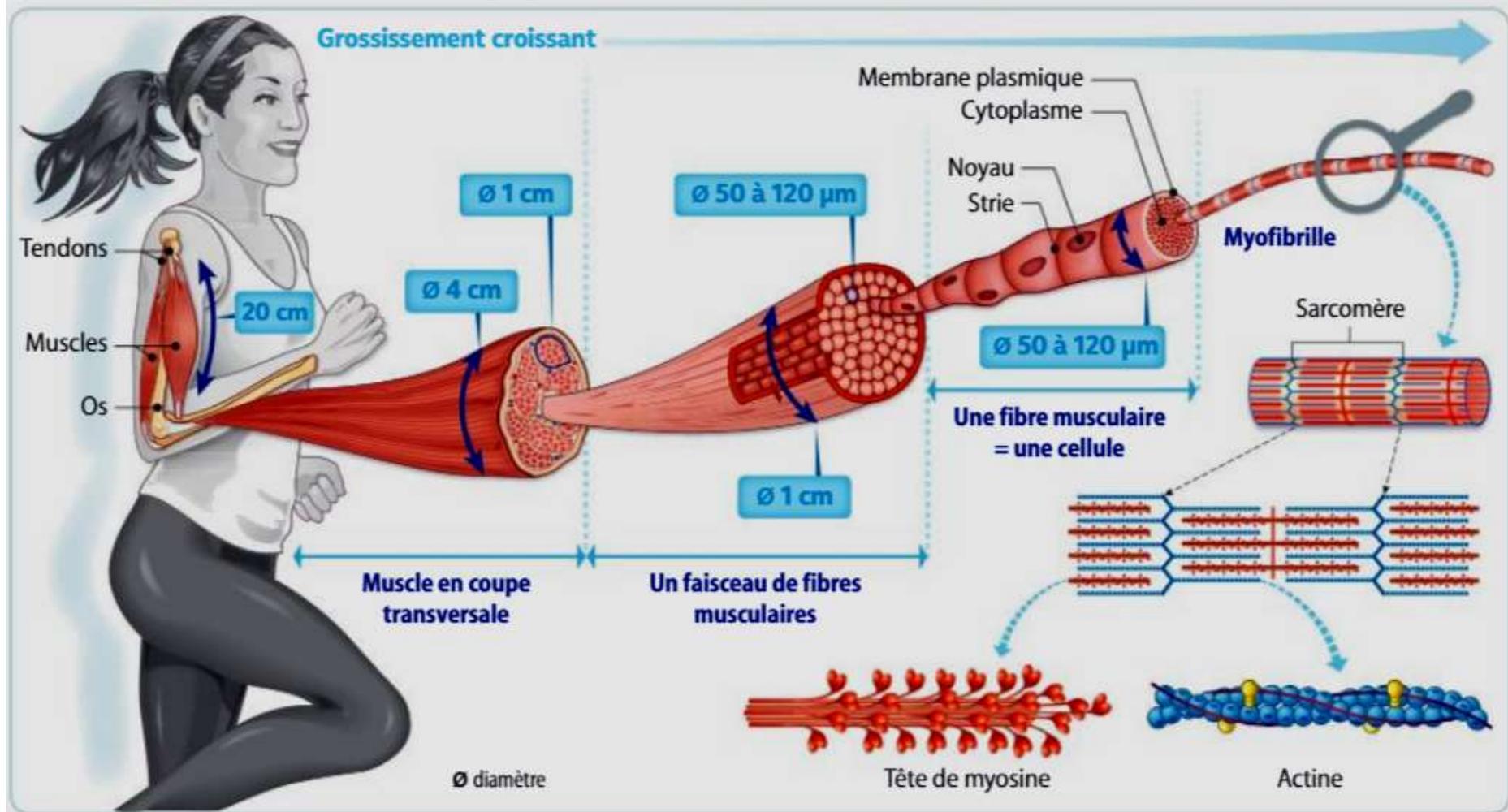


Le fonctionnement des cellules musculaires



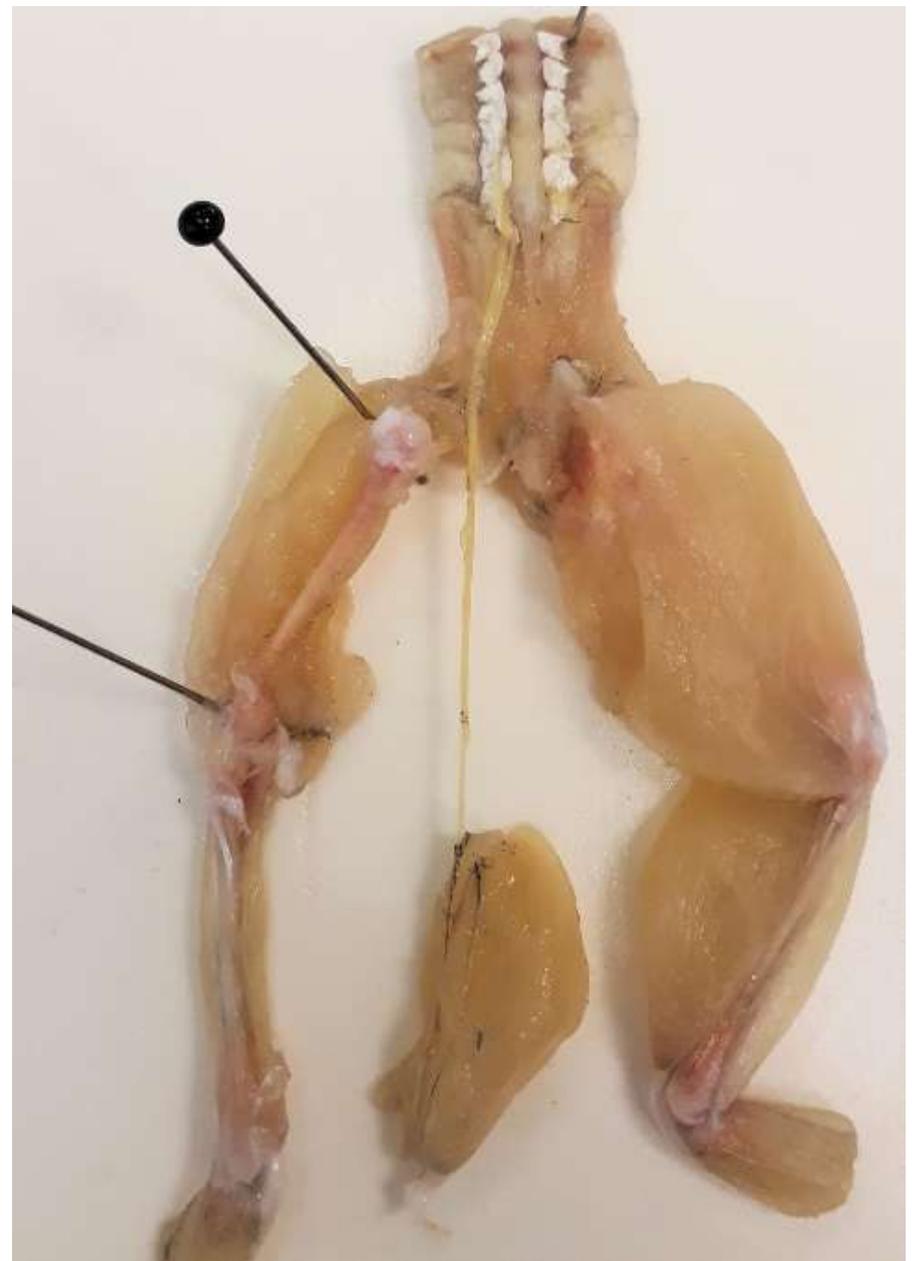
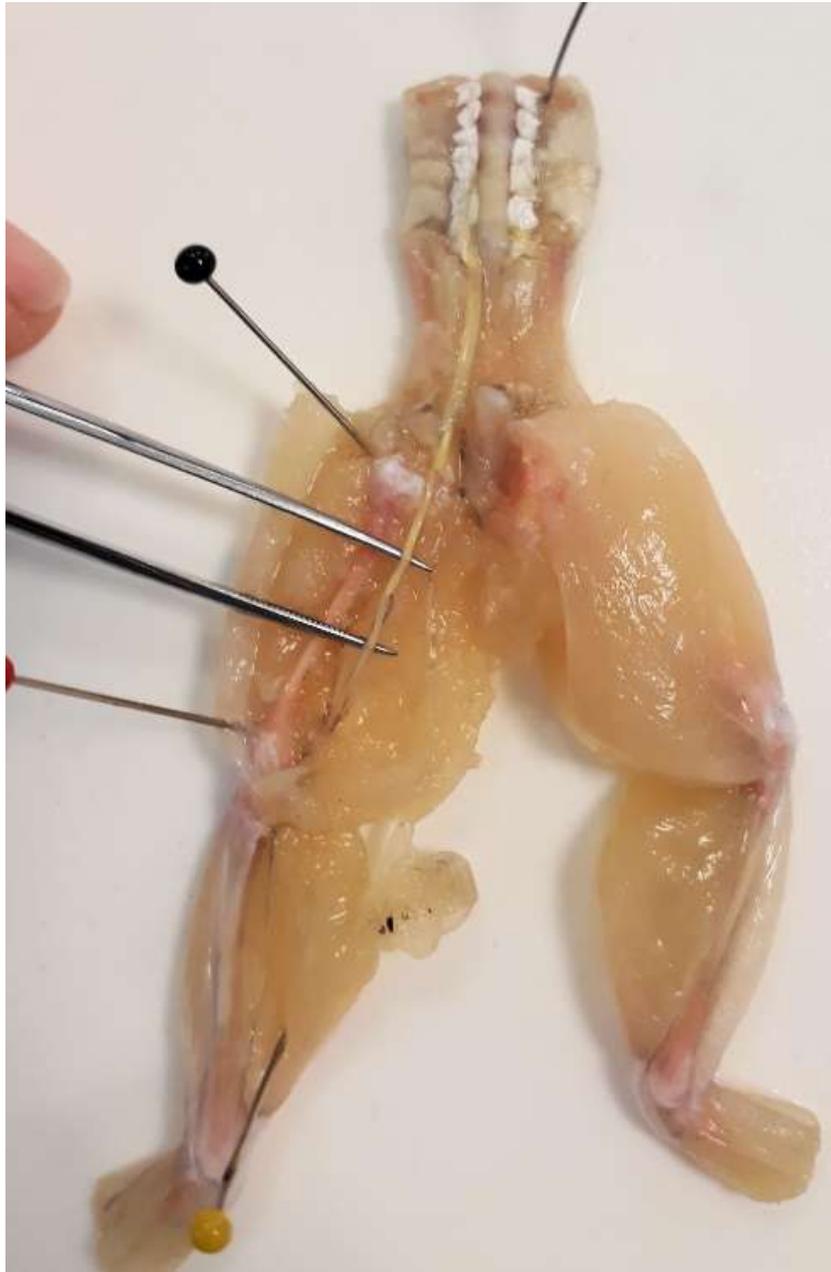
Schéma 2 : Organisation du muscle à différentes échelles

p 425

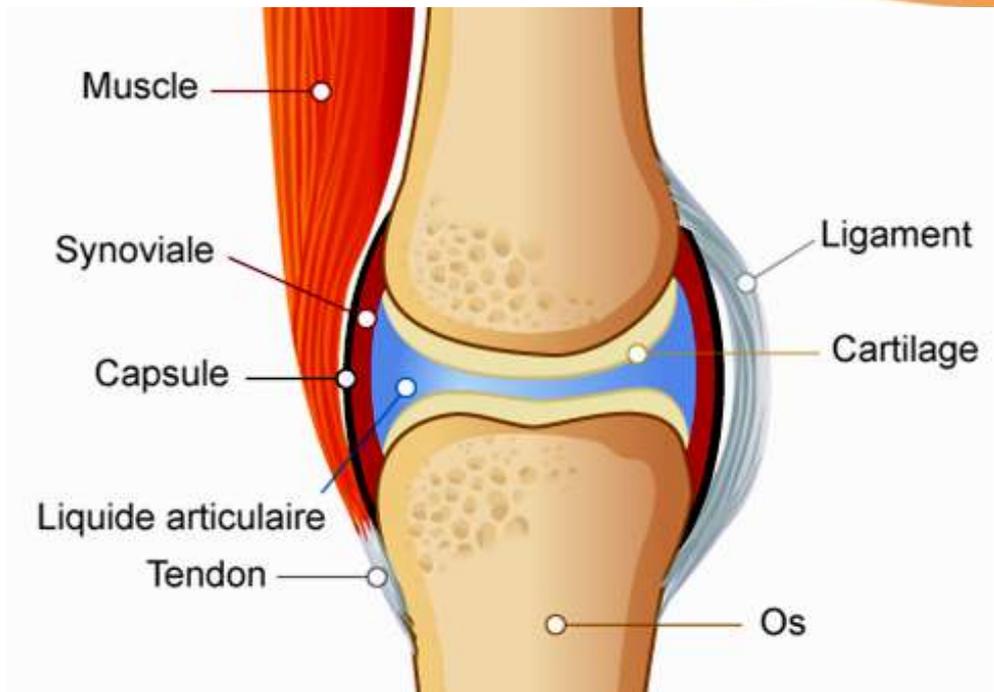


I - Le muscle strié est un ensemble fibres musculaires ou myocytes, cellules spécialisées regroupées en faisceaux pouvant se contracter de façon synchrone afin d'assurer le mouvement.

Dissection patte de grenouille → ME → Nerf sciatique → Muscle

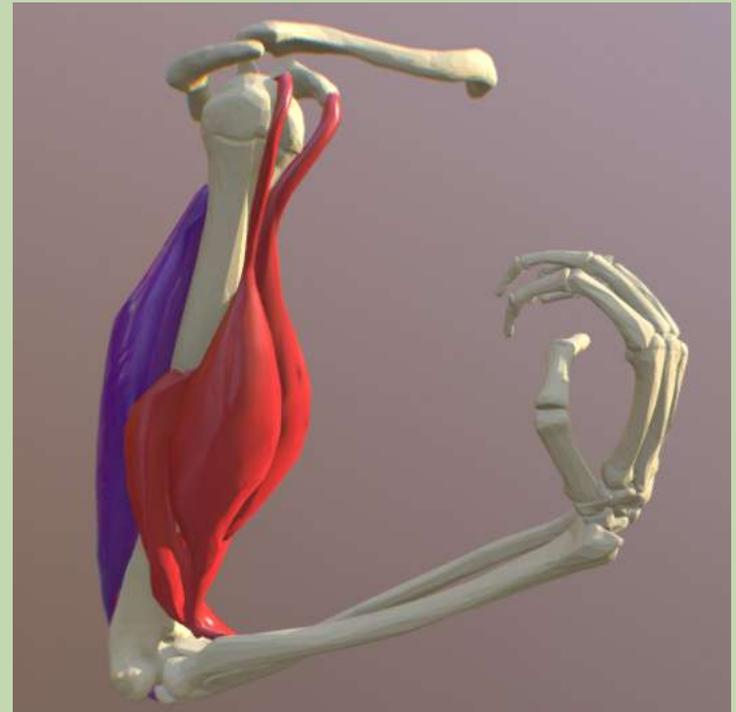


Système musculo-articulaire



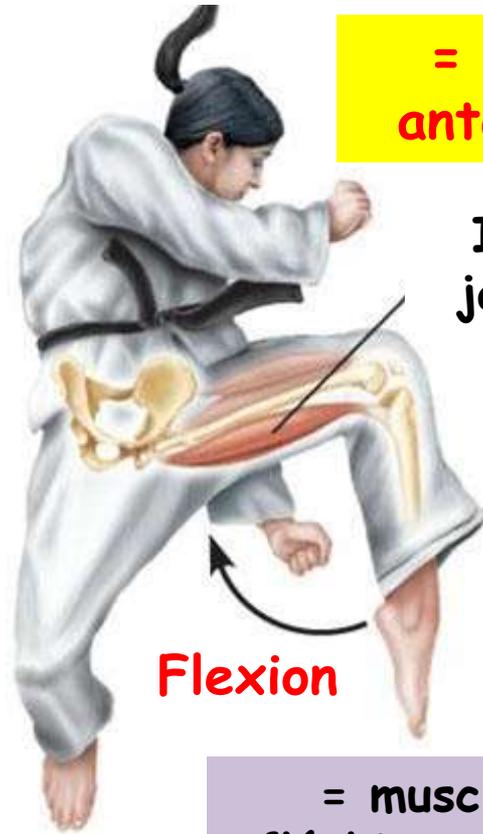
1- Le raccourcissement et l'épaississement des muscles lors de la contraction musculaire permettent le mouvement relatif des os auxquels ils sont attachés par des tendons (tissu fibreux, élastique et solide)

Voir animation 3D



[Biceps and Triceps - 3D model by chrishammang \(@chrishammang\) \[1f23b4e\] - Sketchfab](#)

