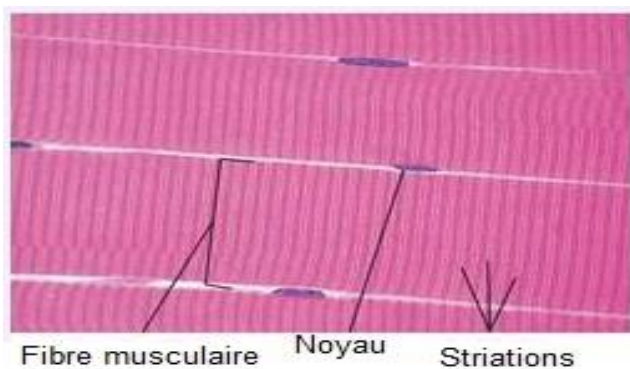


Fig 2 : coupe longitudinale d'une myofibrille d'un muscle au repos

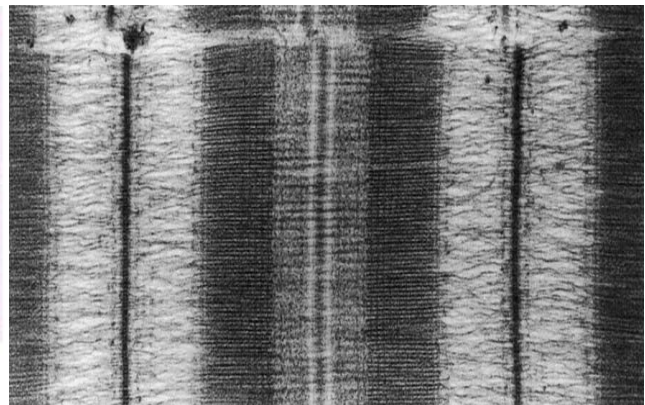
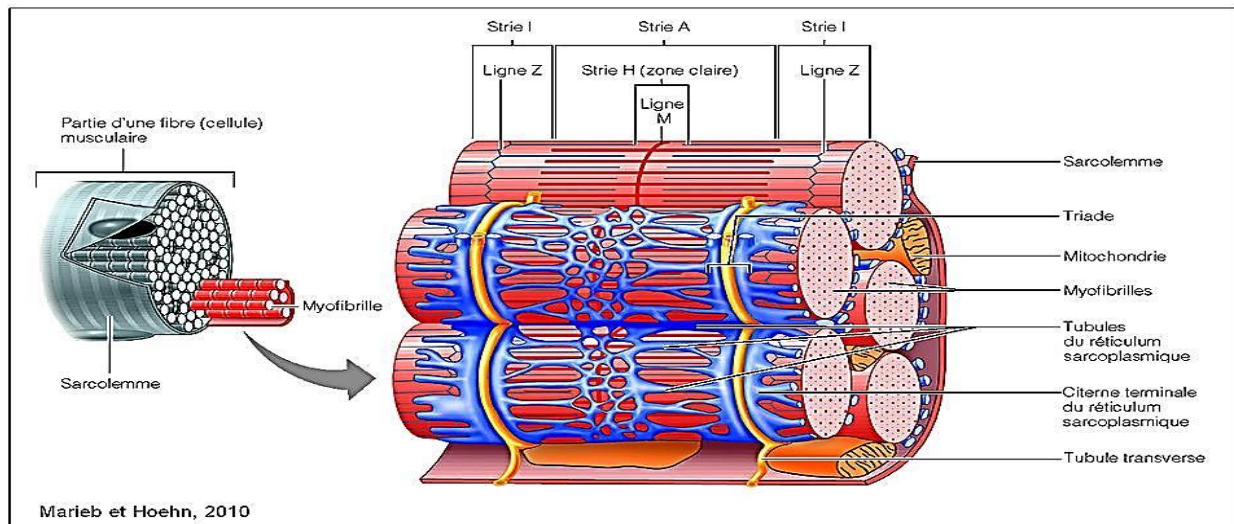
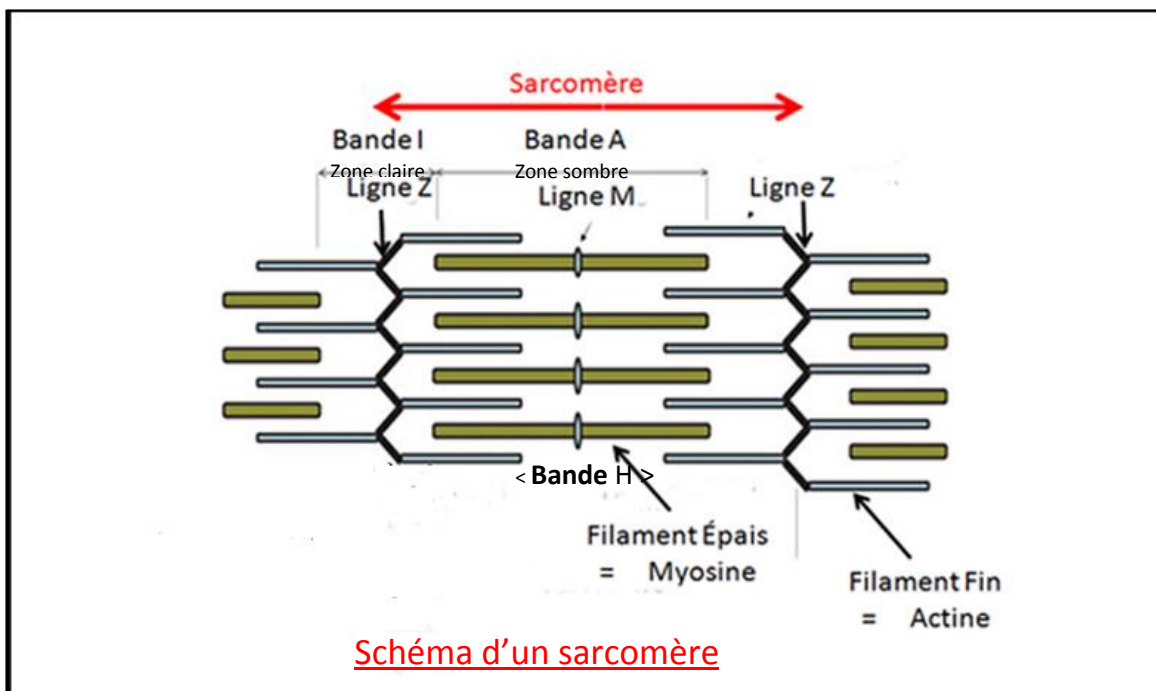