Flexion et extension de la jambe par rapport à la cuisse

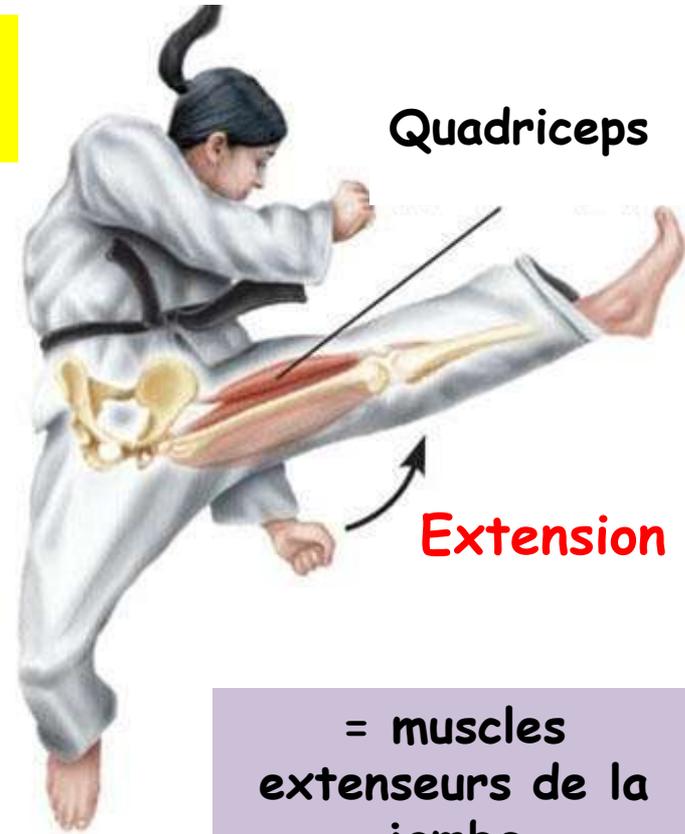


Flexion

= muscles fléchisseurs de la jambe

= Muscles antagonistes

Ischio-jambiers

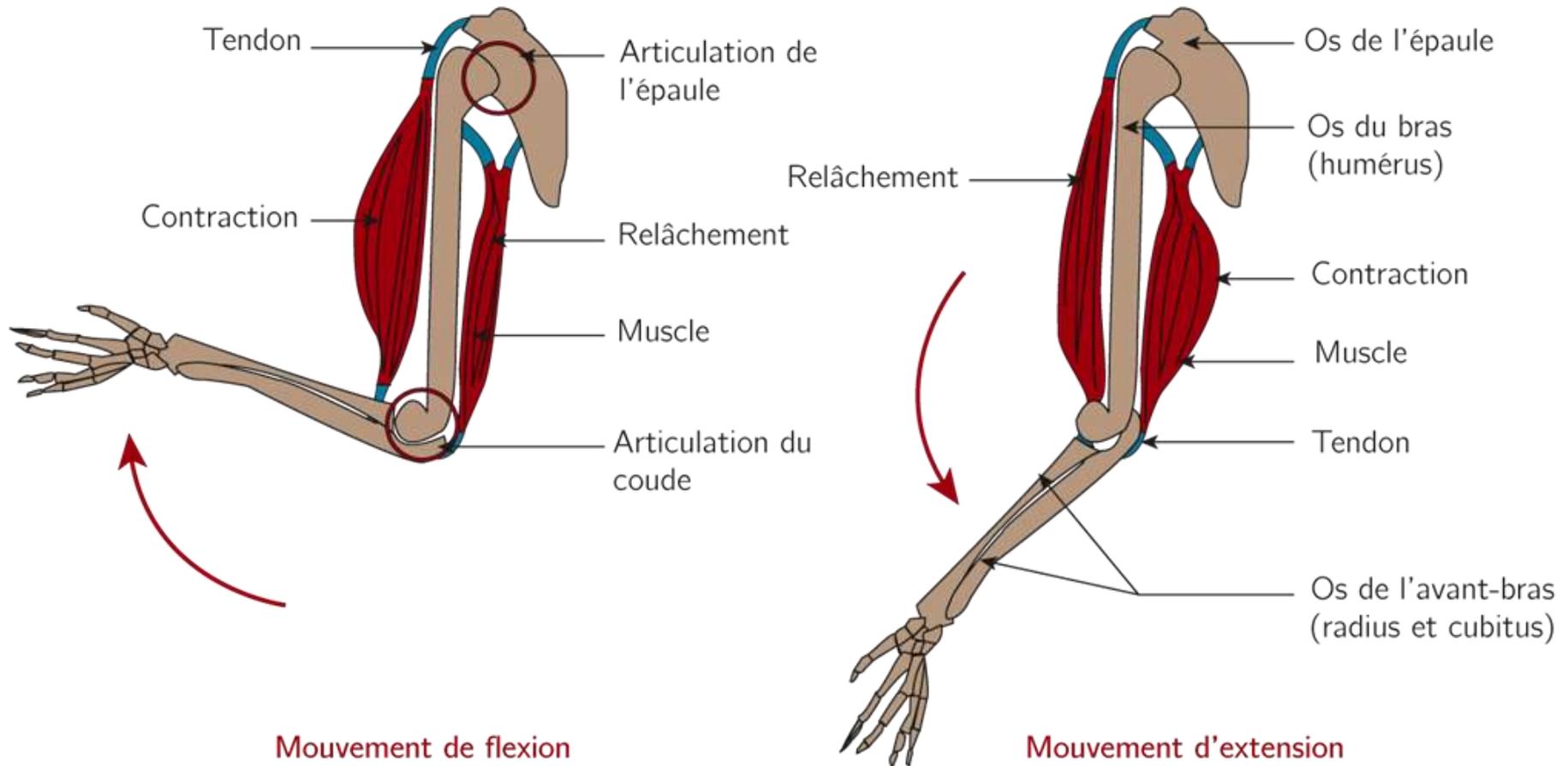


Quadriceps

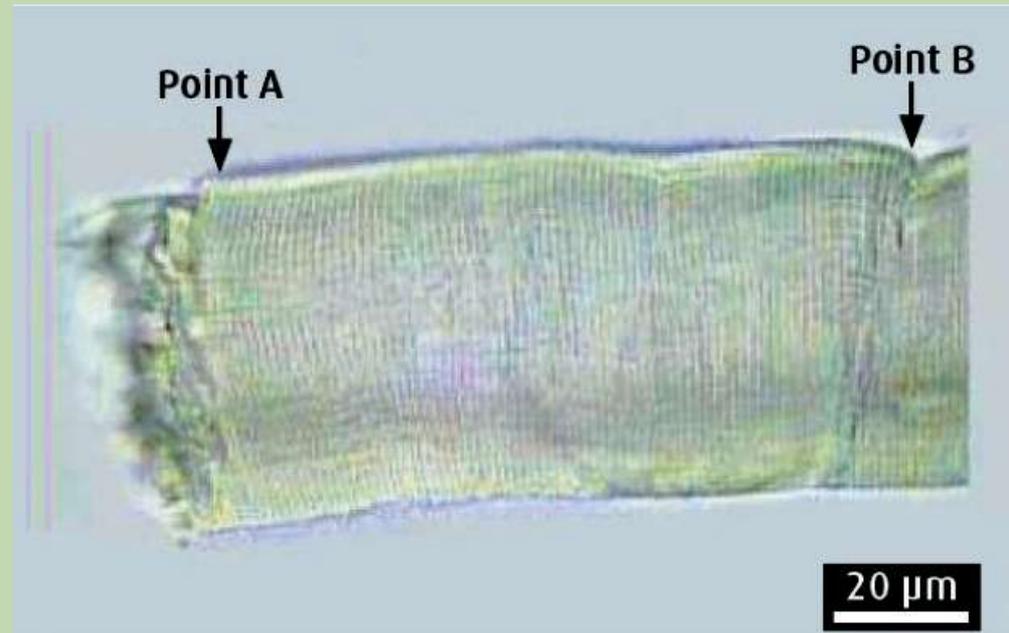
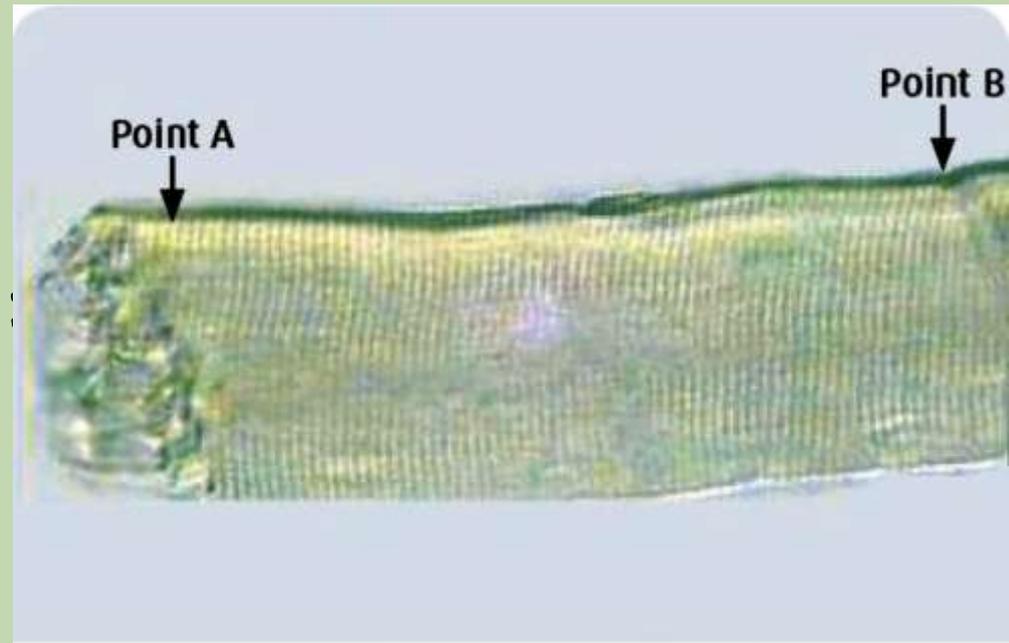
Extension

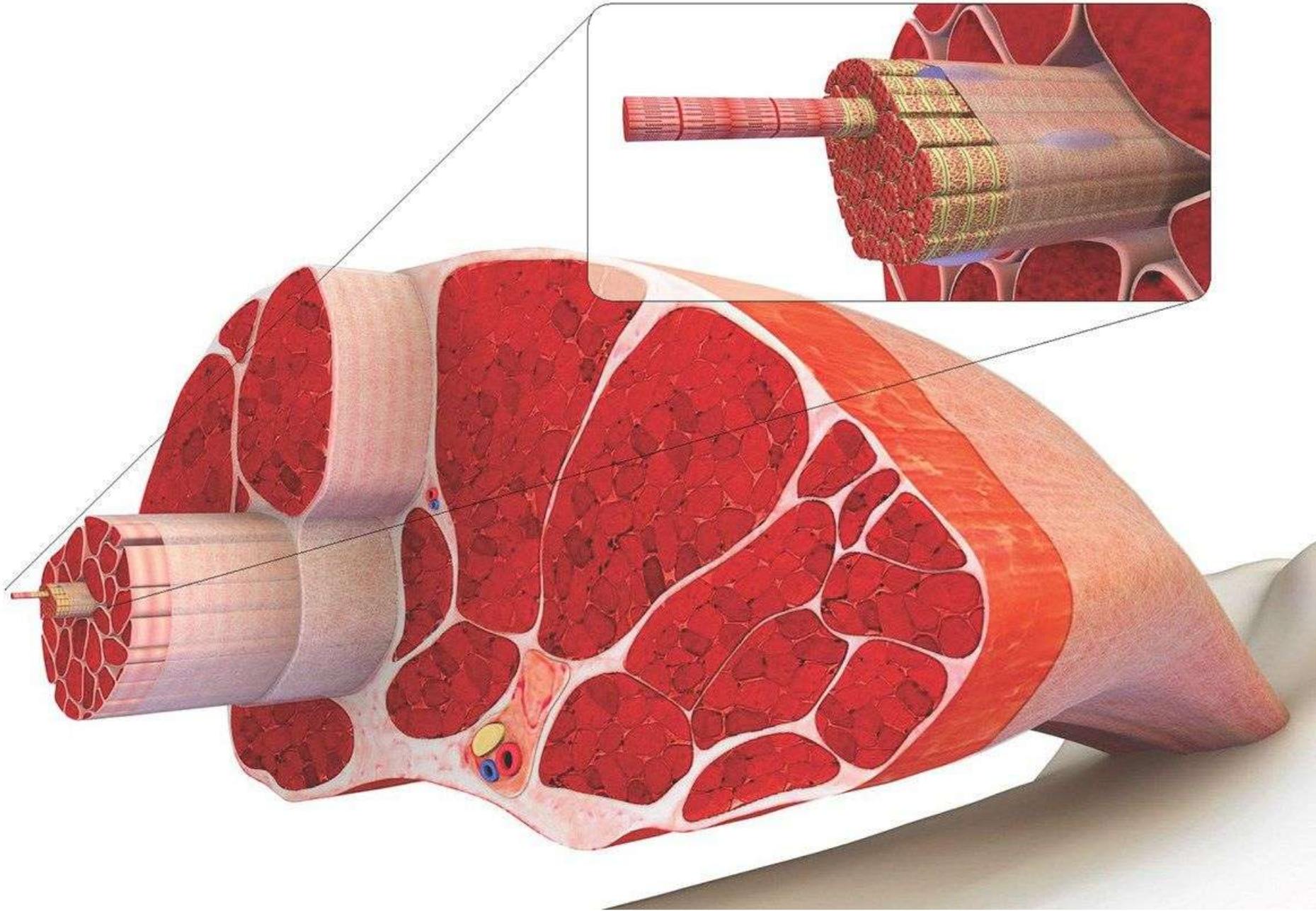
= muscles extenseurs de la jambe

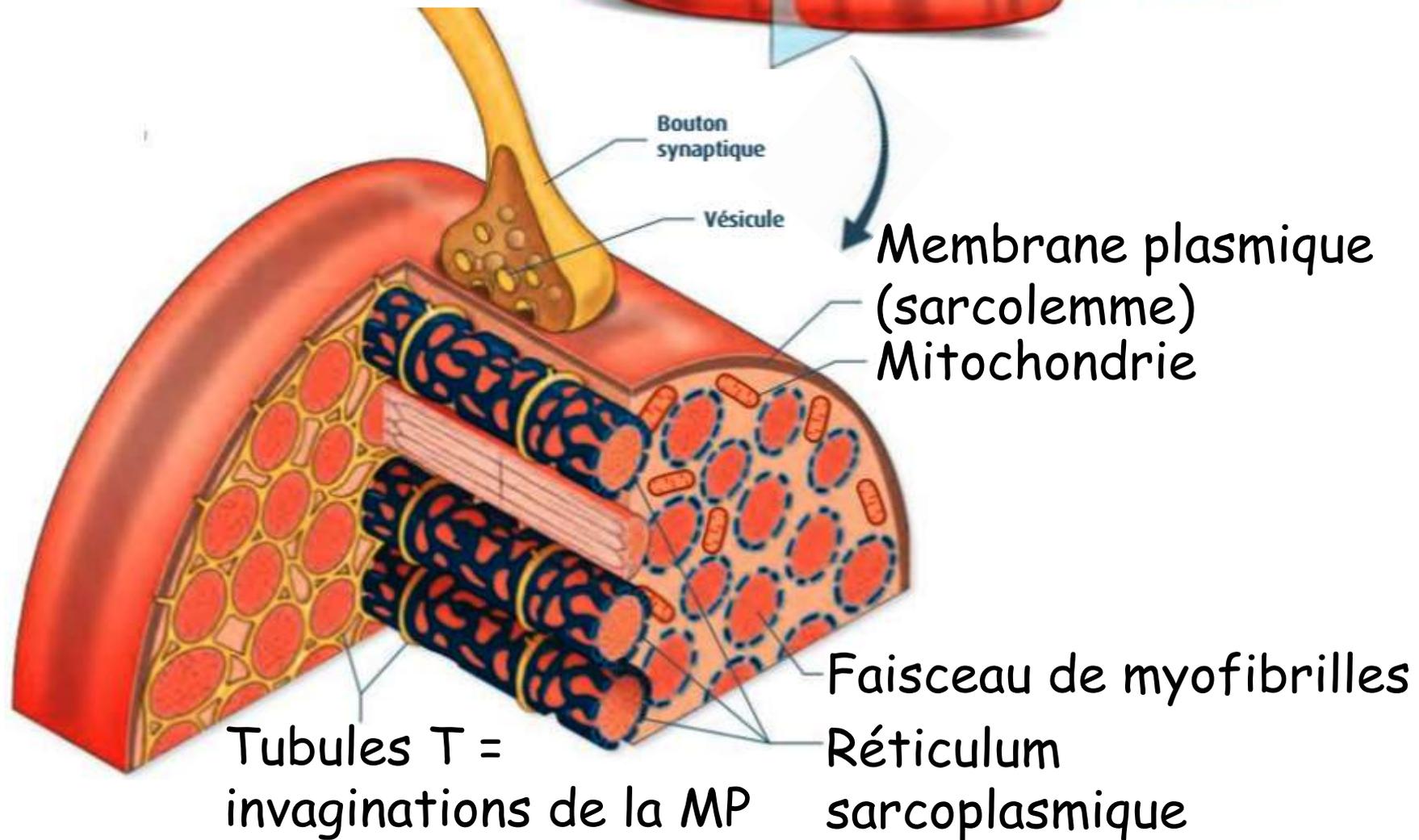
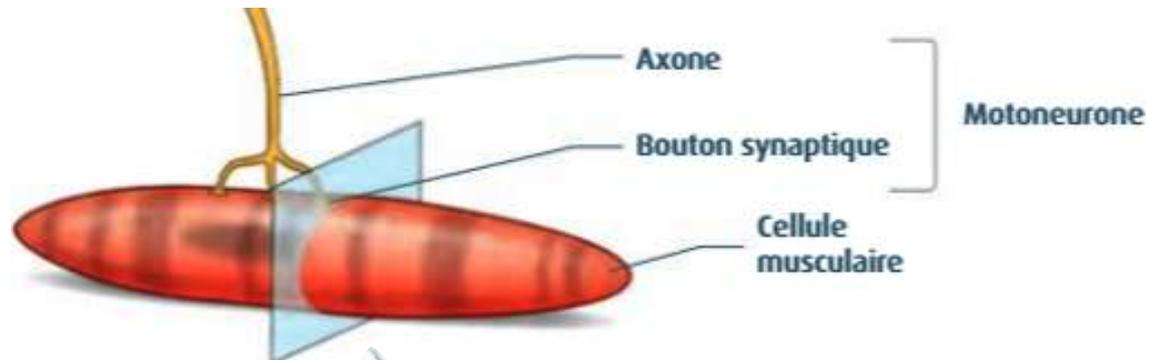
Schéma 1 : Système musculo-articulaire et fonctionnement des muscles antagonistes

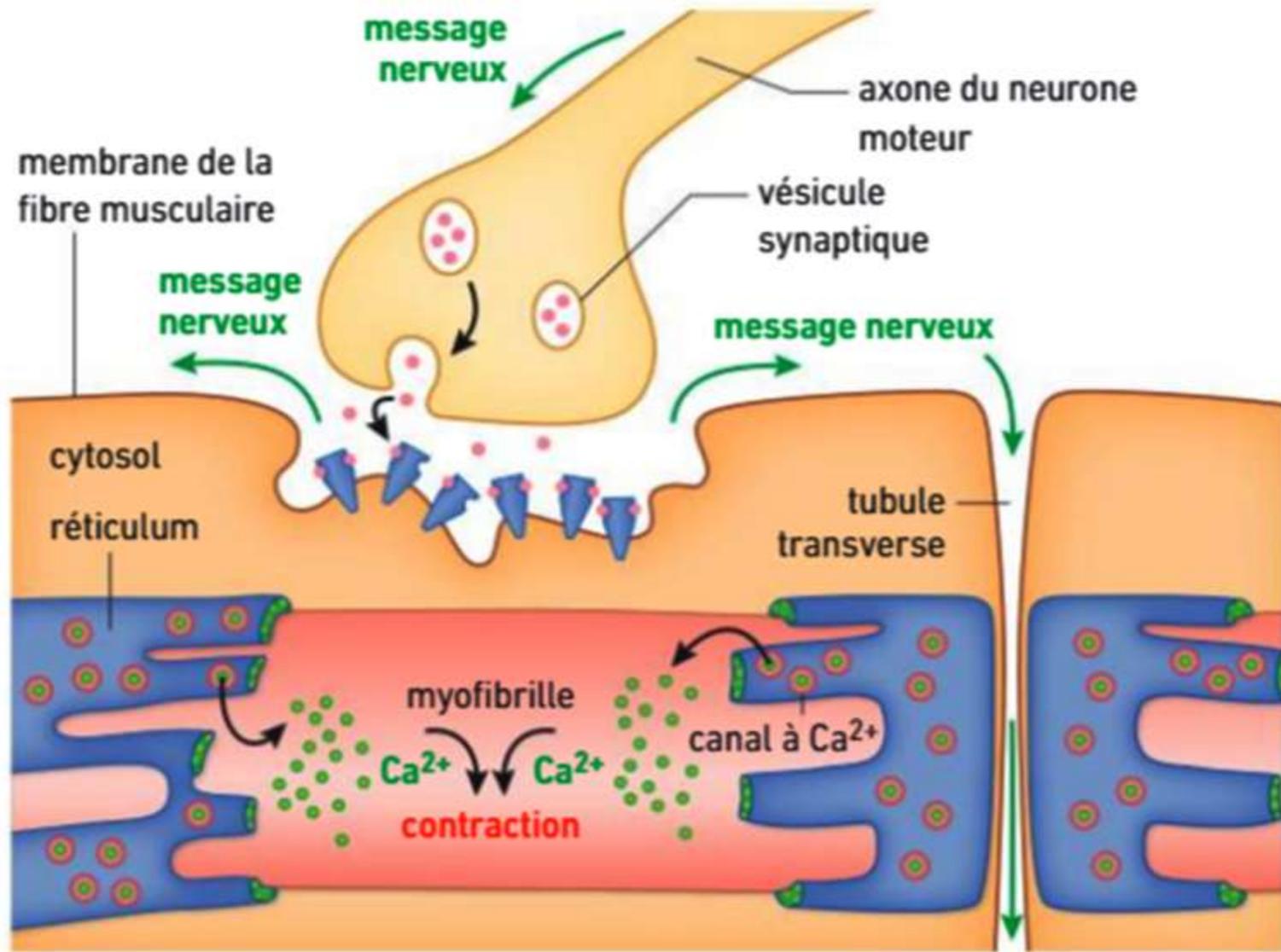


2- Un fonctionnement coordonné des muscles antagonistes assure la réalisation du mouvement
la contraction (raccourcissement et épaissement) d'un muscle s'accompagne du relâchement (allongement et amincissement) du muscle antagoniste correspondant.

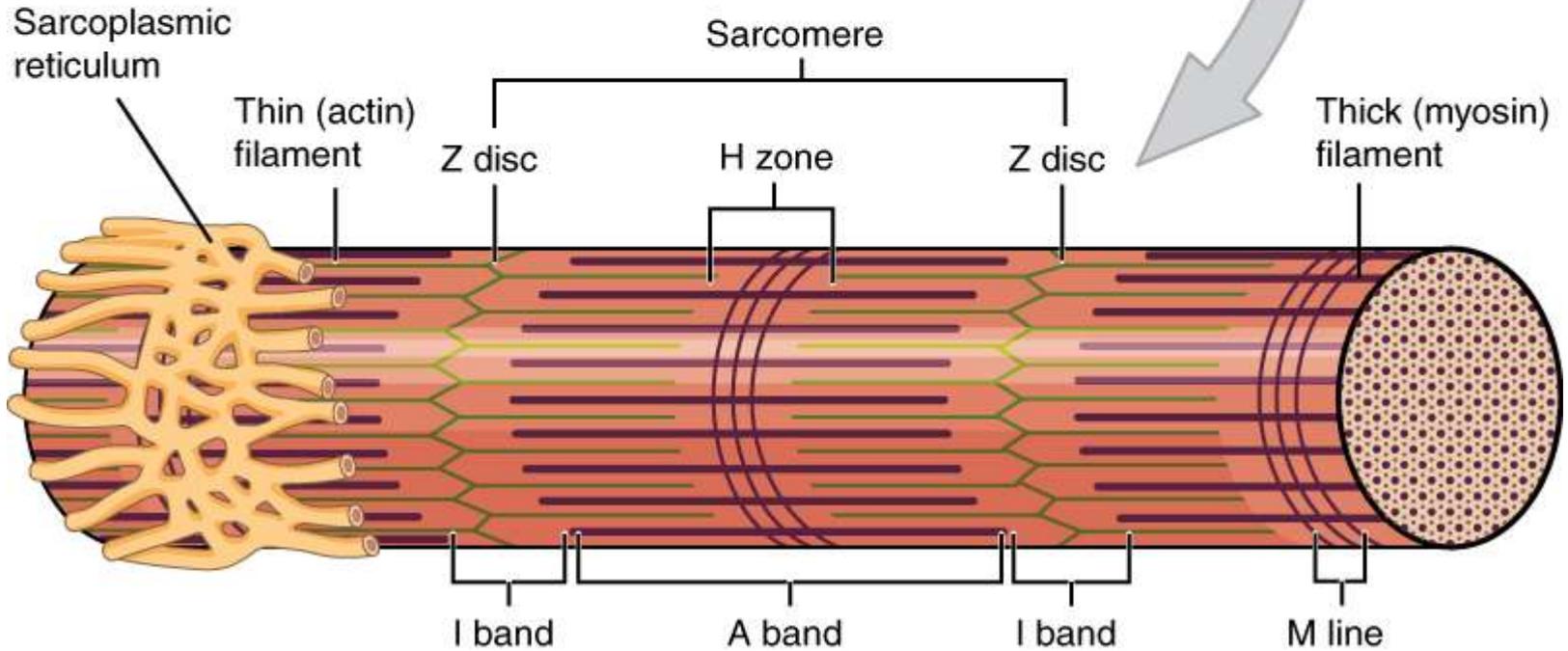
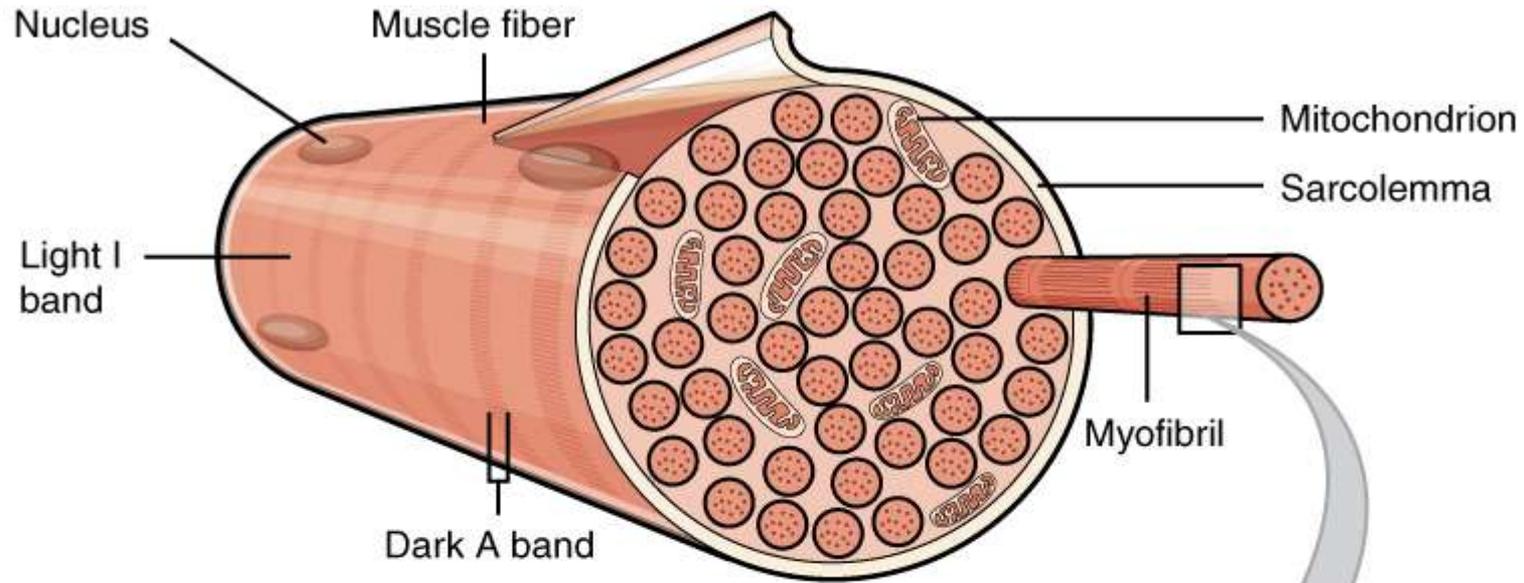






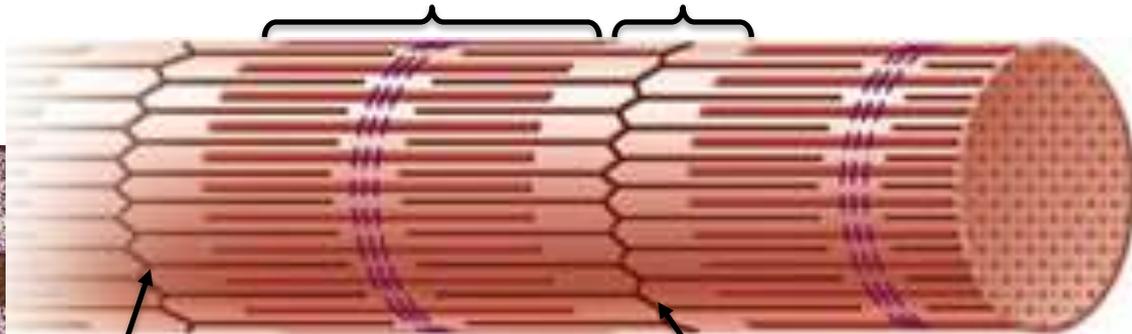


A Le déclenchement de la contraction musculaire.



Bande
sombre

Bande
claire

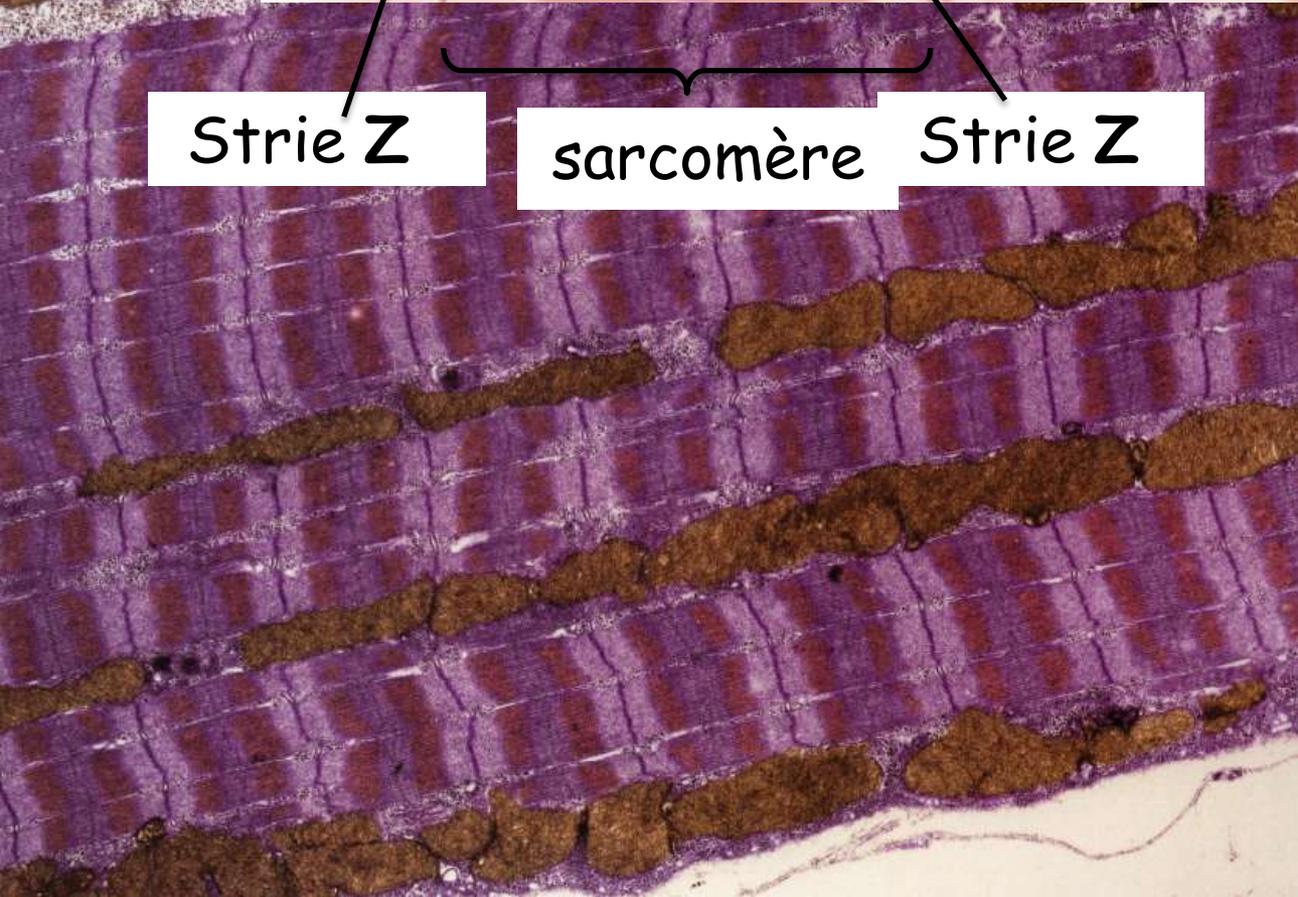
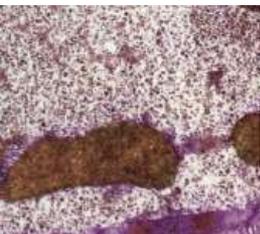


myofibrille

Strie Z

sarcomère

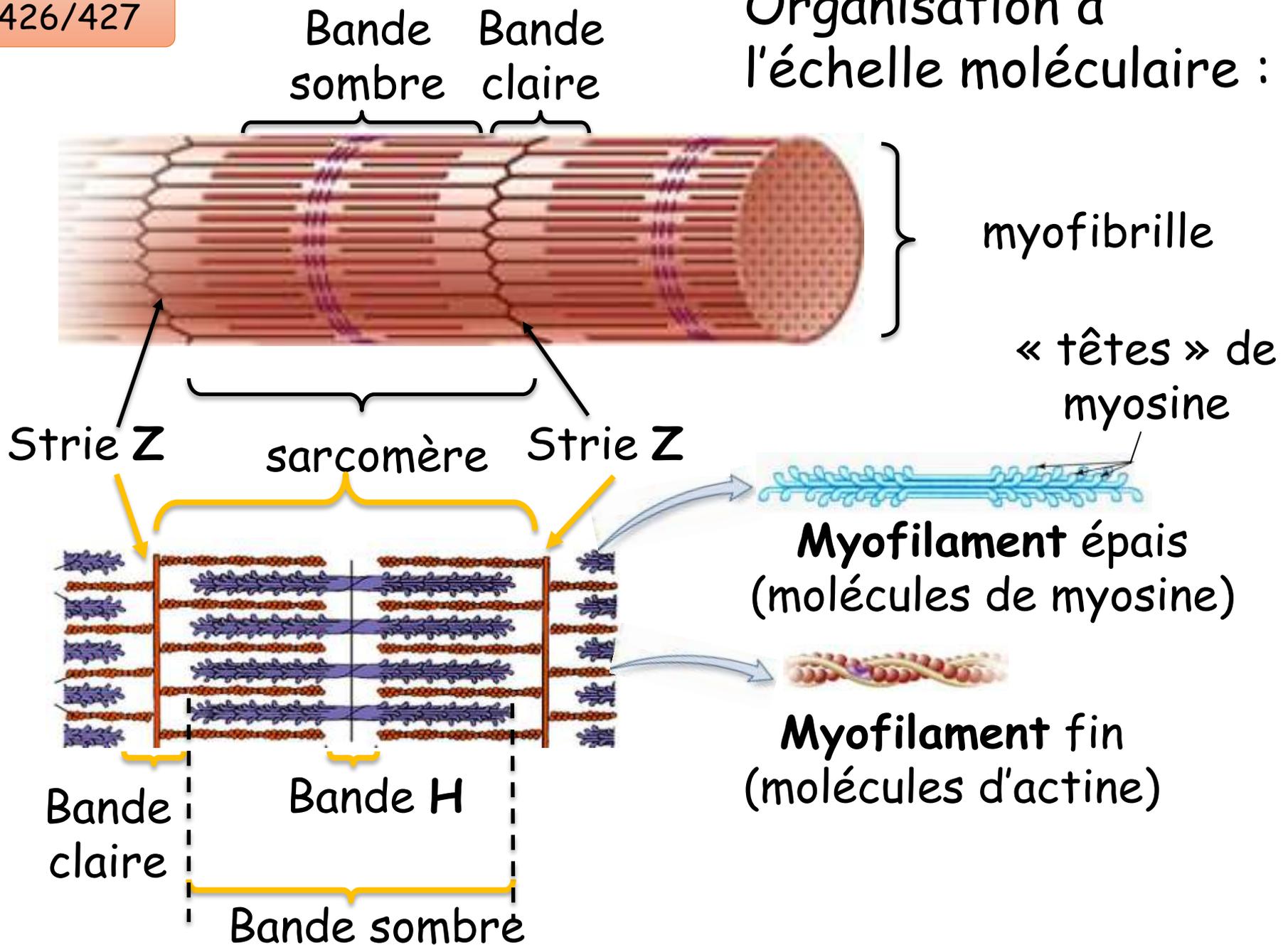
Strie Z



3- Les fibres musculaires (myocytes) sont des cellules allongées pouvant atteindre plusieurs centimètres de longueur. Elles possèdent plusieurs noyaux. Dans leur cytoplasme, elles possèdent un cytosquelette particulier constitué de d'un grand nombre d'éléments contractiles : les myofibrilles

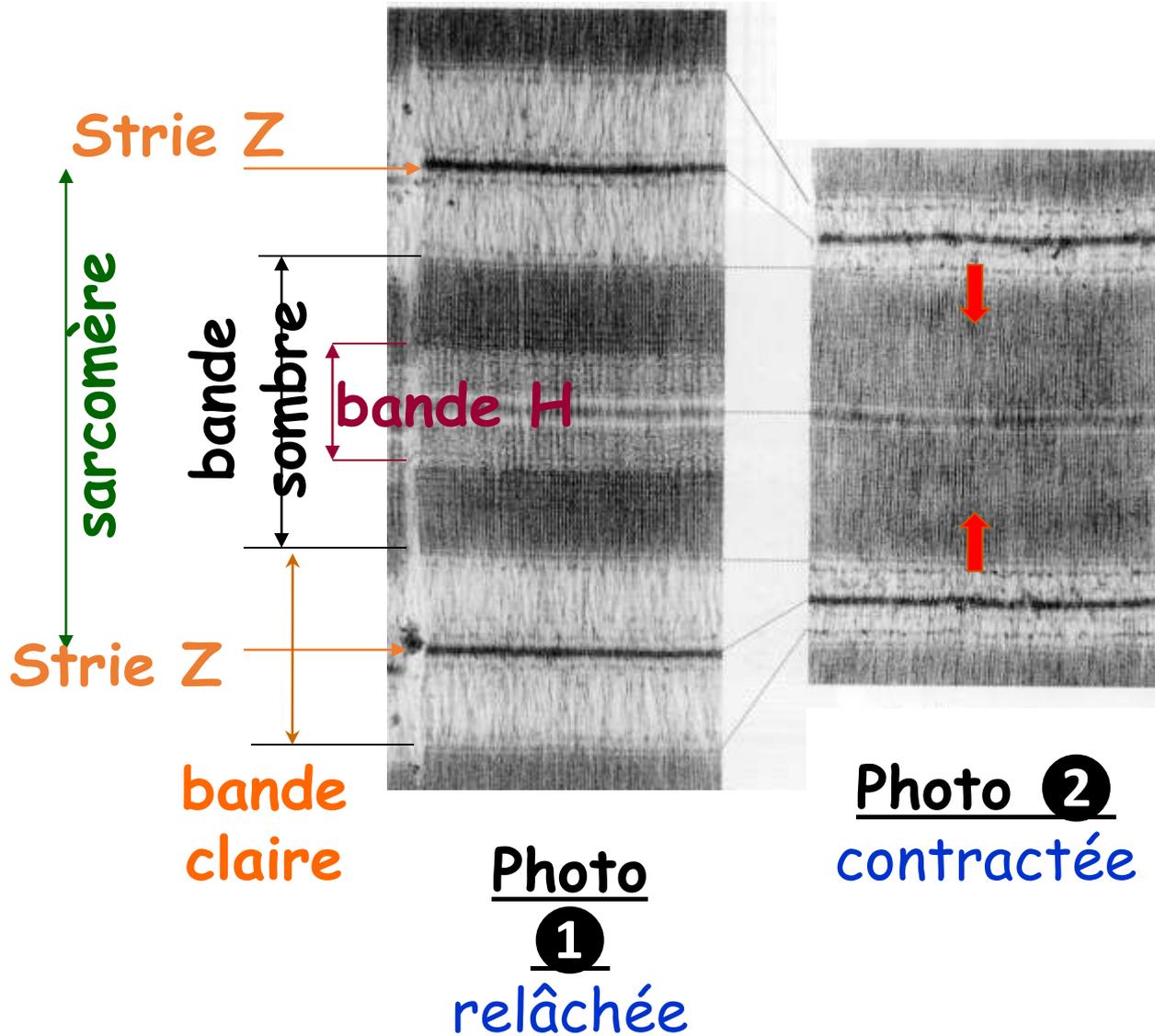
a- Une myofibrille est elle-même constituée d'une succession de sarcomères, unités structurales et contractiles du muscle.

Organisation à l'échelle moléculaire :



Coupes longitudinales de myofibrilles observées au MET

p 426

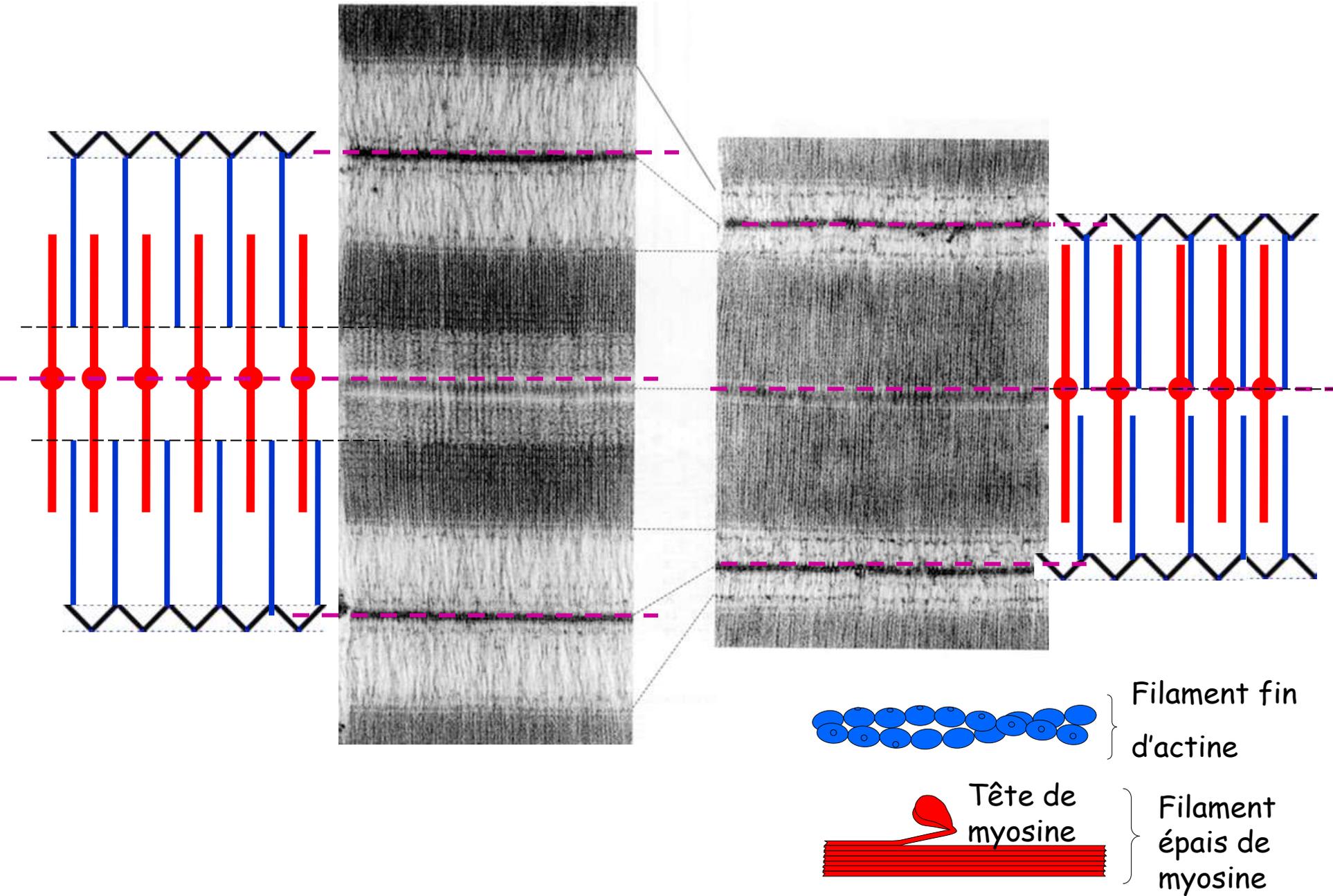


- Longueur du sarcomère ↗
- Longueur de bande sombre inchangée (celle des filaments de myosine aussi)
- Longueurs des bandes claire et H ↗

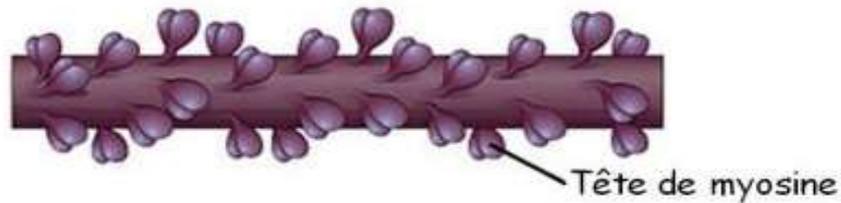
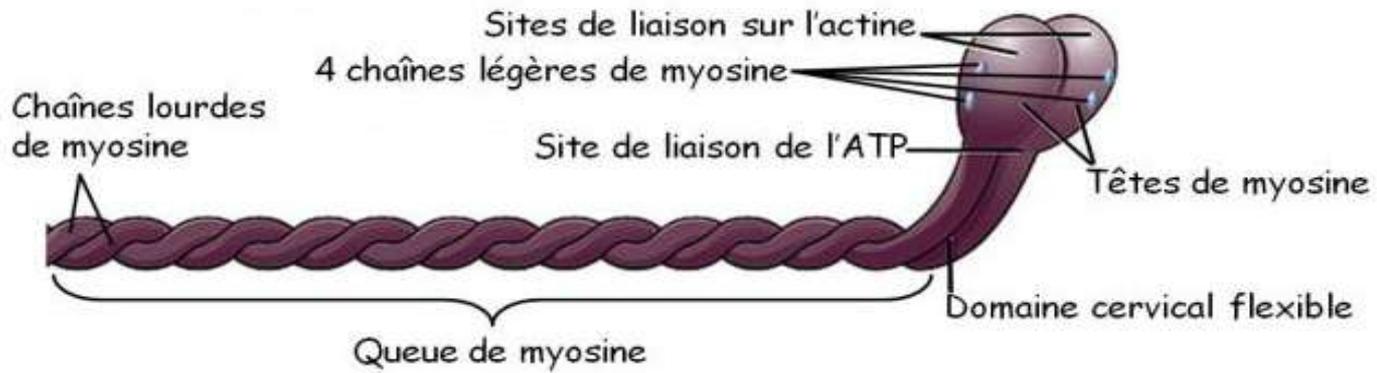
↓

Glissement des filaments fins d'**actine** / **myosine**, vers le centre du sarcomère

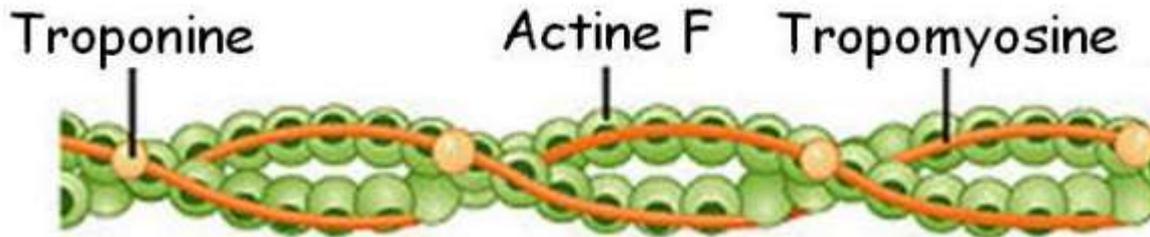
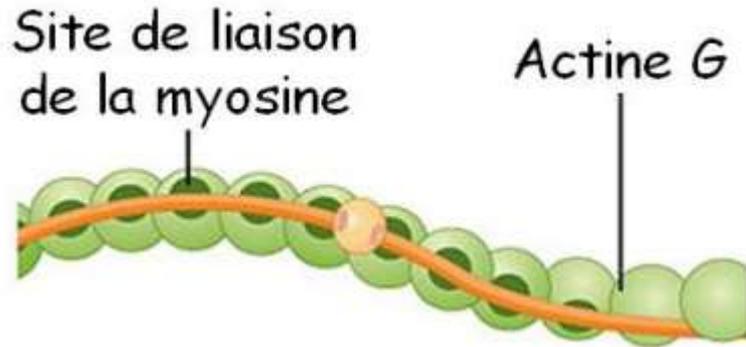
Coupes longitudinales de myofibrilles observées au MET



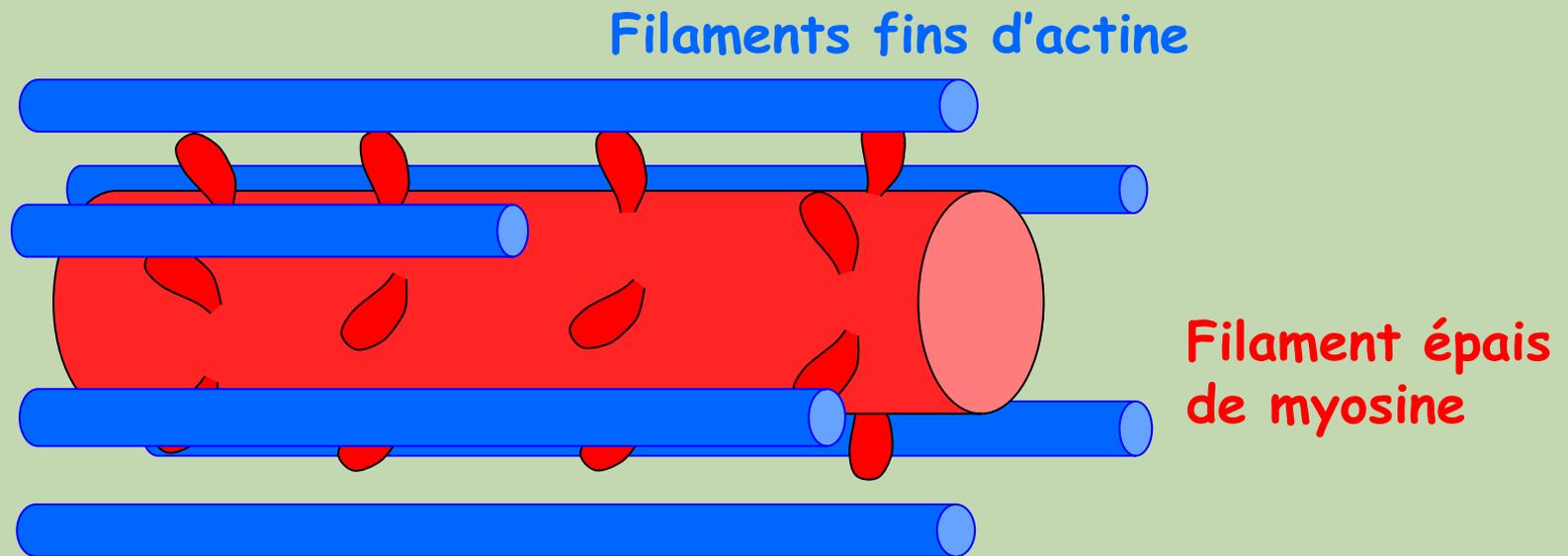
La myosine



L'actine et molécules associées

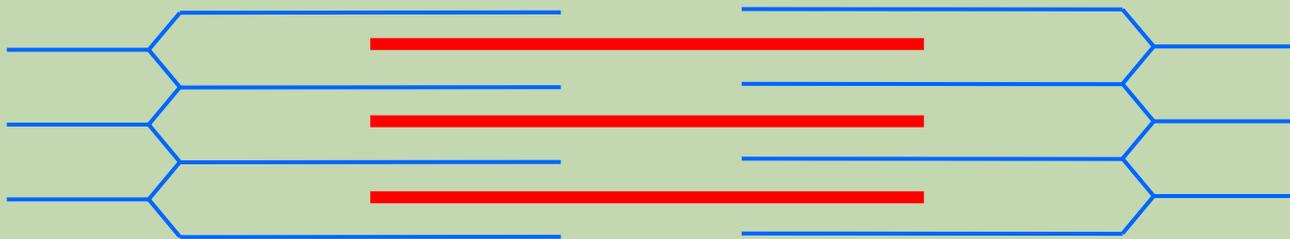


b - Chaque sarcomère est un assemblage de deux types de filaments de nature protéique, disposés en parallèlement à l'axe de la fibre : les filaments fins d'actine et les filaments épais de myosine.



c - Lors de la contraction musculaire, chaque sarcomère diminue de longueur par glissement des filaments d'actine par rapport aux filaments de myosine.