fig3 : fibre musculaire striées vues à la microscope électronique(Les sarcomères)

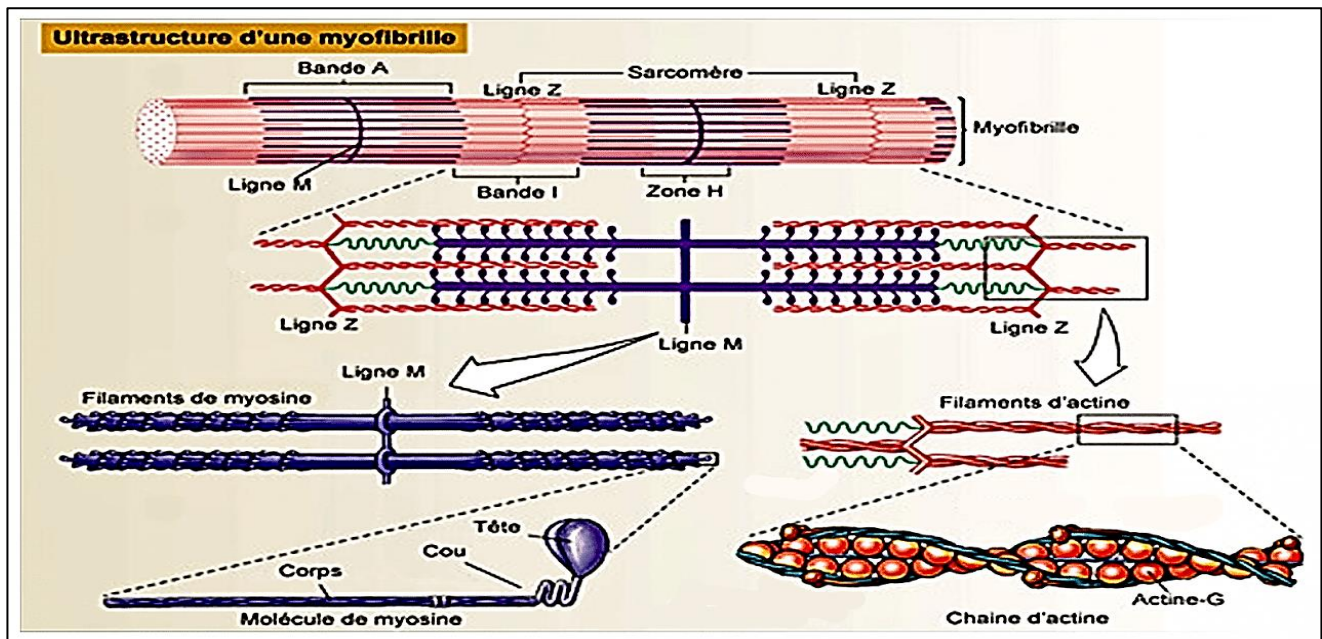
***- Ultrastructure du sarcomère : fig 4 page 41(43)



****Exercice :** Représenter un sarcomère avec un schéma annoté



C- Ultrastructure et structure moléculaire des myofilaments d'actine et de myosine : fig 5 page 41 (43) .