Cela permet de raccourcissement de la cellule musculaire



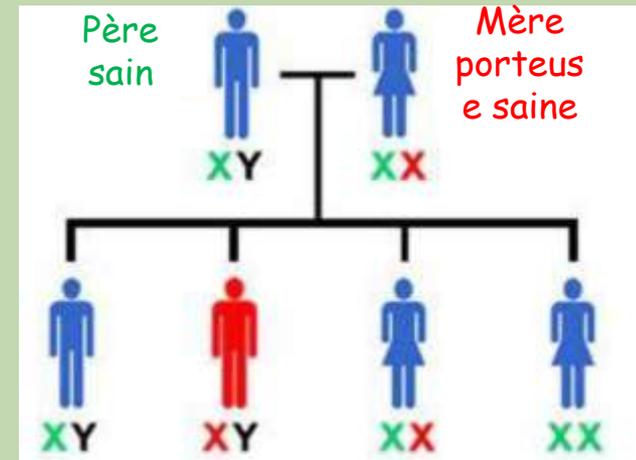
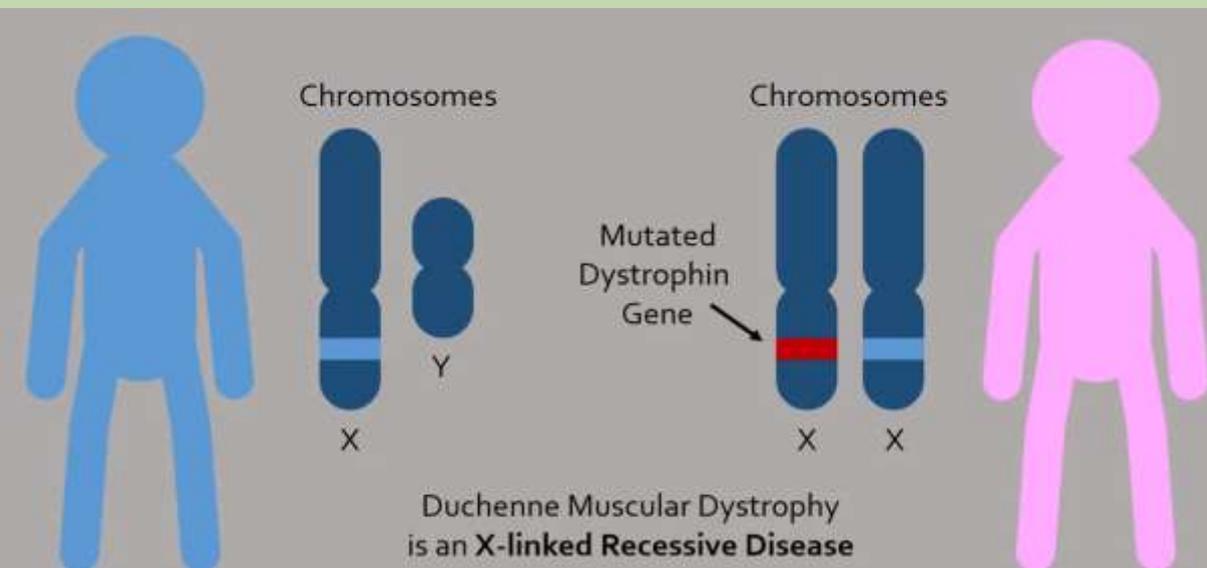
4 - La cohésion structurale entre les cellules musculaires est assurée par la présence de complexes protéiques permettant des interactions entre les protéines musculaires et la matrice extracellulaire. Un défaut d'une de ces protéines peut entraîner des dégénérescences musculaires.

a. *La myopathie de Duchenne est une maladie génétique provoquant une dégénération progressive des muscles*



a. Elle résulte de mutations affectant le gène (situé sur le chromosome X) codant une protéine du cytosquelette des cellules musculaires : la dystrophine.

Transmission d'un gène muté porté par le chromosome X



UNE MALADIE RARE

2 500

PERSONNES EN FRANCE



99,9 %

DES MALADES SONT
DES GARÇONS

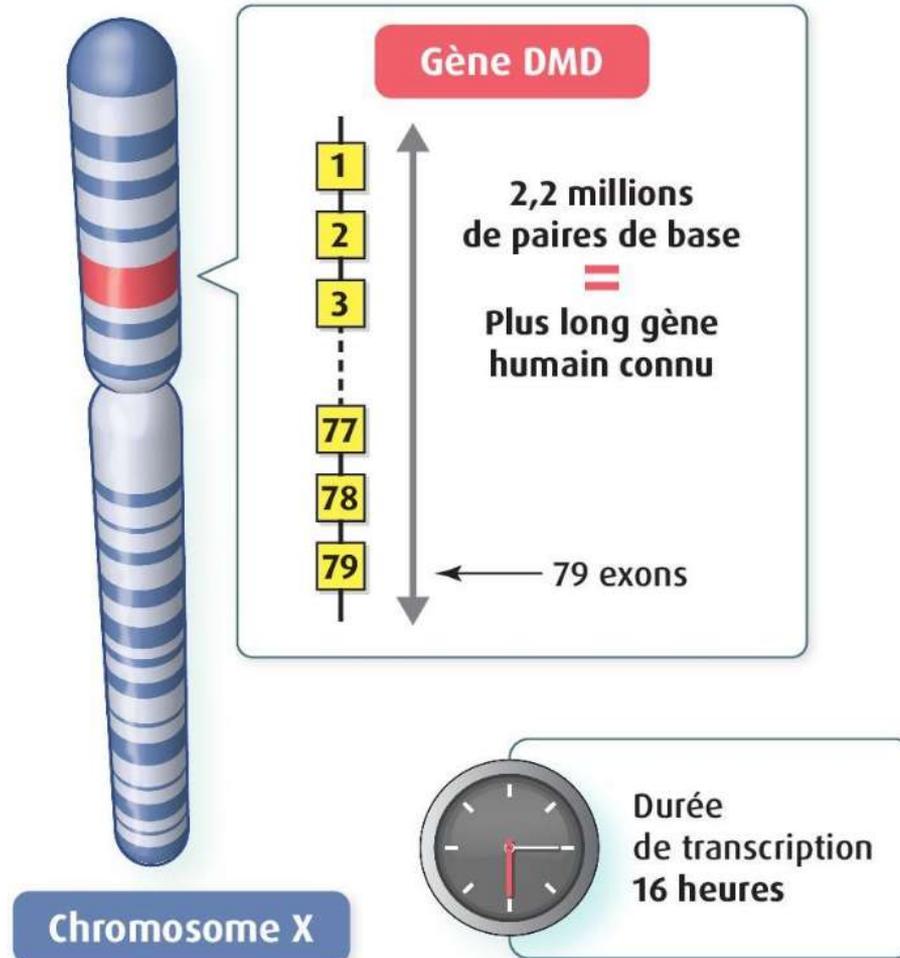
Comparaison d'un fragment de séquences de deux allèles de la dystrophine

Term spécialité SVT, Nathan, 2020

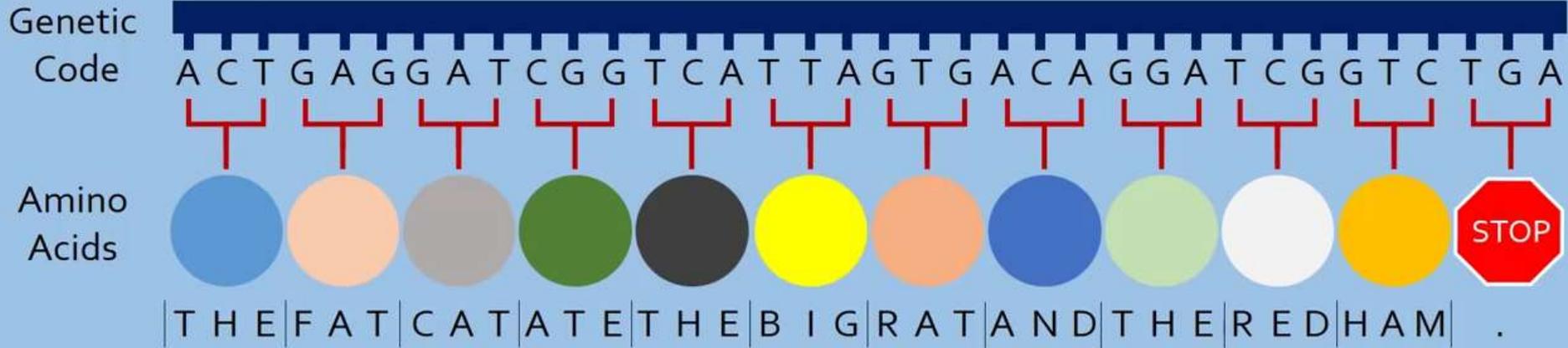
Le gène de la dystrophine est le gène humain le plus long avec ses 2,3 millions de paires de bases.

Il est constitué de 79 exons qui représentent seulement 0,5% de la longueur du gène.

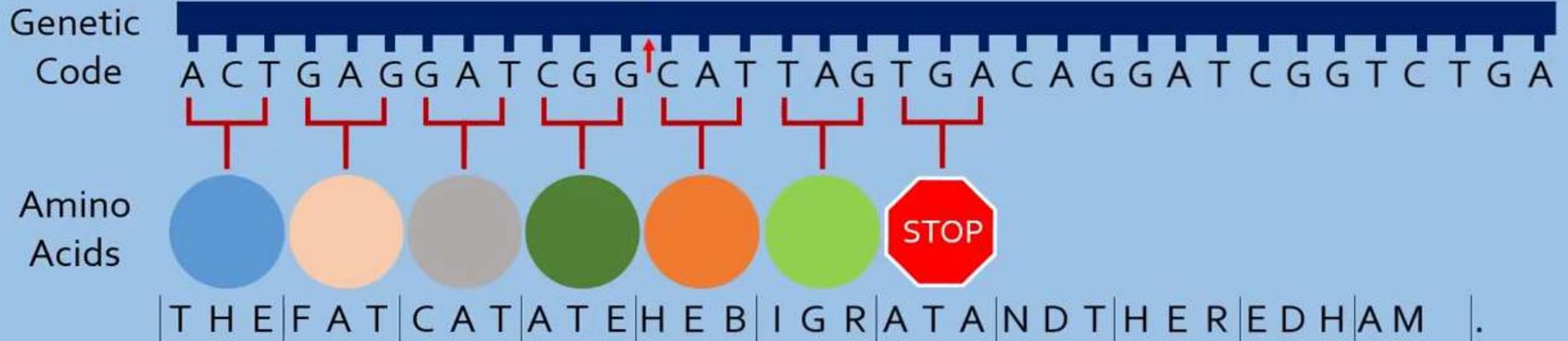
Il faut 16 heures pour transcrire ce gène.



Non-Mutated Gene



Gene with Frameshift Mutation



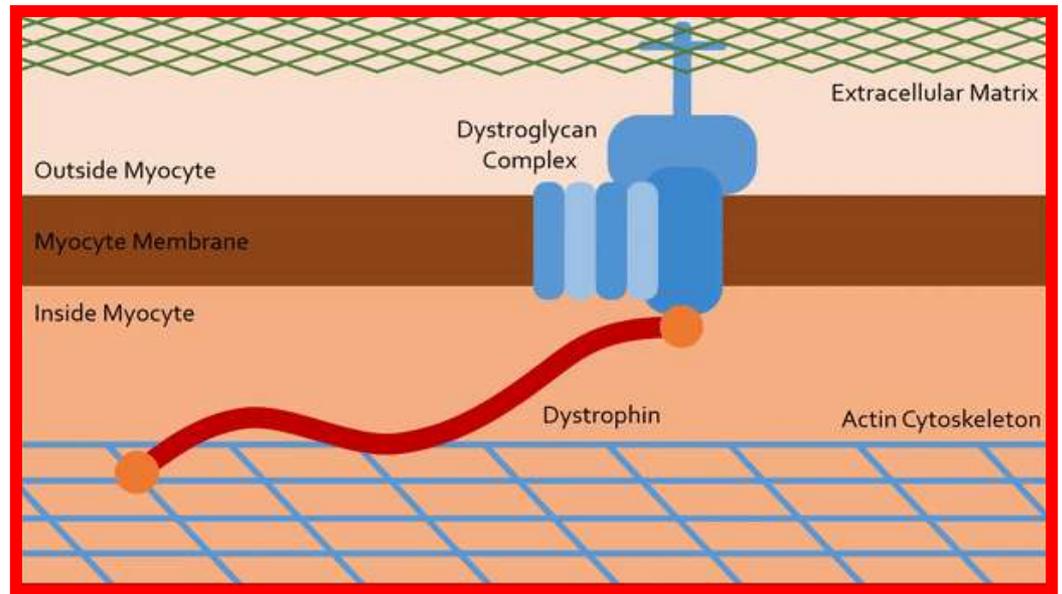
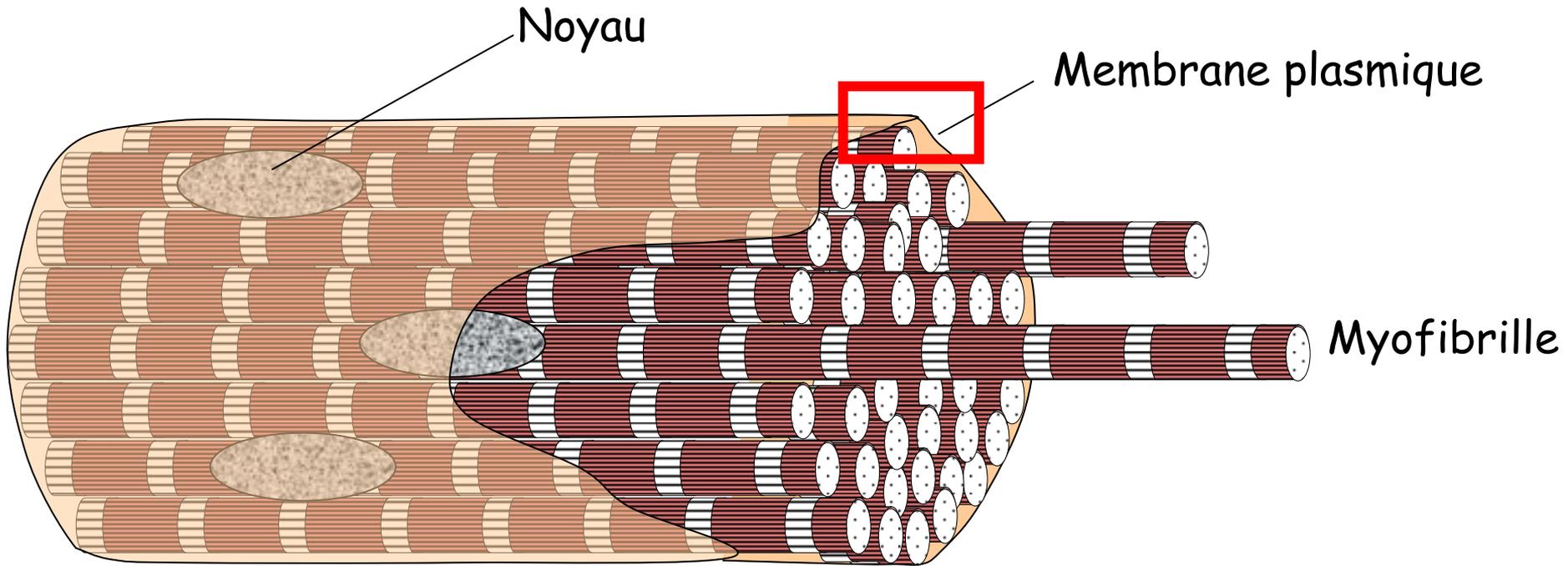
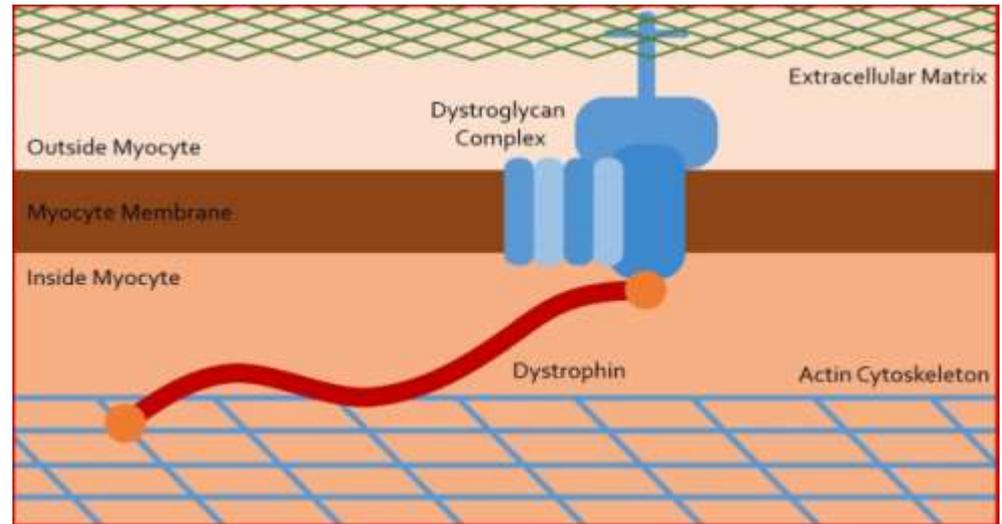
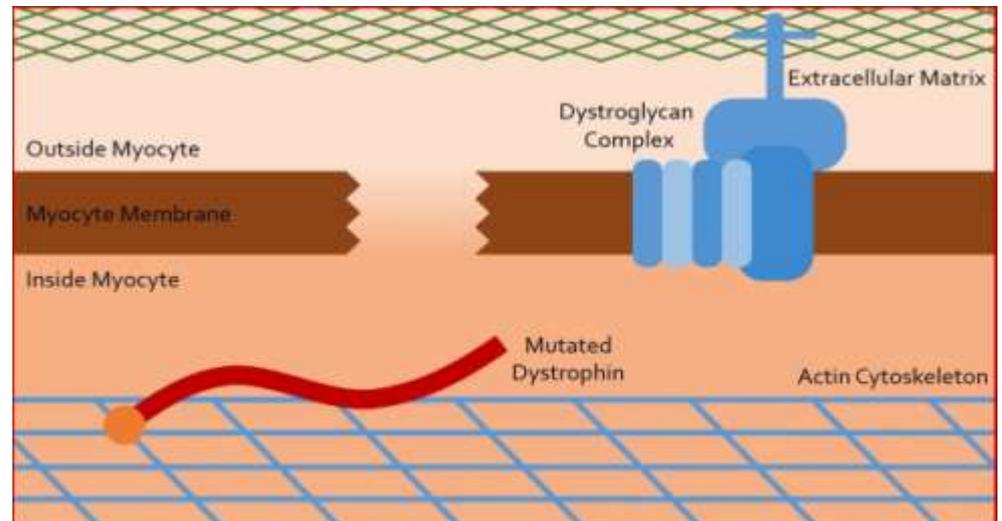


Schéma 3 : Myopathie de Duchenne : causes moléculaires

Dystrophine normale (rouge) assurant la cohésion entre l'actine du cytosquelette (bleu), les protéines membranaires (bleu) et les protéines de la matrice extracellulaire (vert)



Myopathie de Duchenne:
Dystrophine anormale (raccourcie) n'assurant plus la liaison → les tensions provoquées par les contractions répétées provoquent des lésions de la membrane des cellules musculaires, aboutissant à leur dégénérescence.



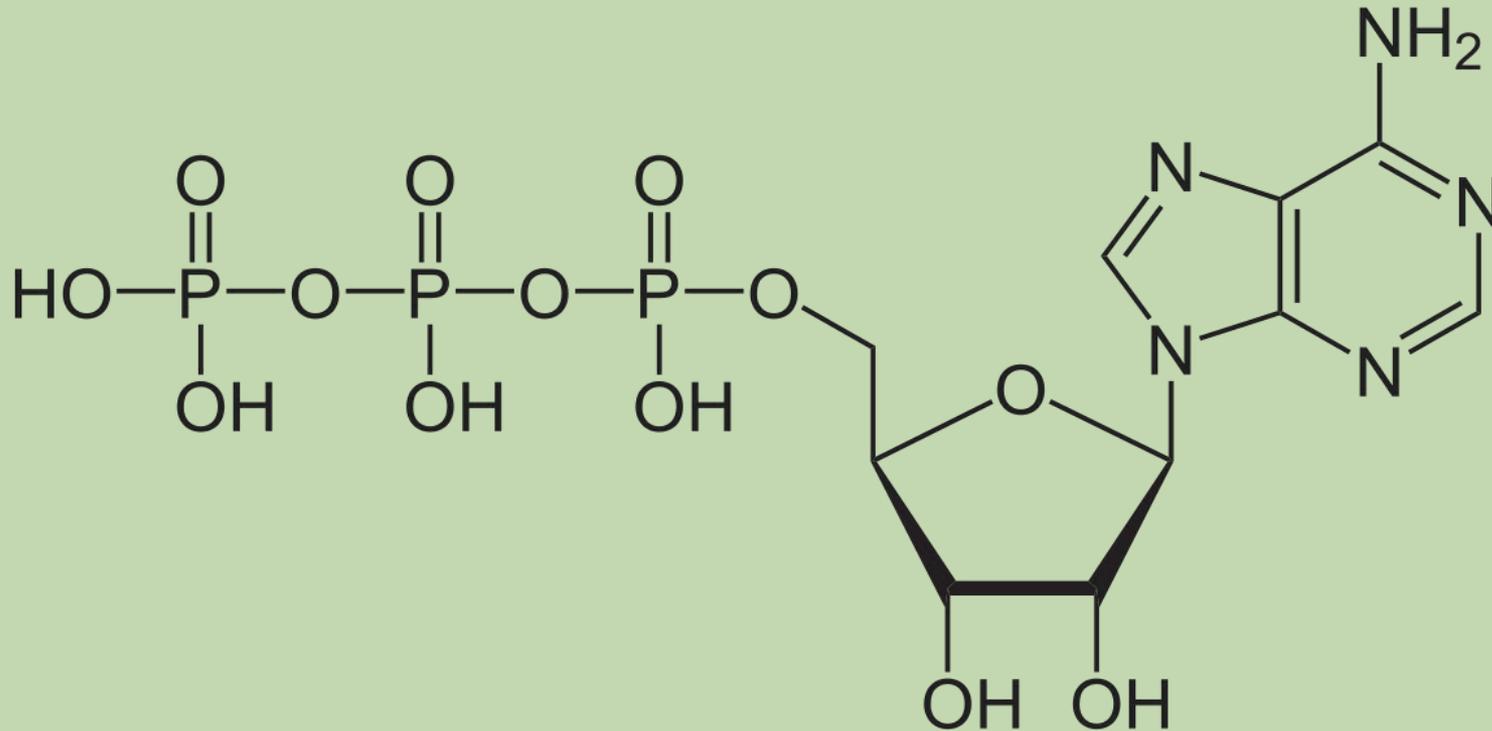
c - La dystrophine est impliquée dans les connexions entre le cytosquelette de la cellule musculaire, des protéines membranaires et les protéines de la matrice extra cellulaire.

d - Lorsque la dystrophine est anormale (raccourcie dans ce cas), le maintien de l'intégrité des cellules musculaire au cours des cycles répétés de contraction / relâchement n'est plus assuré.

La répétition de microlésions conduit à terme à la dégénérescence musculaire

II - Le mouvement relatif des filaments d'actine et de myosine constitue le mécanisme moléculaire à l'origine de la contraction musculaire.

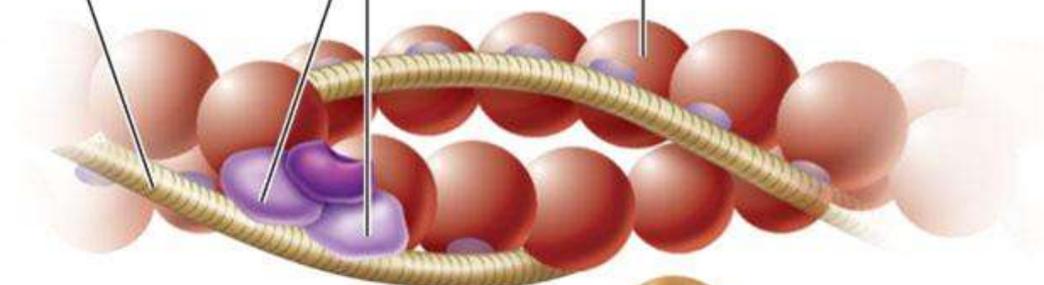
Il nécessite des ions calcium et l'utilisation d'ATP (Adénosine Tri Phosphate) comme source d'énergie.



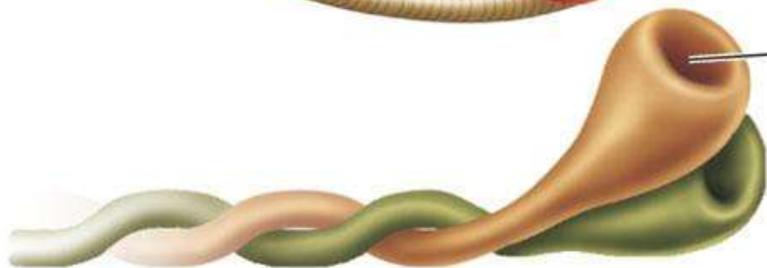
Tropomyosin

Troponin

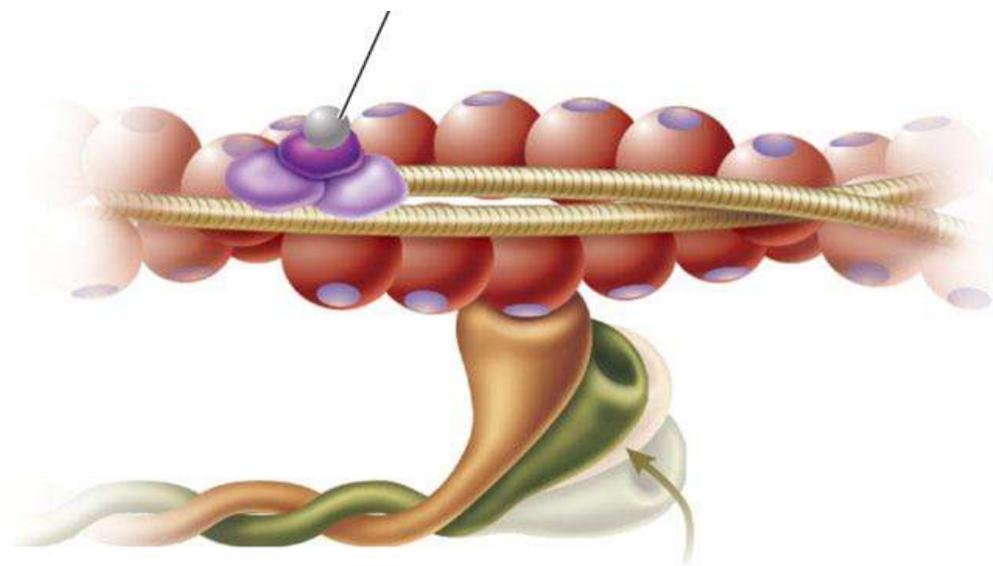
Actin



Actin-binding site



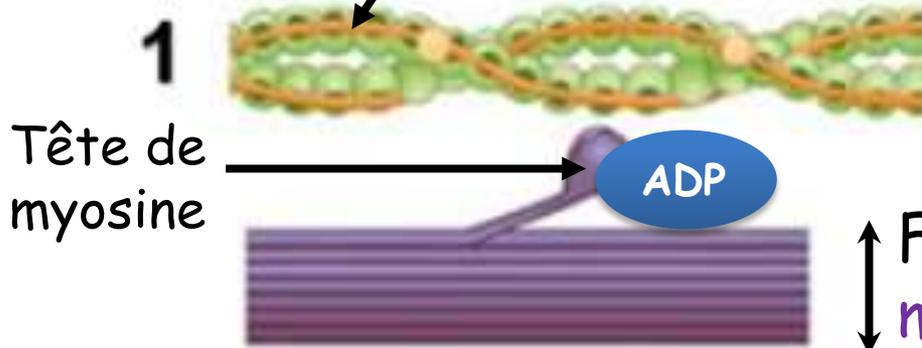
Ca^{2+}



Étapes d'un cycle de contraction

1. Départ = repos

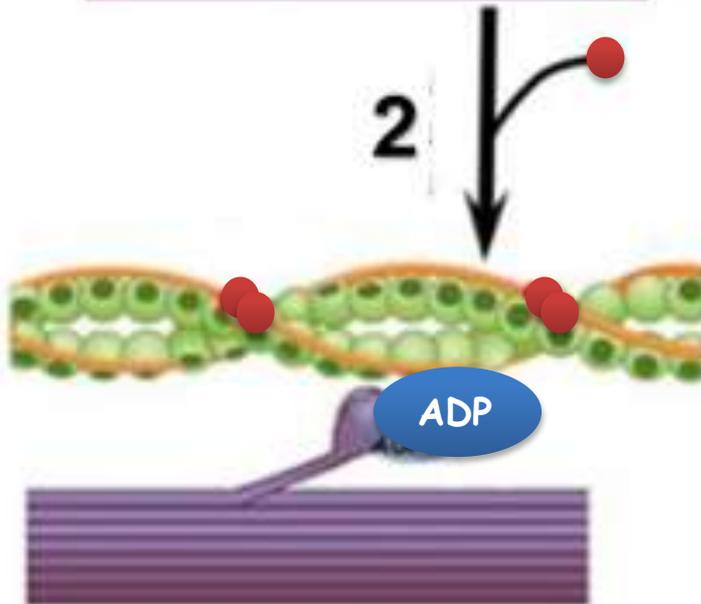
Des molécules (**tropomyosine**) masquent le site de fixation de la myosine sur l'actine



Filament fin formé de molécules d'actine

Filament épais formé de molécules de myosine

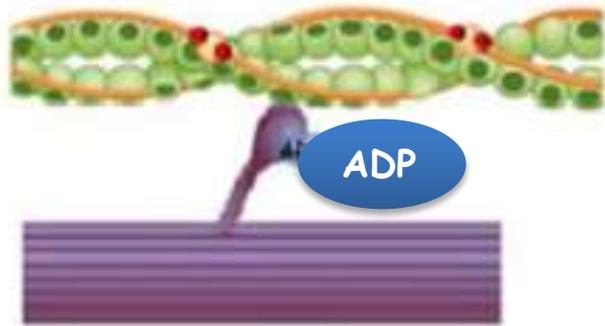
2. Afflux de Ca^{2+}



3. Fixation du Ca^{2+} sur les filaments fins (**troponine**) => ce qui rend accessibles les sites de fixation de la myosine sur l'actine

3. pont d'union entre
tête de la myosine et
actine

3

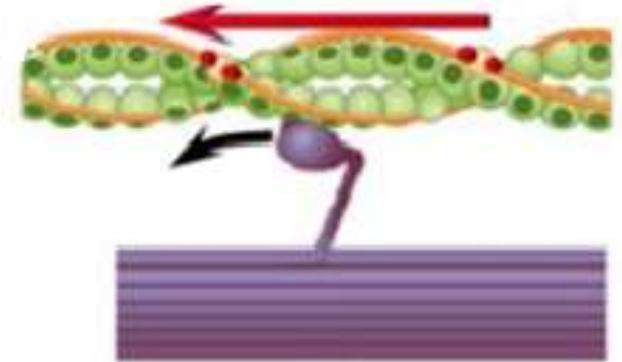


**Attachement
(ponts d'union)**



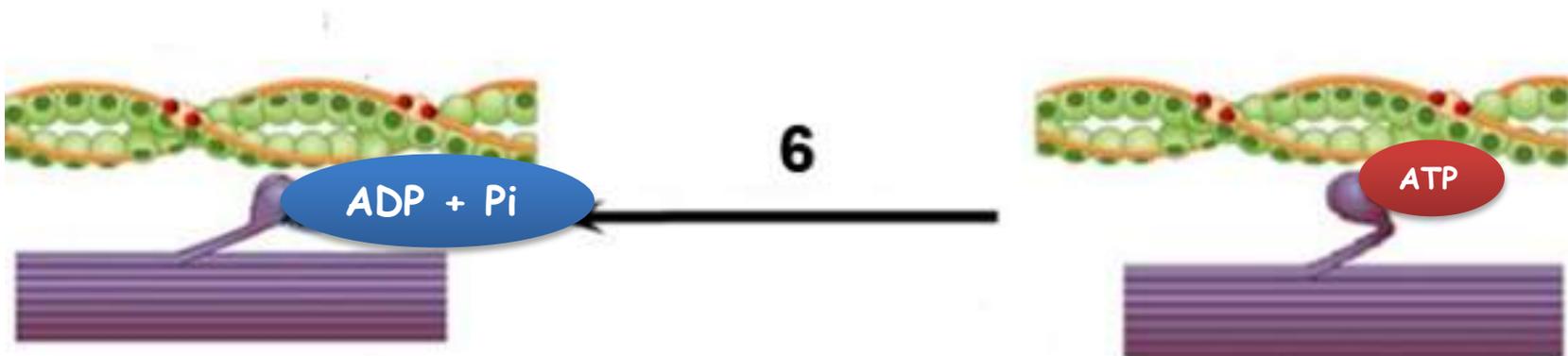
4

4. Libération de l'ADP,
=> Rotation tête de
myosine fixée à l'actine
=> glissement des
filaments d'actine



Glissement

6. énergie libérée par
l'hydrolyse de l'**ATP** en **ADP + Pi**
=> redressement de la tête de
myosine



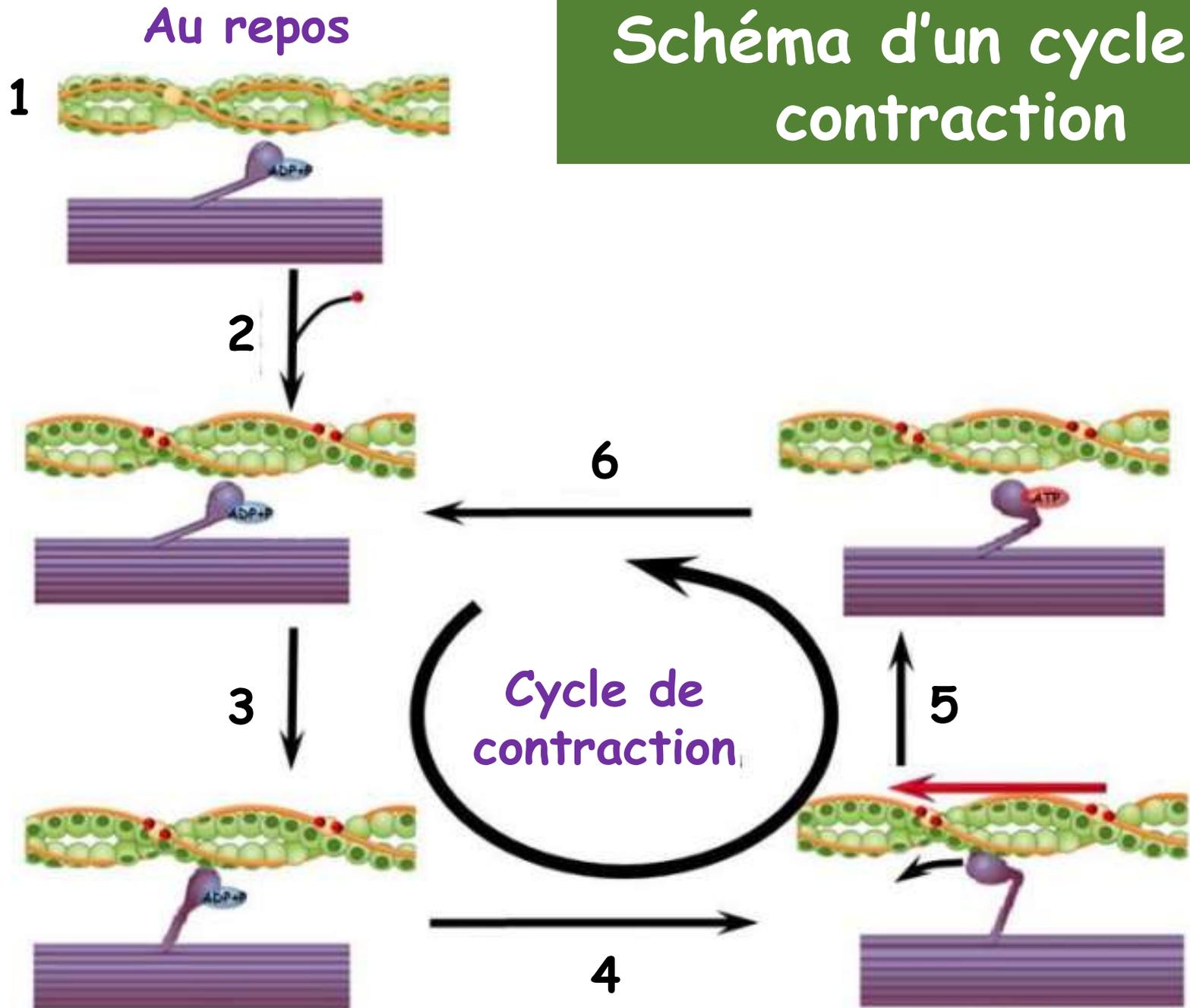
Les cycles de contraction se poursuivent
tant que le niveau en Ca^{++} est élevé.

En l'absence d'ATP, les ponts d'union
restent formés (rigidité cadavérique).

5. **fixation d'ATP**
sur la tête de la
myosine
=> détachement de
l'actine

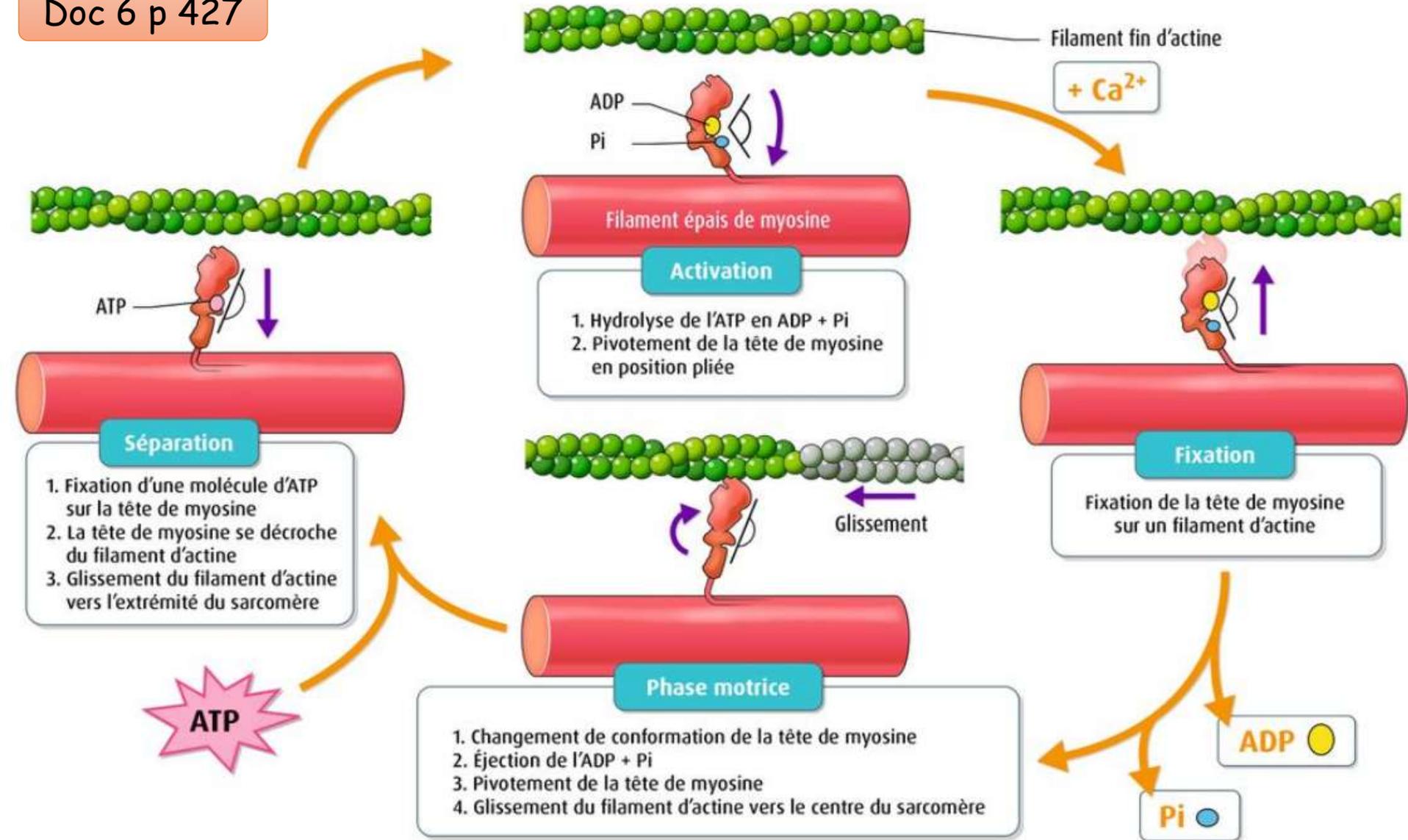
Détachement

Schéma d'un cycle de contraction



Modélisation des mécanismes à l'origine de la contraction des cellules musculaires.