Résumé bilan :

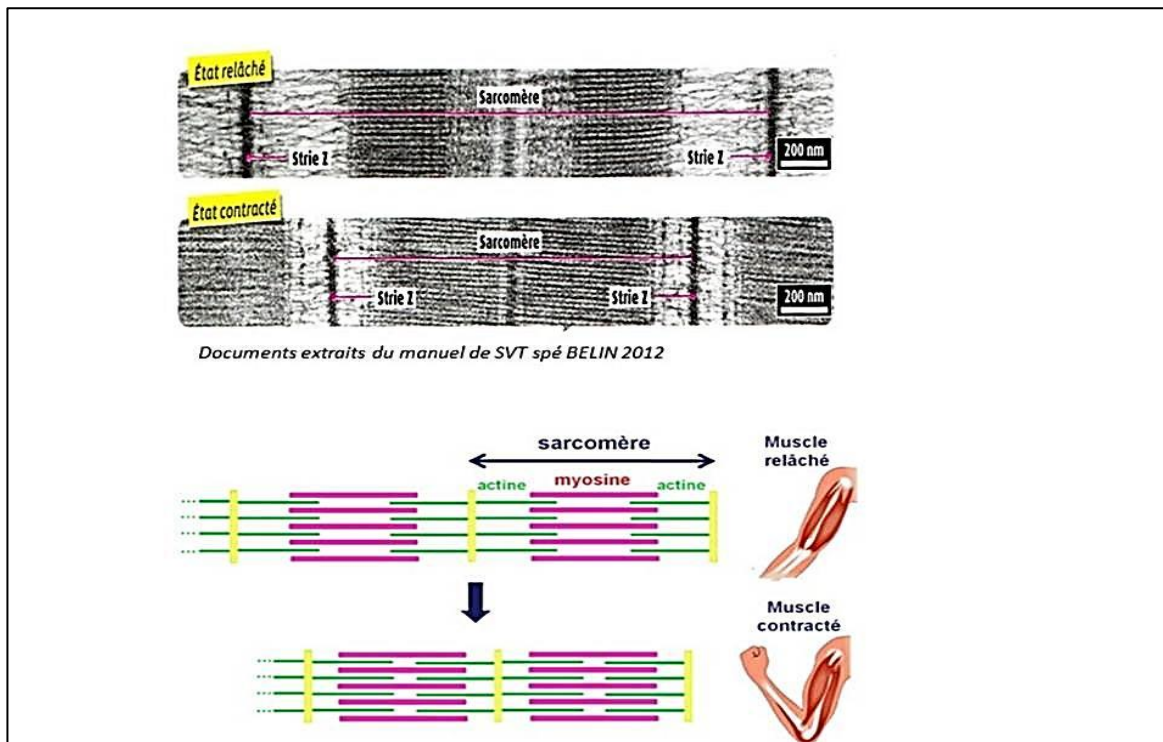
Le muscle squelettique est formé de plusieurs faisceaux de **fibres musculaires**. La fibre musculaire est une cellule fusiforme appelée **myocyte** dont le diamètre varie entre 10 et 100 mm et qui contient de nombreux noyaux, mitochondries, réserves du glycogène...et des filaments parallèles : les myofibrilles.

- Observé au microscope optique, le cytoplasme de la fibre musculaire appelé **sarcomplasme** présente une succession de bandes claires et sombres. D'où l'appellation « **muscle strié** ». Ces fibres musculaires sont enveloppées d'une membrane appelée **sarcolemme**.
- Au microscope électronique, **la myofibrille** présente une alternance de bandes claires (I) et de bandes sombres (A). Au milieu de la bande claire (I) on trouve **la strie Z**. Au milieu de la bande sombre (A), on trouve une bande H relativement claire. La zone comprise entre deux stries Z successives constitue l'unité fonctionnelle de la myofibrille : C'est **le sarcomère**.
- Chaque **sarcomère** est constitué par l'alternance de 2 types de filaments :
 - Les myofilaments épais constitués d'une protéine contractile dite **myosine**.
 - Les myofilaments fins constitués de 3 catégories de protéines : « **troponine** », « **tropomyosine** » et l'essentielle « **l'actine** ».

IV - Mécanisme de la contraction musculaire

A- Conditions et mécanismes de la contraction musculaire

1- Aspect de la contraction musculaire : document 1 page 43 (45)



- **La comparaison entre un sarcomère contracté et un sarcomère au repos :** montre que la contraction se traduit par :
 - un raccourcissement des sarcomères (rapprochement des lignes z)
 - une réduction de la longueur des bandes claires et la bande H
 - et une constance des bandes sombres.