Doc 6 p 427

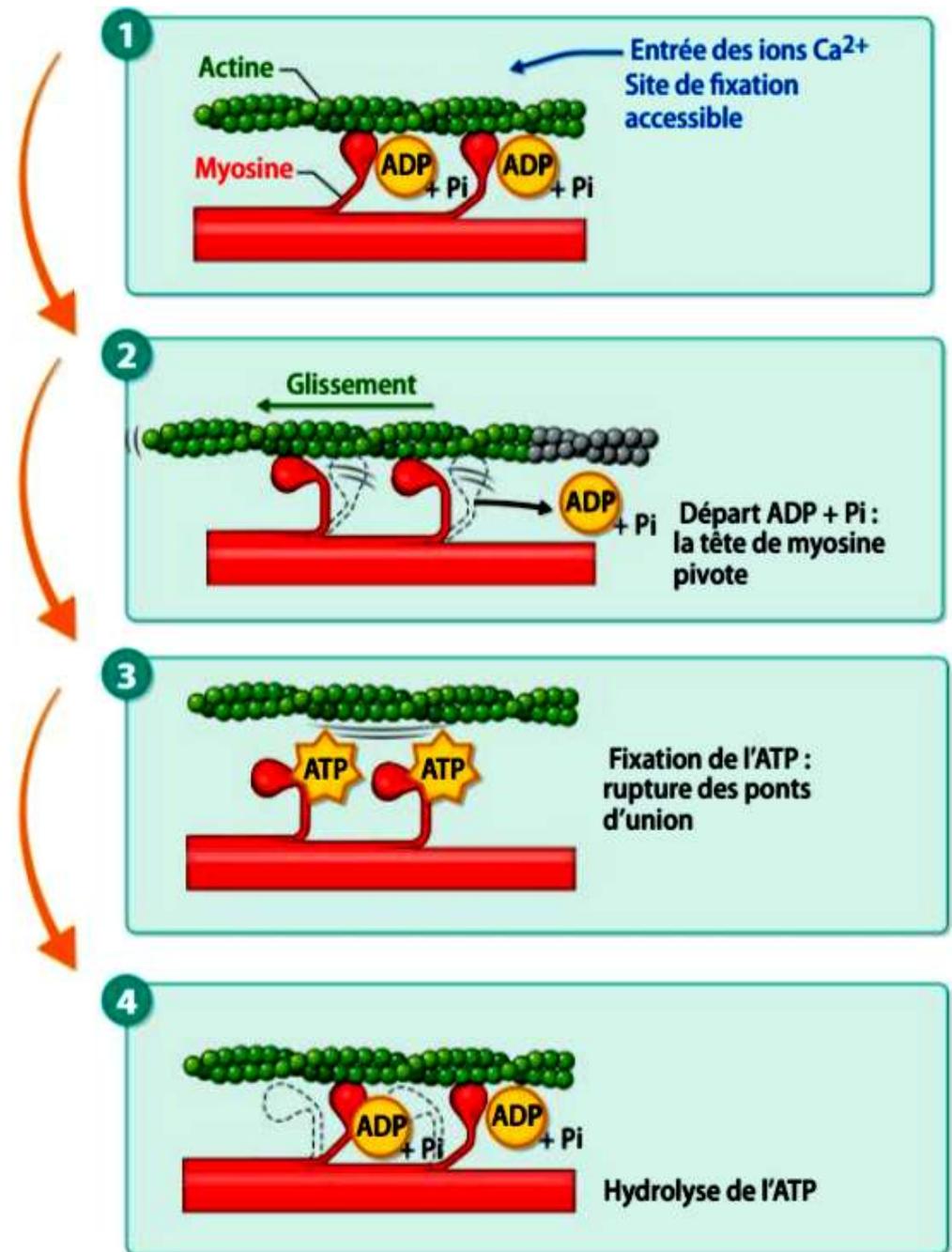


1. Les molécules de myosine possèdent des zones globuleuses, les têtes, qui ont une activité enzymatique. Une tête fixe une molécule d'ATP et catalyse son hydrolyse, ce qui fournit l'énergie nécessaire à son basculement (angle plus grand)
2. L'entrée de calcium dans la cellule permet d'activer la tête de myosine qui se fixe alors à l'actine. Sans calcium, l'actine et la myosine ne peuvent interagir (la cellule est au repos)

3. Après fixation de la myosine à l'actine, la libération de l'ADP + Pi provoque le basculement (elle pivote) de la tête de myosine faisant glisser l'actine en direction du centre du sarcomère
4. La fixation d'une nouvelle molécule d'ATP sur une tête de myosine provoque la dissociation du complexe actine-myosine, suivie d'une nouvelle hydrolyse, d'une nouvelle fixation sur l'actine...etc.

5. Chaque tête de myosine s'attache et se détache plusieurs fois pendant la contraction pour tirer le filament d'actine vers le centre du sarcomère.
6. Si l'ATP n'est pas renouvelé, les têtes de myosine ne se détachent pas et la myofibrille reste contractée (rigidité cadavérique en cas de décès)

Schéma 4 : Mécanisme moléculaire de la contraction musculaire

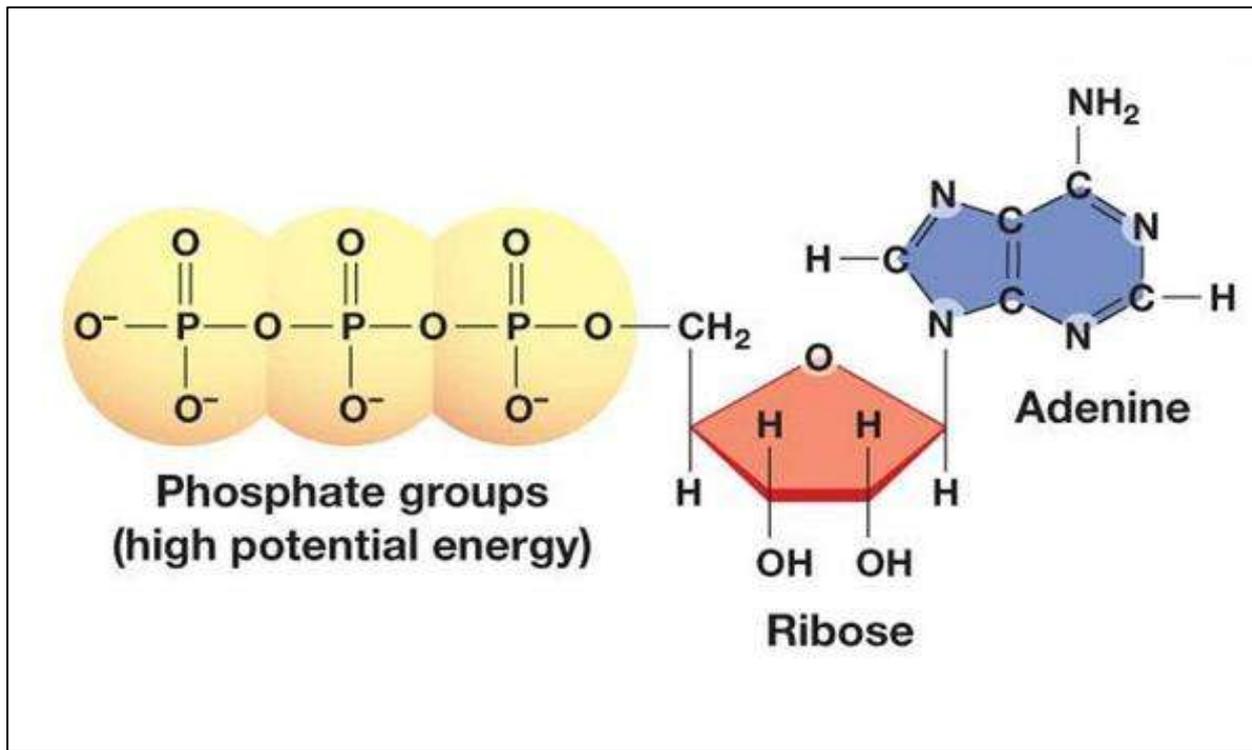


III - L'ATP, utilisé lors de la contraction, ne peut être stocké. Il doit être par conséquent régénéré en permanence, grâce à l'oxydation de molécules organiques comme le glucose.

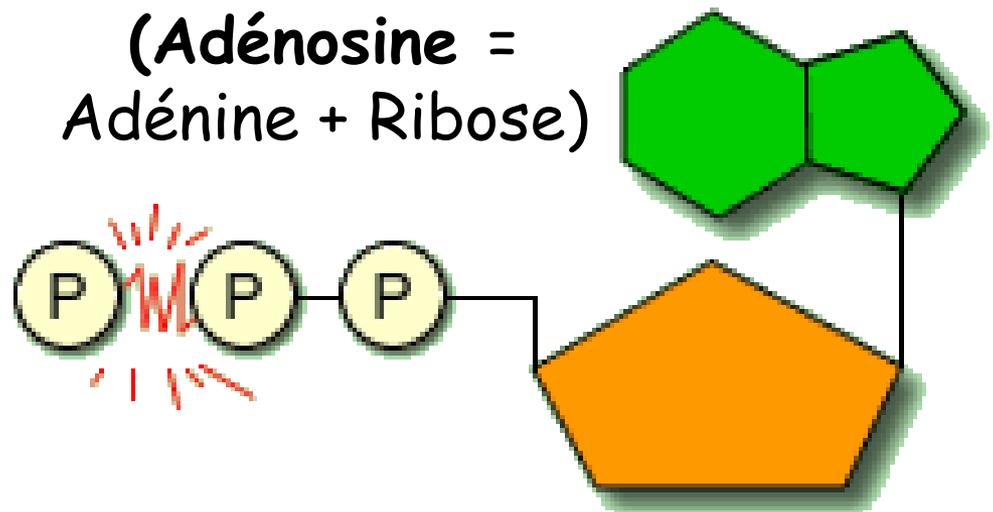
Doc 4 p 433

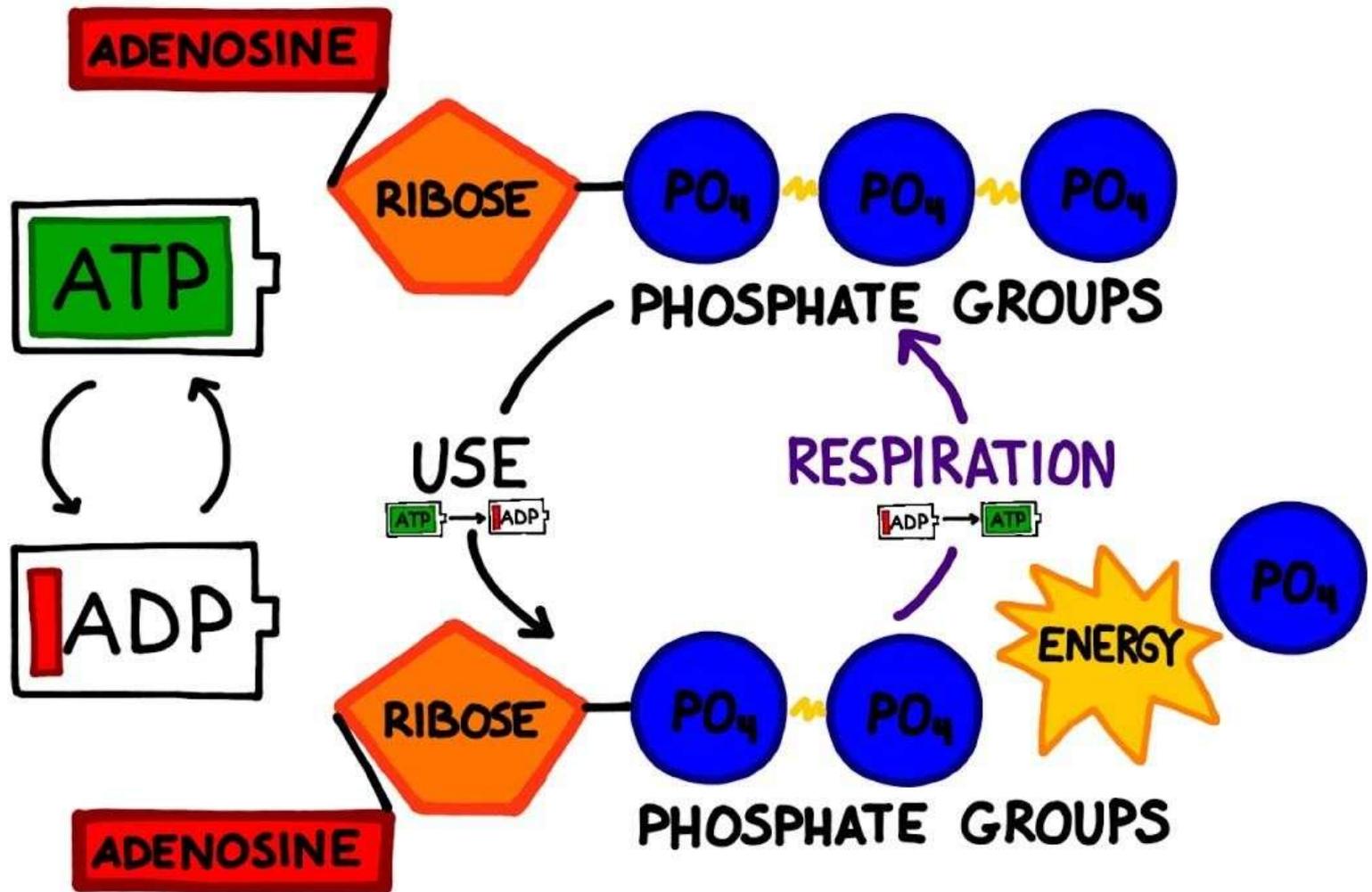
Notions-clé

- Une oxydation correspond à une perte d'électrons.
- Une réduction correspond à un gain d'électrons.



(Adénosine =
Adénine + Ribose)





L'hydrolyse de l'ATP fournit l'énergie nécessaire au travail mécanique de la contraction.

Dans toute cellule, l'énergie chimique utilisable se trouve sous forme d'une molécule universelle : l'ATP

a. L'ATP comporte 3 groupements phosphates.

Doc 4 p 428

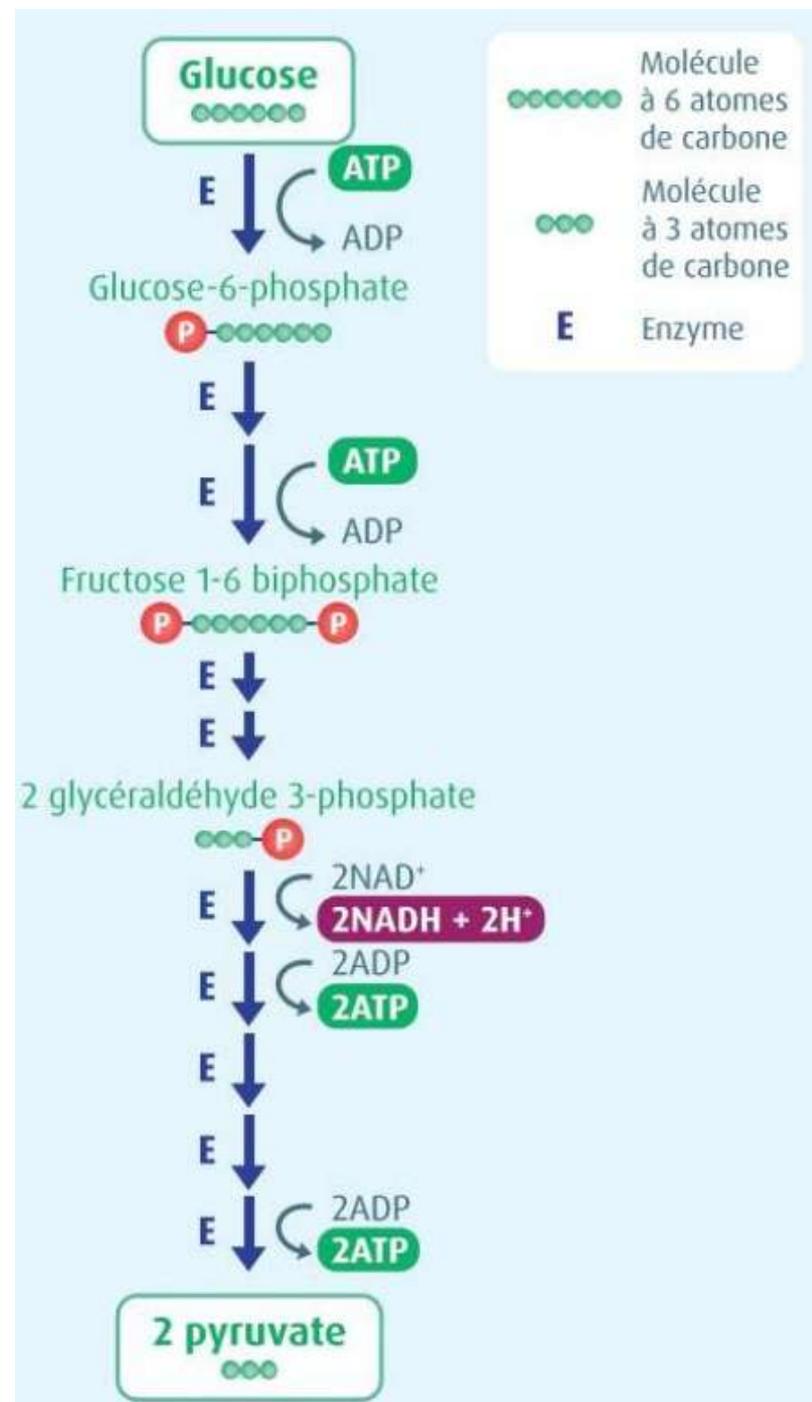
b. L'hydrolyse de l'ATP produit de l'ADP et un ion phosphate (P_i). Cette réaction libère de l'énergie



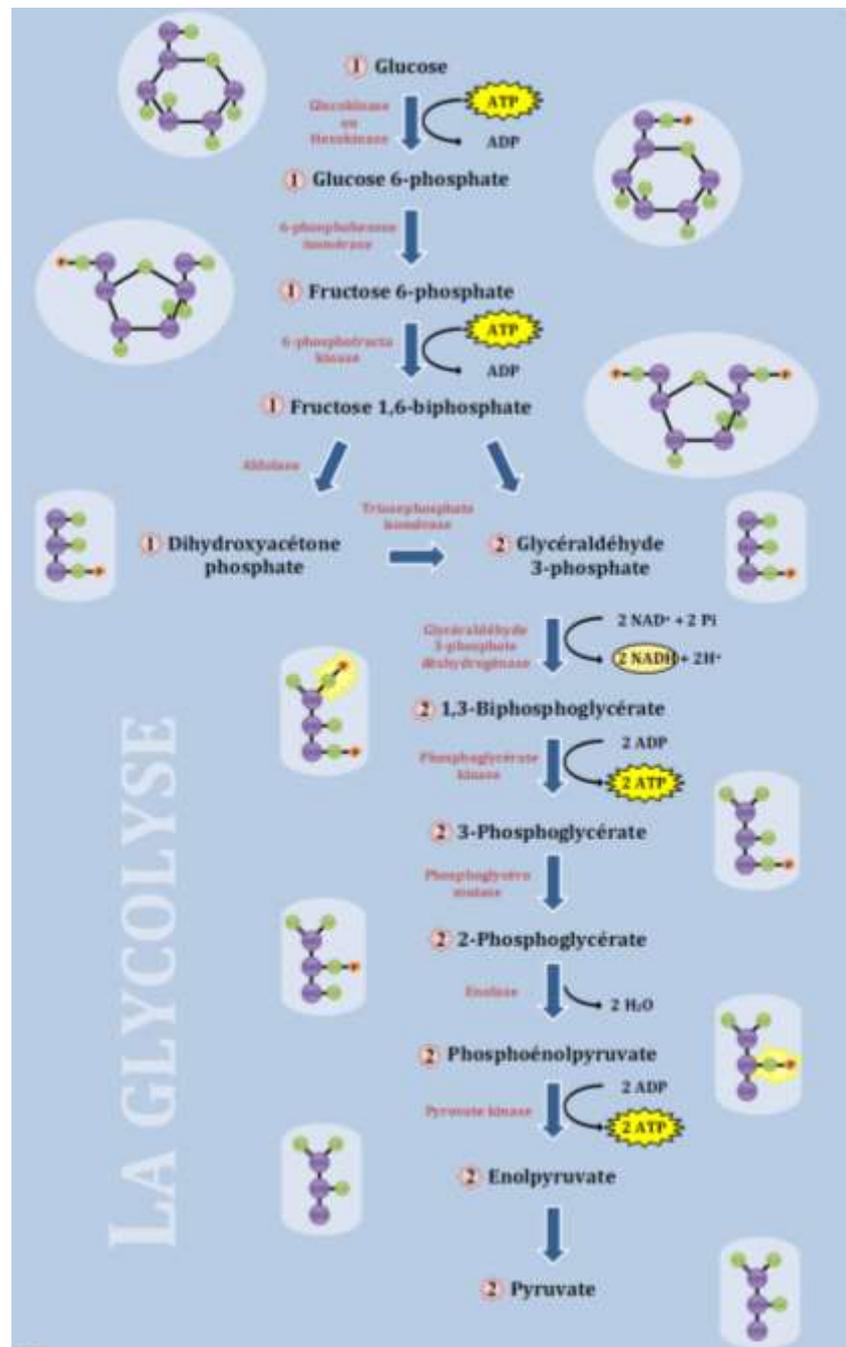
c. Inversement, la synthèse d'ATP nécessite un apport d'énergie. Plusieurs voies métaboliques (dont la respiration) permettent d'obtenir l'énergie nécessaire à cette régénération



La Glycolyse



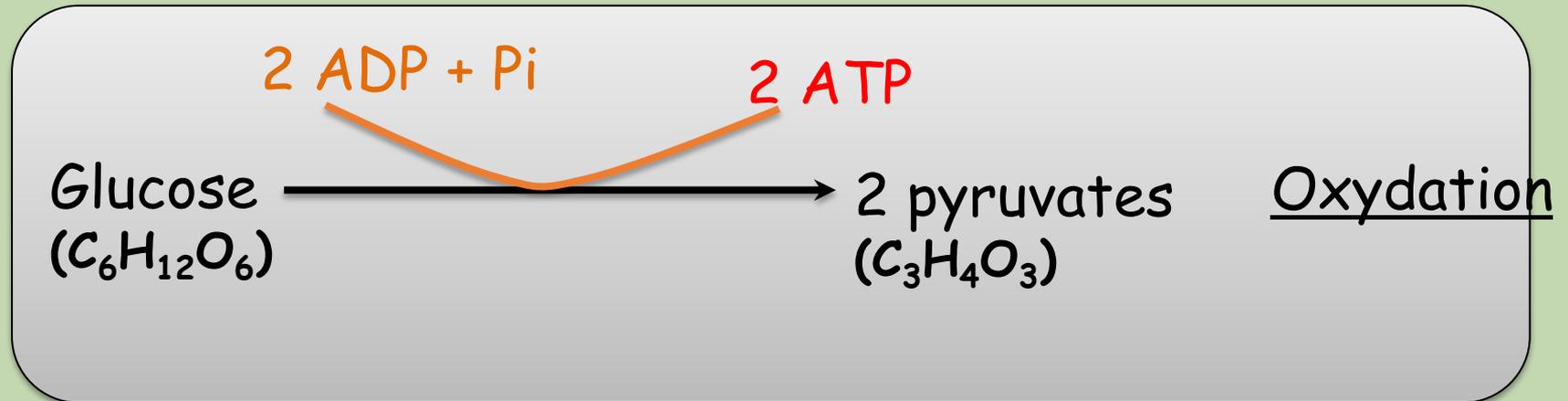
La Glycolyse



2 - Lorsque le glucose pénètre dans la cellule pour être utilisé comme substrat énergétique, il est transformé en 2 molécules de pyruvate dans le cytoplasme lors d'un ensemble de réactions enzymatiques appelé glycolyse.