- **Explication :**

Au cours de la contraction, il y'a un glissement des myofilaments d'actine par rapport aux filaments de myosine. «**Théorie de glissements des myofilaments** »

- **Conclusion :**

le sarcomère est **l'unité fonctionnelle** de la contraction musculaire.

2- **Les conditions de la contraction musculaire**

Exercice : document 2 page 43 (45)

Pour comprendre le mécanisme de la contraction, on réalise les observations et expériences suivantes :

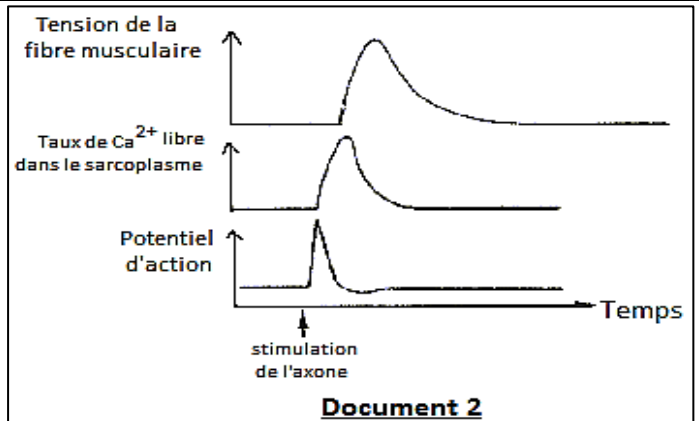
- 1) L'injection d'ions calcium dans le hyaloplasme d'une fibre musculaire entraîne la contraction des myofibrilles.
- 2) On cultive des fibres musculaires dans un milieu contenant du calcium radioactif .Par autoradiographie on constate que le calcium radioactif est dans le réticulum endoplasmique quand les fibres sont relâchées et dispersé dans le hyaloplasme quand les fibres sont contractées.

3) La figure 1 :

Traduit des observations faites au cours de la contraction musculaire

4) On cultive *in vitro* des protéines A et/ou des protéines M dans différents milieux de culture. Les résultats des expériences sont rassemblés dans le tableau de la figure 2 (A=actine, M= myosine)

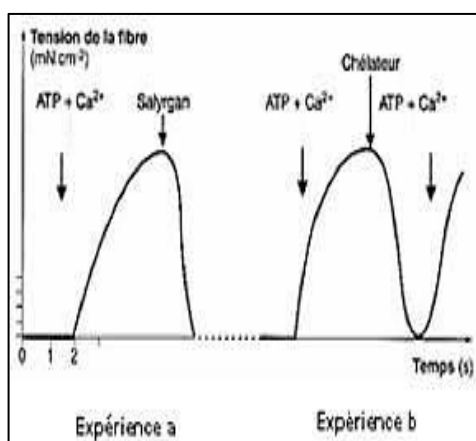
figure 1



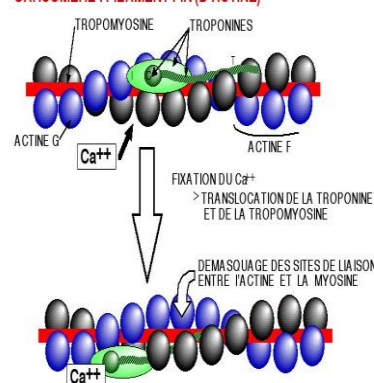
Expériences	Conditions expérimentales	Complexes actomyosine	Production de chaleur	Evolution de la concentration d'ATP
a	A + M + ATP	absentes	faible	diminution faible
b	A + M + ATP + Ca^{2+}	présentes	importante	diminution importante
c	ATP + A + Ca^{2+}	absentes	nulle	aucune évolution
d	M + ATP + Ca^{2+}	absentes	faible	diminution faible

figure 2

- Expérience a : étude de la contraction d'une fibre isolée en présence ou en absence de salyrgan, poison bloquant l'hydrolyse de l'ATP.
- Expérience B : étude de la contraction d'une fibre isolée en présence ou en absence d'un chélateur du calcium. C'est une substance qui fixe les ions calcium, bloquant ainsi leur action.
- Les résultats des expériences sont présentés dans la figure 3
- en absence de calcium, la troponine masque le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine → il n'y a pas de formation du pont actomyosine.



SARCOMERE : FILAMENT FIN (D'ACTINE)



INTERACTION ACTINE-MYOSINE

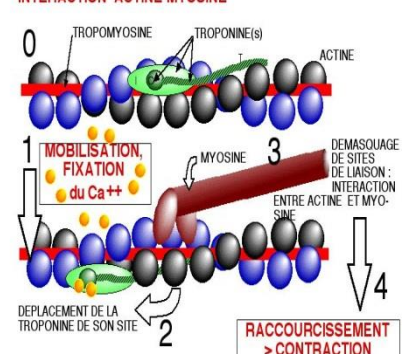


fig3

- 1- En analysant la figure 1 , déduisez la relation entre la stimulation , la libération du Ca^{++} et la tension (contraction) de la fibre musculaire.
- 2- En se basant sur la figure 4, Quel donc est le rôle du Ca^{++} dans la formation du complexe actomyosine ?
- 3- En exploitant les figures 2,3 et 4 précisez les conditions de la contraction musculaire.