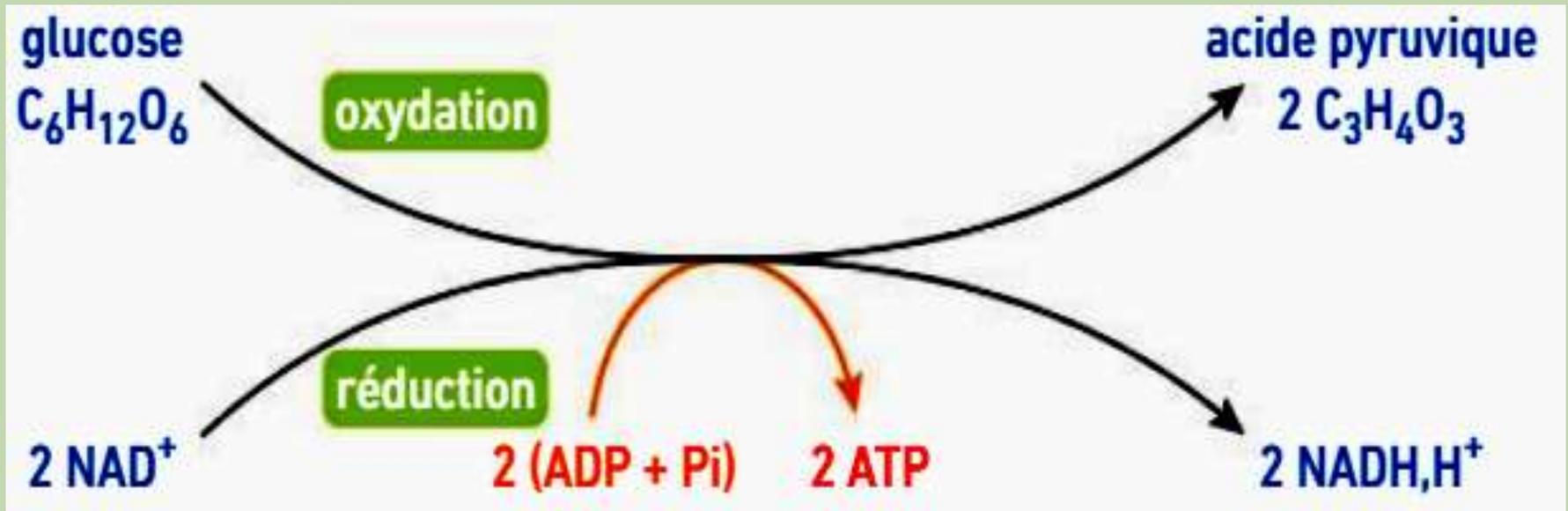
a. Le pyruvate ou acide pyruvique ($\text{CH}_3\text{-CO-OH}$) possédant moins d'hydrogène que le glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), la transformation du glucose en pyruvate est donc une oxydation.

a. Le pyruvate ou acide pyruvique ($\text{CH}_3\text{-CO-OH}$) possédant moins d'hydrogène que le glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), la transformation du glucose en pyruvate est donc une oxydation.



Enzyme = déshydrogénase

b. Cette oxydation est couplée à la production de composés réduits NADPH à partir du NAD⁺ et à la synthèse de 2 ATP par molécule de glucose oxydée



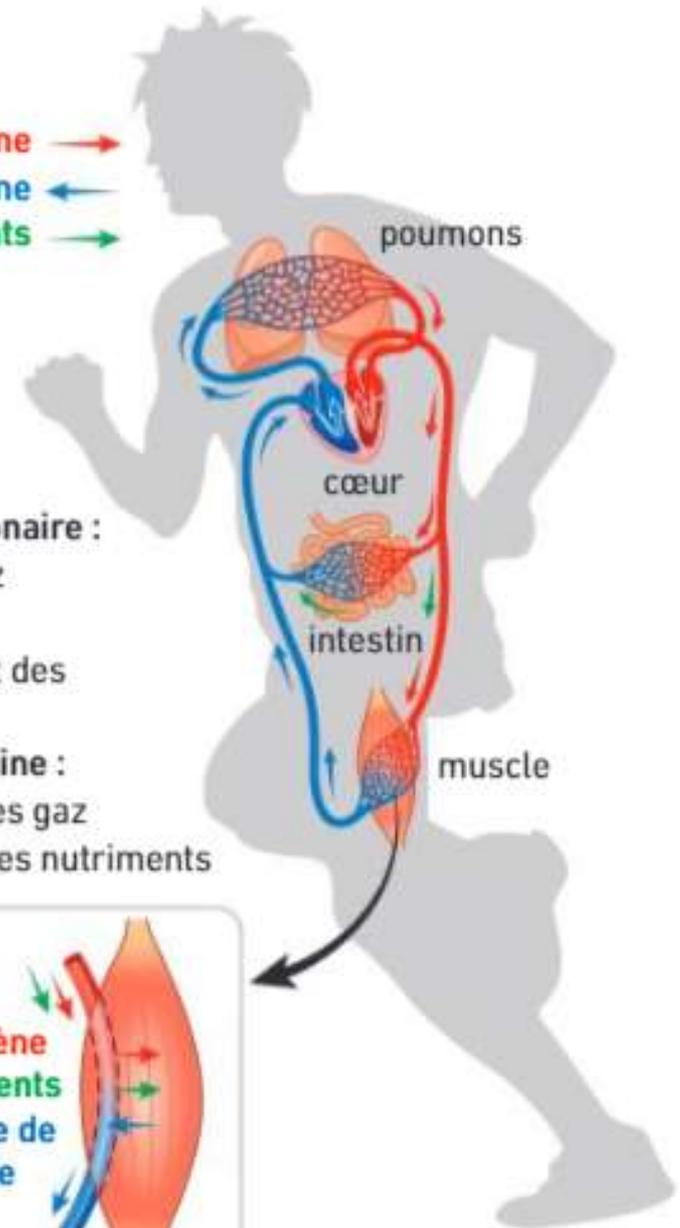
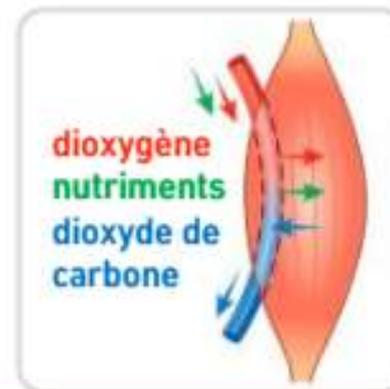
c. Le stock intracellulaire de NAD^+ étant limité, il doit être régénéré en permanence faute de quoi la glycolyse est bloquée et la synthèse d'ATP cesse. Cette régénération peut se faire par différentes voies métaboliques (respiration ou fermentation)

Les cellules musculaires consomment O_2 et glucose apporté par le sang.

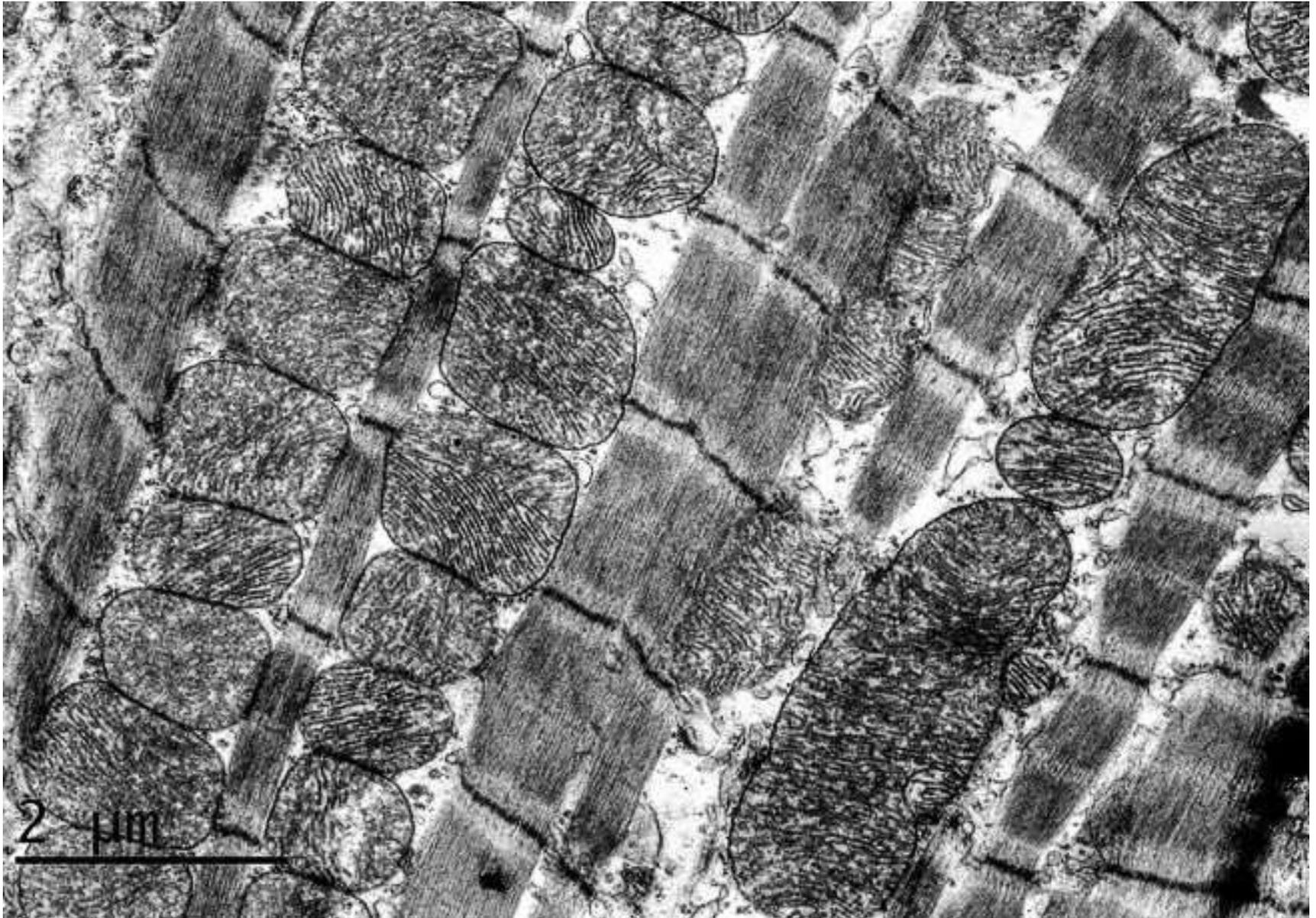
Des échanges nécessaires à la respiration cellulaire

dioxygène →
dioxyde de carbone ←
nutriments →

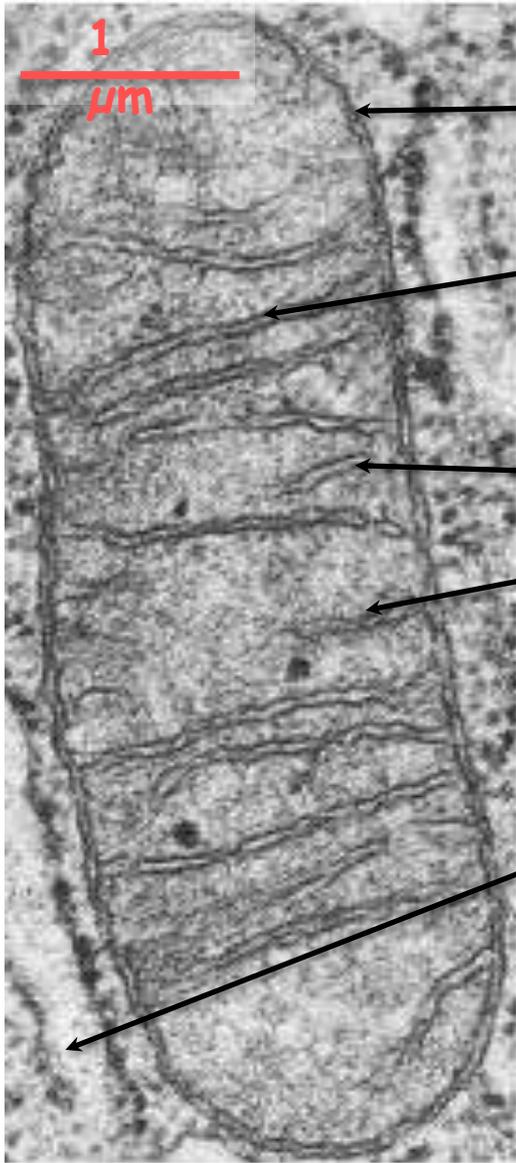
- Fonctions**
- **ventilation pulmonaire :** échanges des gaz respiratoires
 - **digestion :** apport des nutriments
 - **circulation sanguine :** acheminement des gaz respiratoires et des nutriments



Fibres musculaires et mitochondries



La respiration nécessite des mitochondries



Membrane
externe

Membrane interne
repliée en crête

Espace
intermembranaire
Matrice

(Hyaloplasme)

crête : repli de
la membrane
interne

membrane
externe

matrice

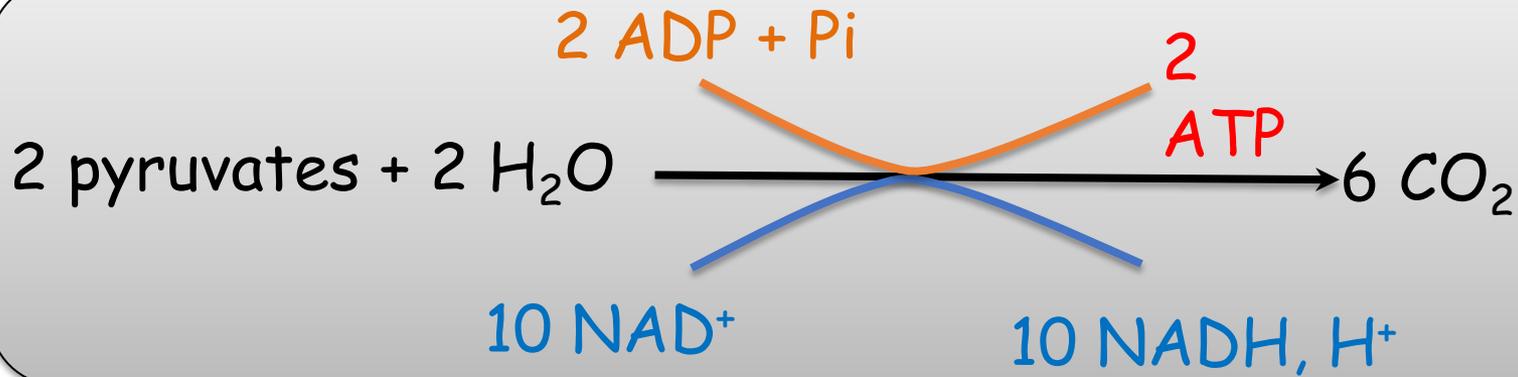
membrane
externe

membrane
interne

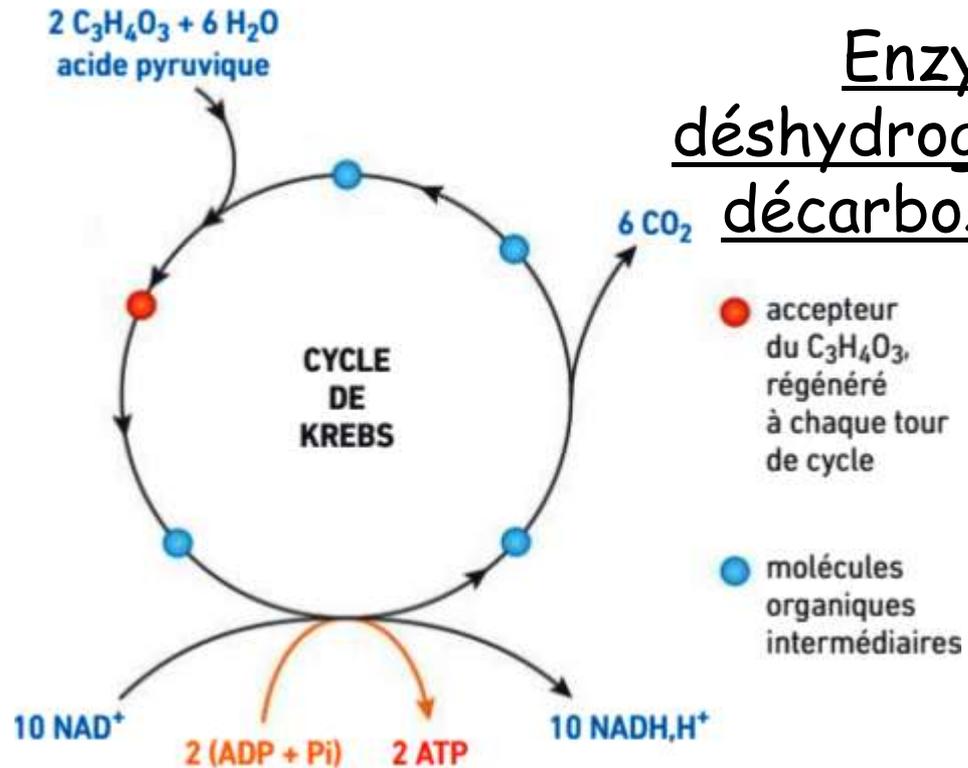
p 434

3 - En présence de dioxygène, la respiration cellulaire est une voie métabolique aérobie se déroulant dans les mitochondries et permettant la production d'une quantité importante d'ATP

a. Une mitochondrie est un organite limité par une double membrane. La membrane interne forme des replis appelés crêtes mitochondriales. Elle délimite un volume interne, la matrice.



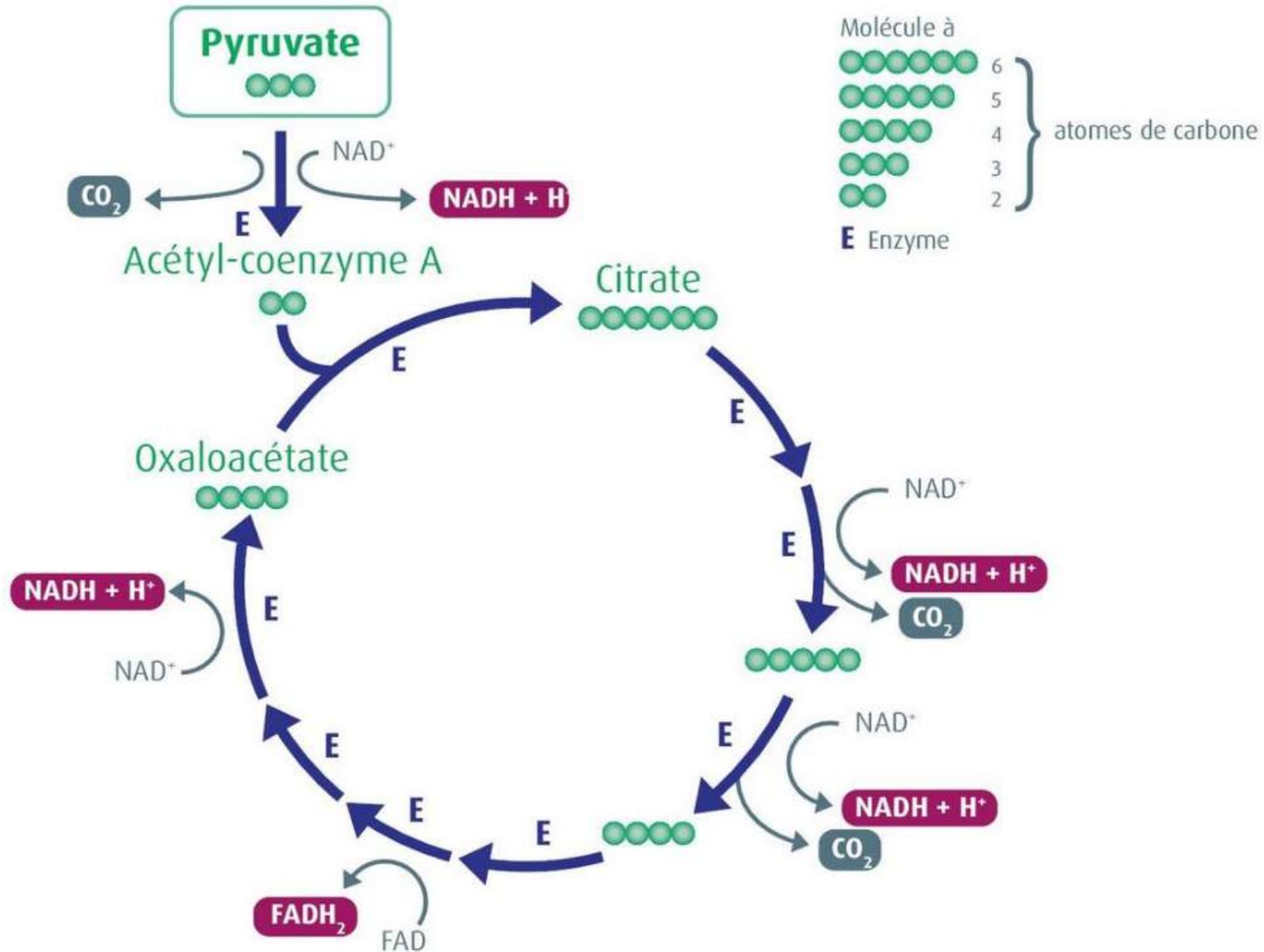
Enzymes =
déshydrogénase
décarboxylase



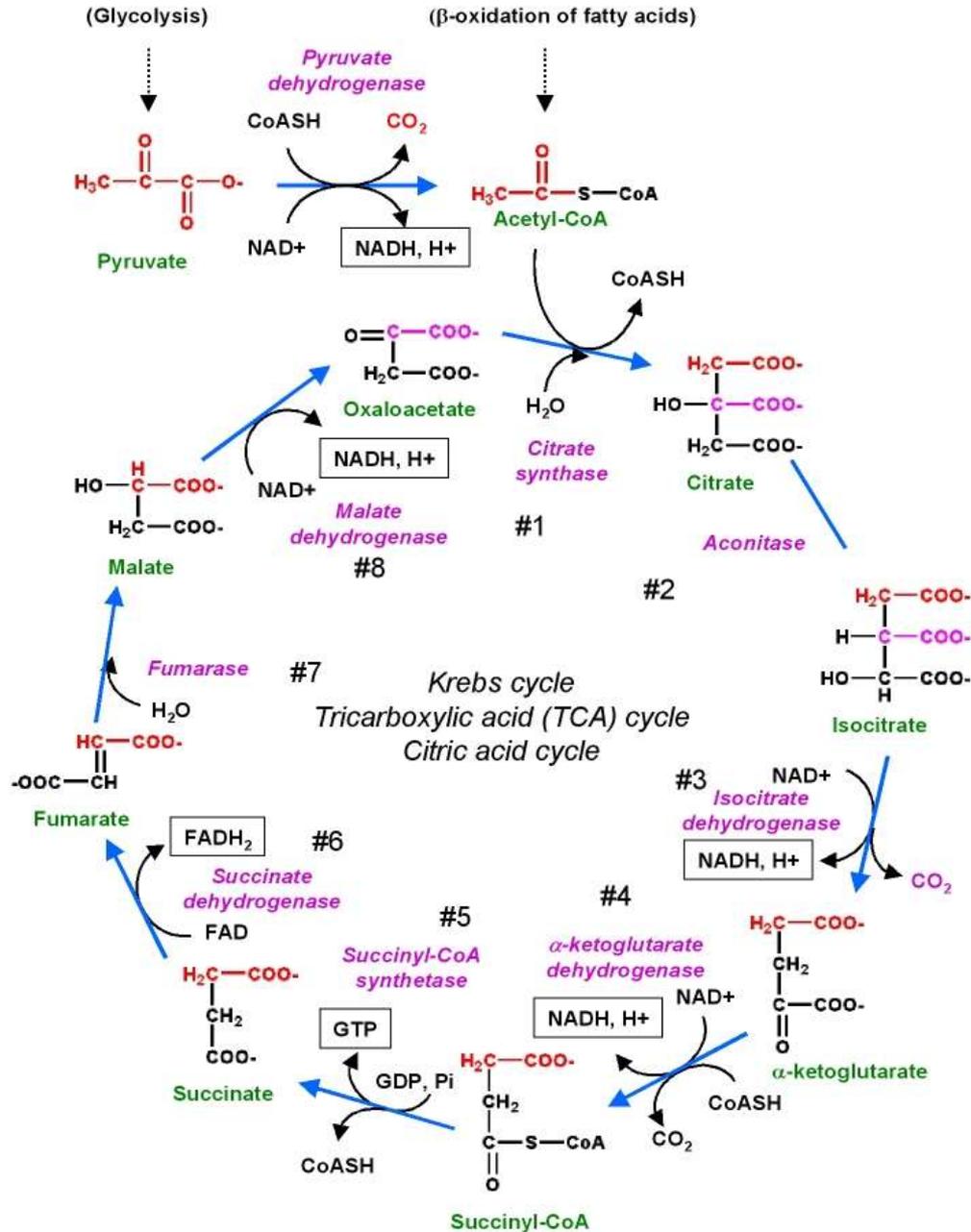
How the Krebs Cycle Works HD Animation
McGrawHill
<https://www.youtube.com/watch?v=AMBTR8fzT04>