Réponse :

- 1- D'après la figure 1 on constate que la libération du calcium dans le sarcoplasme, qui suit directement l'excitation de l'axone, se produit durant la phase de latence de la secousse musculaire.
→ Donc la stimulation du la fibre musculaire (par le nerf) provoque la libération de Ca^{++} par le Réticulum sarcoplasmique(Endoplasmique) dans le sarcoplasme (cytoplasme) ce qui aboutit à la contraction de la fibre musculaire.
- 2- « Stimulation du nerf → arrivée du **PA** à la fibre musculaire et excitation → la libération du Ca^{++} à partir du réticulum sarcoplasmique→fixation Ca^{++} sur la troponine des myofilaments d'actine → changement de conformation → démasquage du site de fixation d'actine à la myosine →formation du complexe ou **pont actine-myosine** ----> glissement des filaments et contraction de la fibre musculaire. »

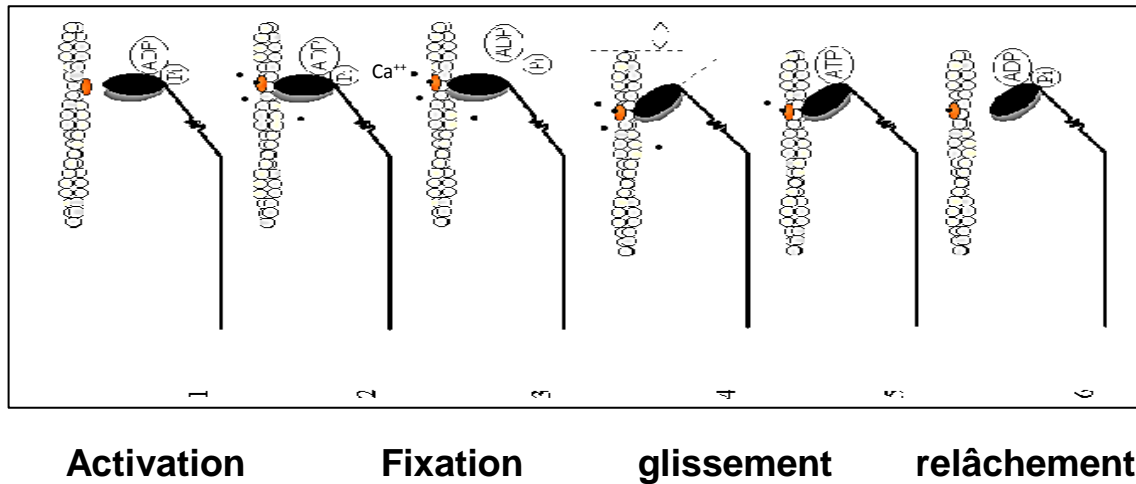
3- Fig 2 :

Description : on constate d'après le tableau que seul en présence de l'Actine +Myosine+ ATP + Ca^{++} qu'il y a diminution de l'ATP et production de chaleur
Explication : Ca^{++} favorise la formation du pont actine- myosine ce dernier joue le rôle d'un **complexe enzymatique ATPasique** ce qui active l'hydrolyse de L'ATP et libération d'énergie. (→**Glissement et chaleur**)

Fig 3 :

Les deux expériences a et b prouve l'explication précédente càd que lorsqu'on bloque l'hydrolyse d'ATP (par **salygran**) ou la fixation de Ca^{++} (par **chélateur**) il n'y aura pas formation des complexes actino-myosine→pas d'hydrolyse d'ATP → pas d'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

B- Les étapes de la contraction musculaire :Doc 2 page 45 (49)



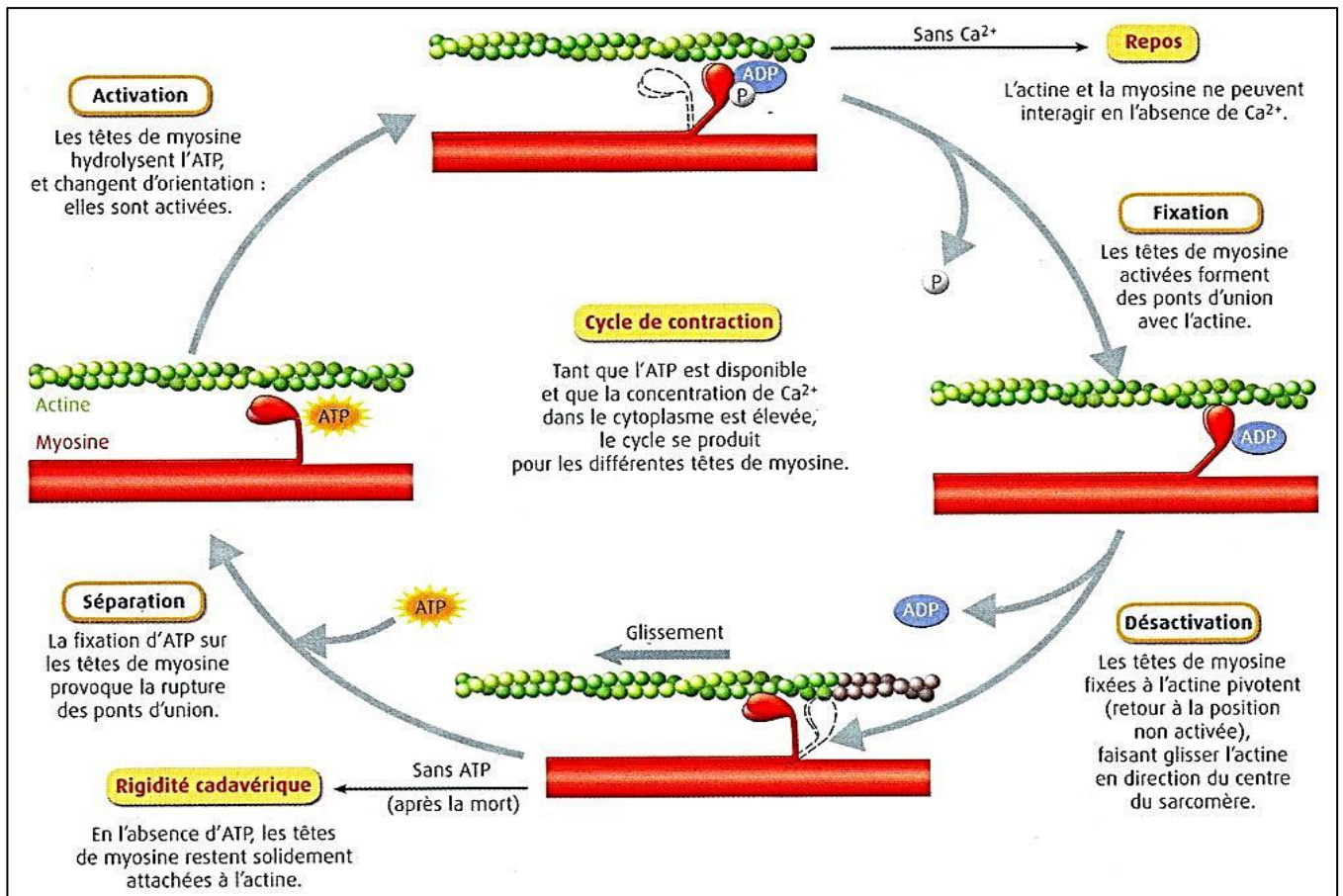
- 1- A l'état non activé, la tropomyosine masque le site de fixation de la myosine sur l'actine
- 2- le calcium provenant du réticulum se fixe sur la troponine entrainant le glissement de la tropomyosine
- 3- formation des ponts d'union entre actine et myosine
- 4- libération d'ADP et de P provoquant la rotation de la tête de myosine fixée à l'actine créant le mouvement du filament fin
- 5- fixation d'ATP sur la tête de myosine provoquant son détachement de l'actine
- 6- hydrolyse de l'ATP provoquant le redressement de la tête de myosine

C- Succession d'événements de l'excitation à la contraction musculaire :

- Au repos, la troponine masque le site de la liaison de la myosine avec l'actine .une molécule d'ATP est liée à la tête de la myosine.
- Contraction
 - 1** : L'arrivée de l'influx nerveux induit la libération de Ca²⁺ par le réticulum sarcoplasmique et augmente sa concentration intracytoplasmique.
 - 2** : Le Ca²⁺ se fixe à la troponine ce qui permet le démasquage du site de fixation et attachement actine et myosine→ formation des ponts acto-myosine.
 - 3** : Hydrolyse de l'ATP et libération de l'énergie nécessaire au pivotement de la tête de myosine...
Les têtes de myosines pivotent vers le centre du sarcomère, entrainant un glissement d'actine entre les myofilaments de la myosine.
 - 4** : libération d'ADP et fixation d'une nouvelle molécule d'ATP permettent le redressement de la tête de myosine et la suppression de la liaison entre l'actine et la myosine.
(Le cycle se répète tant que les ions Ca²⁺ sont présents)

- **Relâchement** : Après l'arrêt de la stimulation : retour des ions Ca^{++} vers le réticulum sarcoplasmique, détachement d'actine et de myosine, redressement des têtes de myosine et fixation de nouvelles ATP, retour d'actine à la position initiale et masquage des sites de fixation.

D- ****Schéma bilan page 47 : Cycle de contraction de la fibre musculaire**



Situation problème :

La contraction musculaire utilise directement l'énergie libérée par l'hydrolyse d'ATP. Les quantités d'ATP et d'ADP + Pi dans la cellule sont très limitées. D'où la nécessité d'une régénération permanente et régulée.

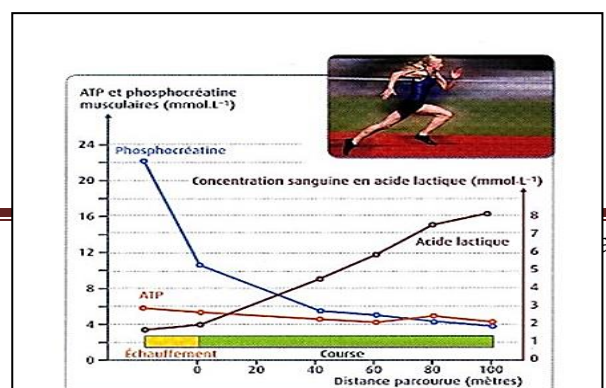
- Quelles sont les voies métaboliques qui assurent la régénération de l'ATP
- Quelle est la relation entre la régénération de l'ATP et la chaleur dégagée lors de la contraction musculaire ?

V - Mode de régénération de l'ATP

A- Mise en évidence de la nécessité de la régénération de l'ATP : Doc 1p49 (51)

Fig1

	Glycogene en g/kg	ATP en mM/l	Phosphocréatine en mM/l
Avant contraction	10,8	4 à 8	10 à 12
Après	8	4 à 8	4 à 6



contraction			
-------------	--	--	--

Réponses :

1- Au cours d'un exercice musculaire **intense**,

Les réserves en glycogène et en phosphocréatine diminuent tandis que le petit stock en ATP reste constant.

Cette constance peut être due au renouvellement permanent de l'ATP à partir de la dégradation du glycogène et du phosphocréatine.

2- Au début de l'exercice physique (échauffement) il y a une légère diminution d'ATP, diminution rapide de phosphocréatine ; légère augmentation de l'acide lactique.

- Au cours de la course on assiste à la diminution du phosphocréatine tandis qu'une élévation du taux de l'acide lactique. la quantité d'ATP reste +/- stable.

3- La quantité d'ATP est faible et constante dans la fibre musculaire, ce qui nécessite sa régénération en permanence.

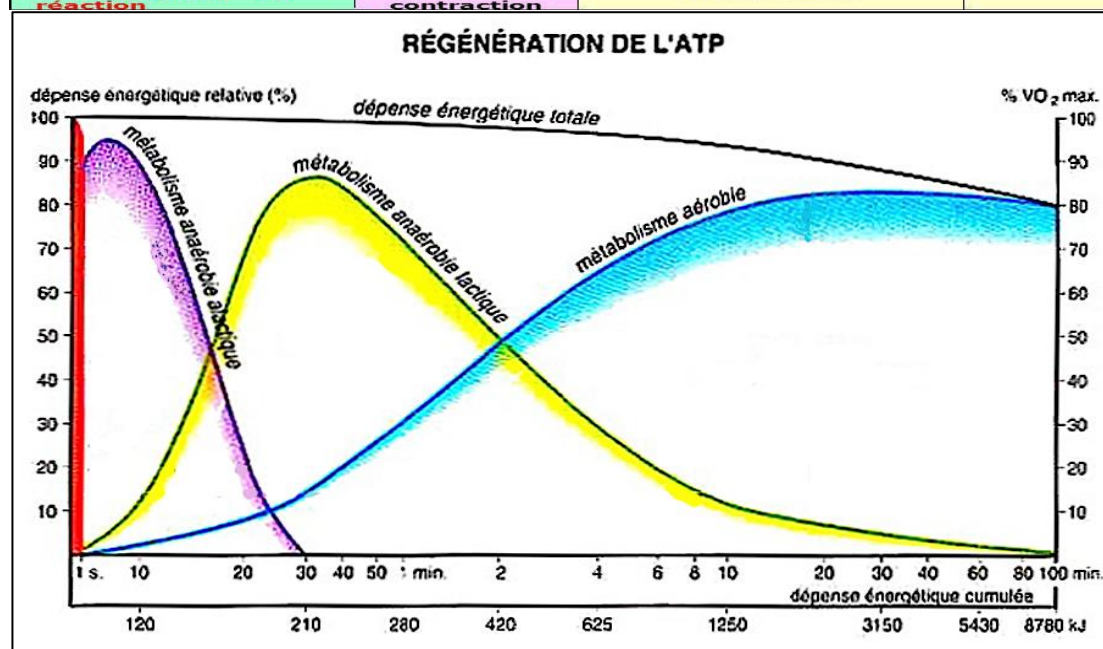
Cette régénération se fait à partir de la dégradation du phosphocréatine et à partir de la dégradation du glycogène (-> glucose → fermentation lactique et respiration).

B- Les voies métaboliques de la régénération de l'ATP :

*- Exercice : doc 2 page 49 (51)

4- Origine de l'énergie musculaire 1/2

	Source principale	Sources secondaires	
Importance de la source dans la contraction	Source immédiate	Voies rapides de régénération de l'ATP	Voies lentes de régénération de l'ATP
Nature de la réaction	Hydrolyse de l'ATP	Phosphorylation de l'ADP « Par une molécule d'ACP « Par une autre molécule d'ADP	Glycolyse
Équation	$\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow[\text{ATPase}]{\text{myosine}} \text{ADP} + \text{P} + \text{E}$	$\text{ADP} + \text{ACP} \rightarrow \text{ATP} + \text{créatine} + \text{Chaleur}$ $\text{ADP} + \text{ADP} \xrightarrow{\text{myokinase}} \text{ATP} + \text{AMP}$	$\text{Glycogène} + \text{P}_i \rightarrow \text{glucose P} \rightarrow 2 \text{ ac pyr} \rightarrow 2 \text{ ATP}$ <p>utilisation de l'ac pyr</p>
Dépendance de l'O ₂	Réaction anaérobie	Réaction anaérobie	Glycolyse aérobie Glycolyse anaérobie
Chaleur accompagnant la réaction	Chaleur initiale de contraction	Chaleur initiale de relâchement	Chaleur retardée



3- Analyse ou description de la figure1(tableau) :

Le tableau indique que la source immédiate de l'énergie musculaire est **l'hydrolyse d'ATP** ce pendant la régénération de l'ATP peut se faire par trois voies métaboliques, deux anaérobies (rapides), ne nécessitant pas O₂, et une troisième voie aérobie (lente).

- Analyse ou description de la figure 2 : Le document montre que:
 - Pendant les premières secondes, la voie 1, anaérobie alactique (phosphocréatine), assure quasiment toute la régénération de l'ATP. Son apport diminue rapidement pour s'annuler vers 30 secondes d'effort .
 - Au bout d'environ 10 secondes, la voie 2 anaérobie lactique contribue de plus en plus à la régénération de l'ATP, pour en assurer 90 % au bout de 40 s .
 - après 20 minutes la voie aérobie est lente à atteindre son efficacité maximale 90% environ. mais ensuite il peut assurer la régénération de l'ATP pendant un temps prolongé à forte intensité de l'effort.

*- Conclusion :

La concentration d'ATP dans les cellules musculaire est très faible et ne varie quasiment pas pendant l'effort.

L'ATP est donc régénéré au fur et à mesure de sa consommation, et cela se fait selon trois voies :

I - Voie métabolique rapide ,anaérobie ,alactique(responsable de chaleur initiale) : (Dans moins de 30s)

Régénération de l'ATP par l'ADP et par la phosphocréatine (PC).

(Myokinase)

1^{ère} Reaction: $ADP + ADP \longrightarrow ATP + AMP$

(Phospho créatine kinase)

2^{ème} réaction : $PC \text{ (phosphocréatine)} + ADP \longrightarrow ATP + C \text{ (créatine)}$

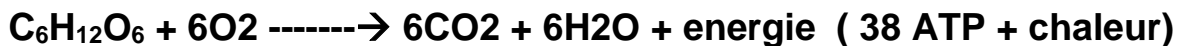
. II - Voie métabolique moyenne, anaérobie lactique: Fermentation lactique (Utilisation du glucose sanguin et hydrolyse du glycogène cytoplasmique).

$Glycogène + H_2O \longrightarrow n \text{ glucose}$

$Glucose + 2ADP + 2P_i \longrightarrow 2 \text{ acides lactiques} + 2 \text{ ATP (+chaleur)}$

Remarque : l'accumulation de l'acide lactique-> diminution Ph -> diminution de l'activité enzymatique et métabolique→ fatigue et crampes musculaires. Au repos, l'acide lactique (responsables des crampes) est transféré vers le foie où il se sera oxydé = l'essoufflement → dettes en oxygène (oxygène excédentaire consommé durant la phase de récupération post exercice).

. III-Voie métabolique lente aérobie: la respiration cellulaire.(Responsable de la chaleur retardée)



Remarque : L'ATP régénéré par la respiration cellulaire et la fermentation lactique permet de régénérer l'ADP et reformer le stock de phosphocréatine (PC).

VI -Conclusion générale :

Au cours de la contraction musculaire il y'a transformation de **l'énergie chimique** (ATP) en **énergie mécanique** (glissement des protéines d'actine et de myosine) et en **énergie calorifique** (chaleur).