Le cycle de Krebs

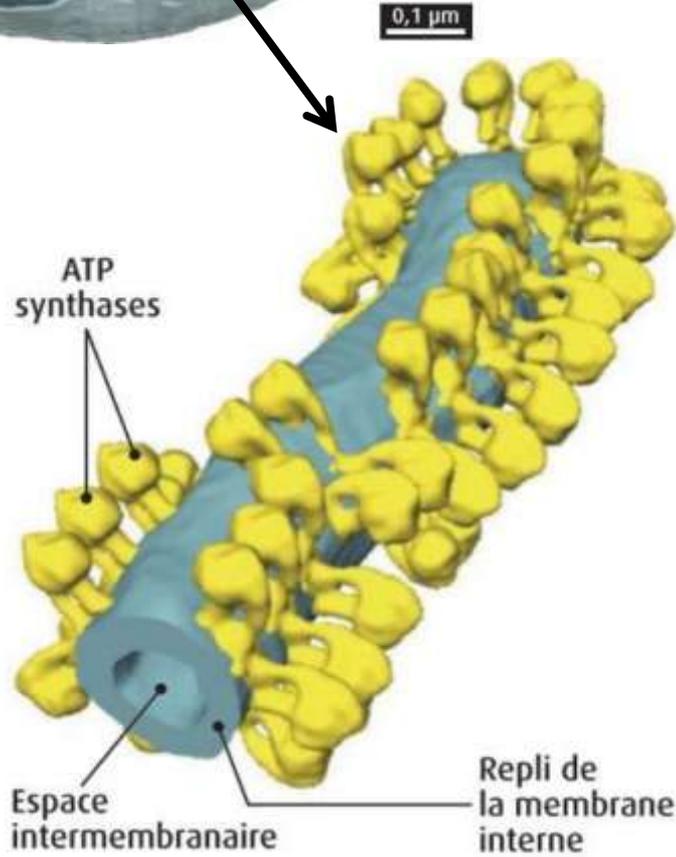
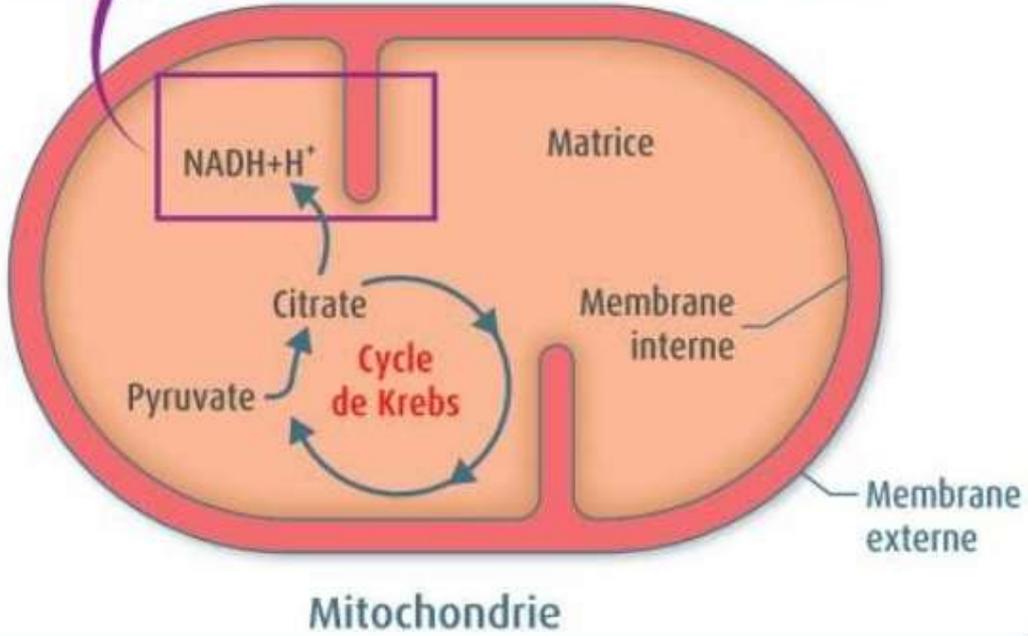
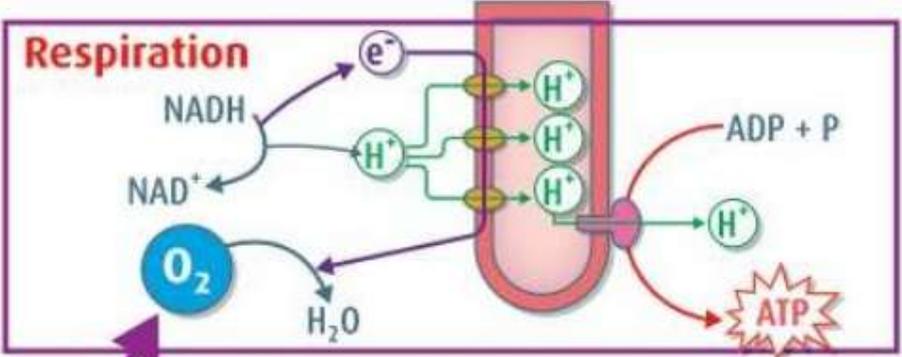
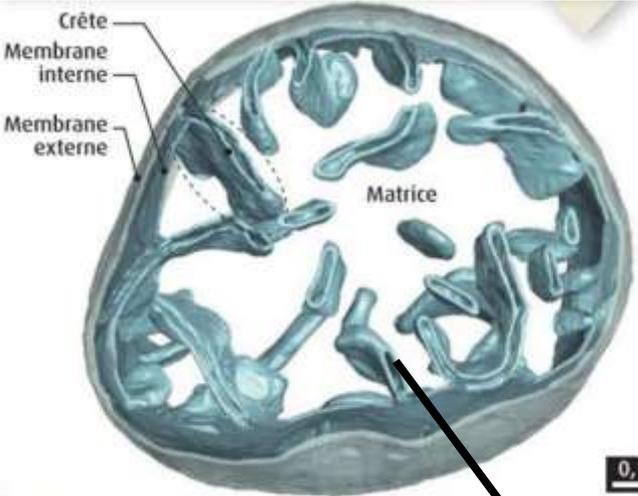
Doc 5 p 435

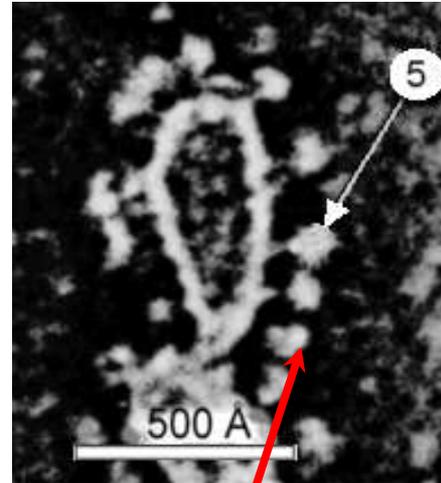
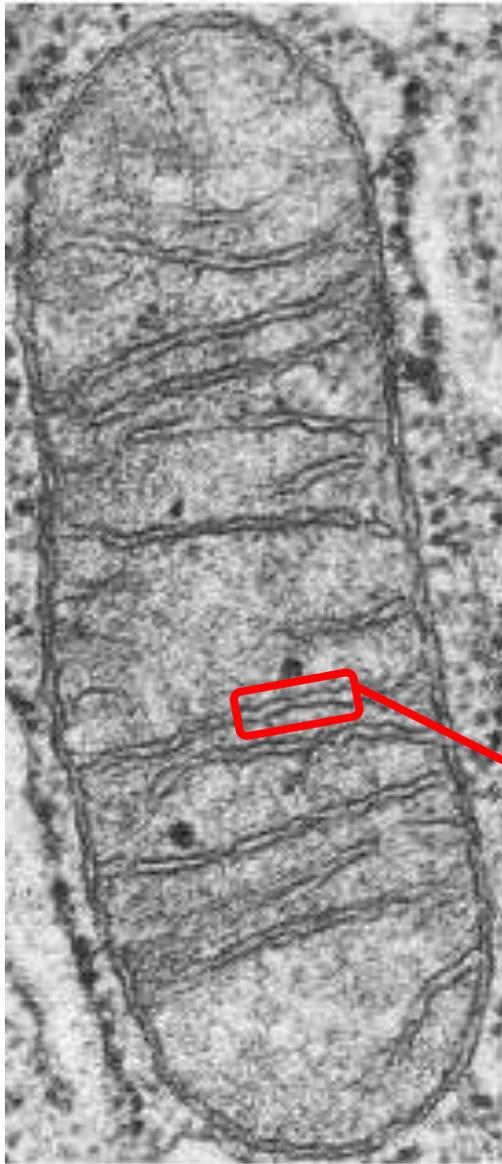


Le cycle de Krebs

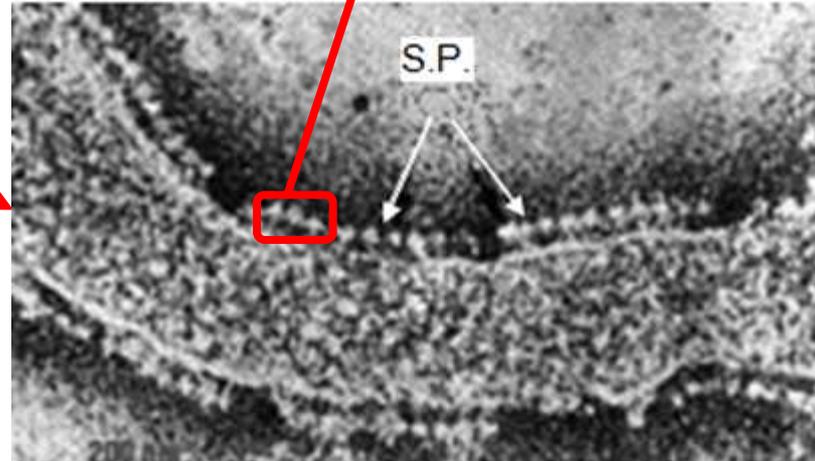


b. Le pyruvate entre dans la mitochondrie où son oxydation se poursuit dans la matrice. Il subit une série de décarboxylations et de déshydrogénations constituant le cycle de Krebs. Le CO_2 produit est rejeté au cours de la respiration. Ces réactions sont couplées à la production de $\text{NADPH} + 2\text{ATP}$.



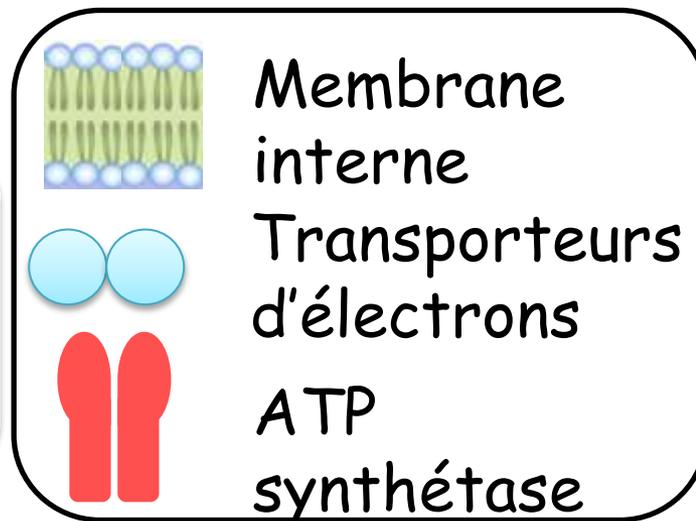
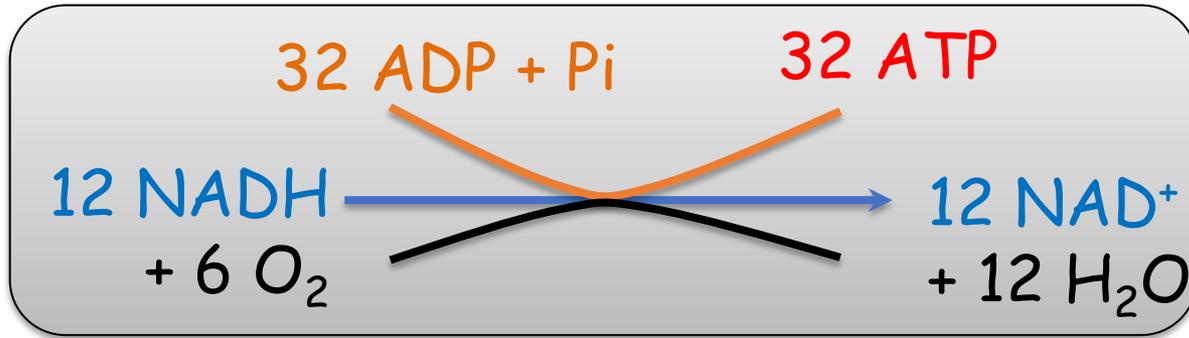


Sphères pédonculées
= **ATP synthétase**

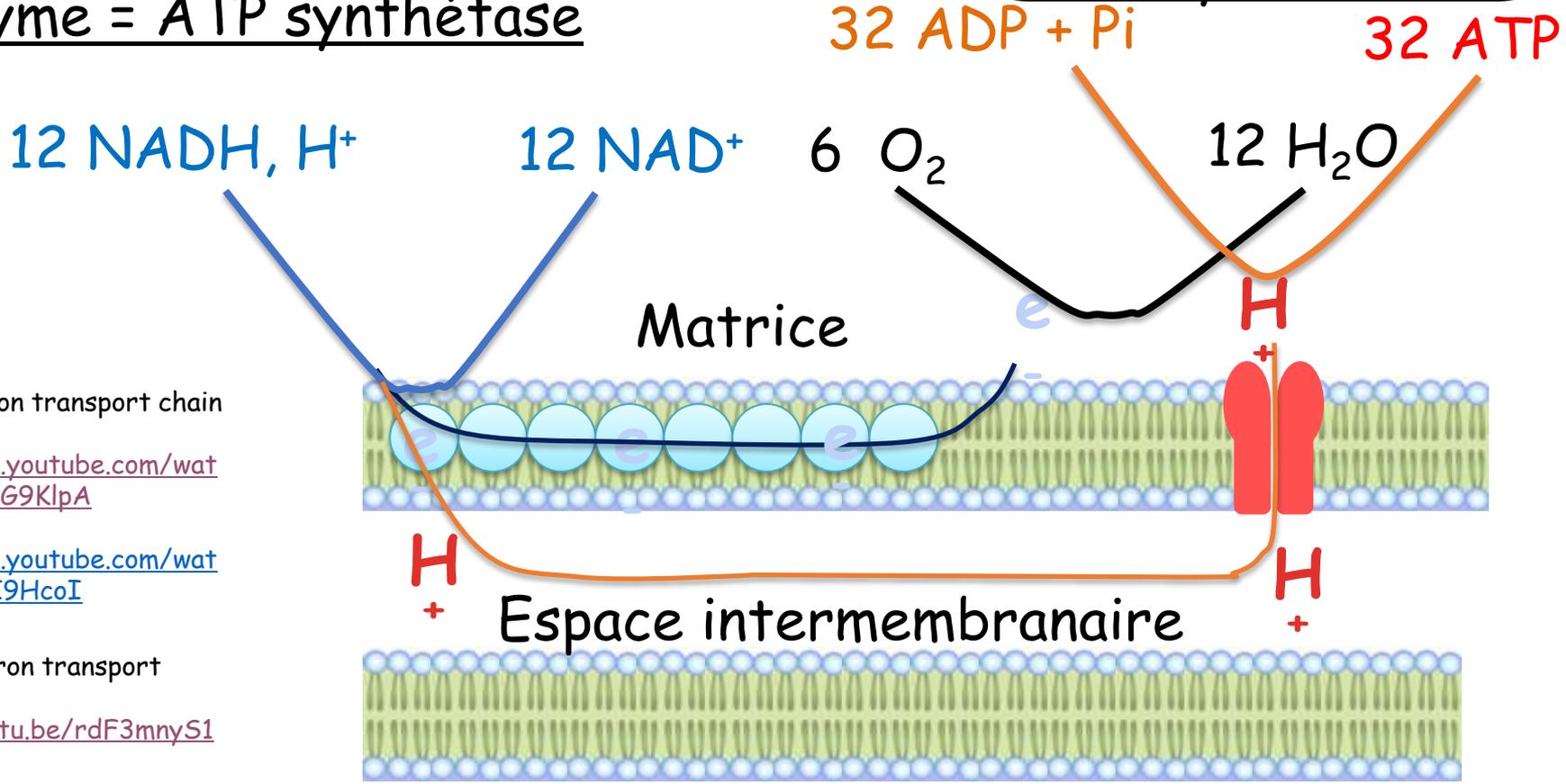


▲ Section d'une crête mitochondriale, présentant des sphères pédonculées (S.P.)

La chaîne respiratoire a lieu dans les crêtes



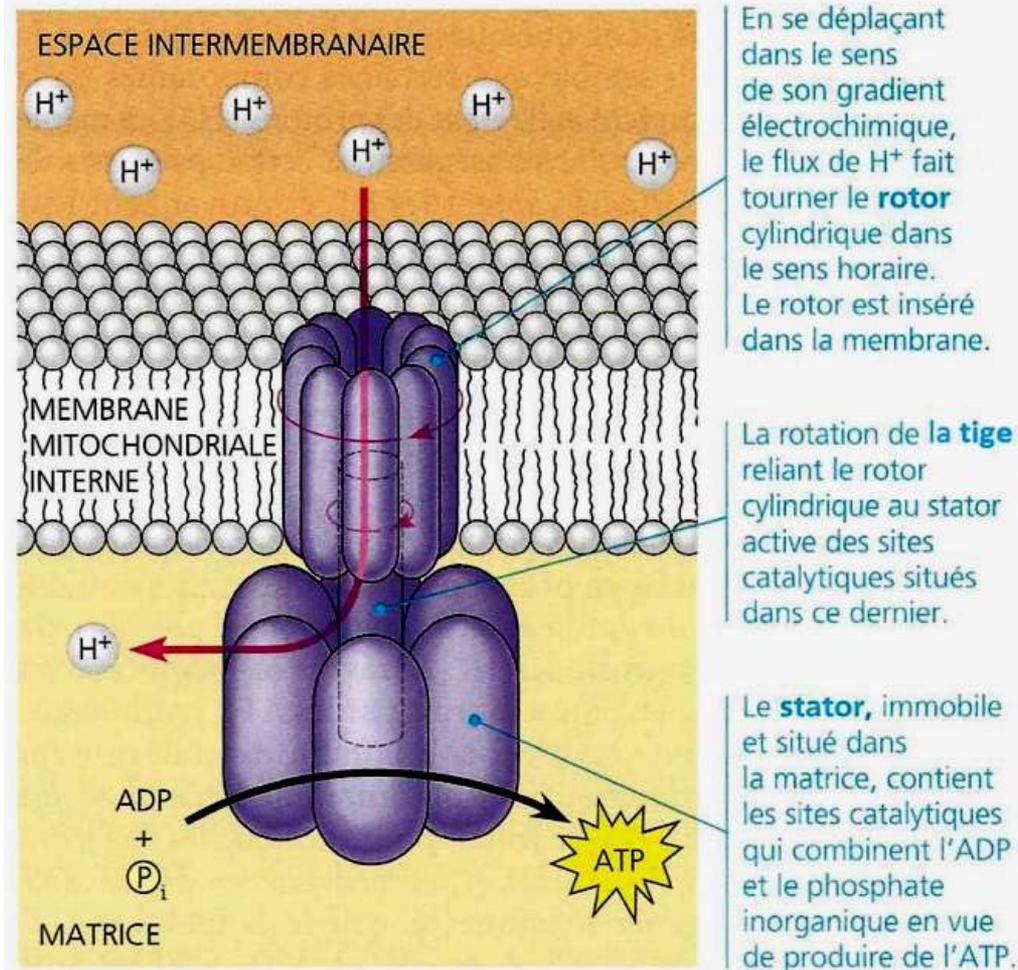
Enzyme = ATP synthétase



Vidéo Electron transport chain
McGrawHill
<https://www.youtube.com/watch?v=6W-7FG9KlpA>
Ou
<https://www.youtube.com/watch?v=Zg-x5I9HcoI>

Vidéo Electron transport chain
<https://youtu.be/rdF3mnyS1p0>

Fonctionnement de l'ATP synthétase



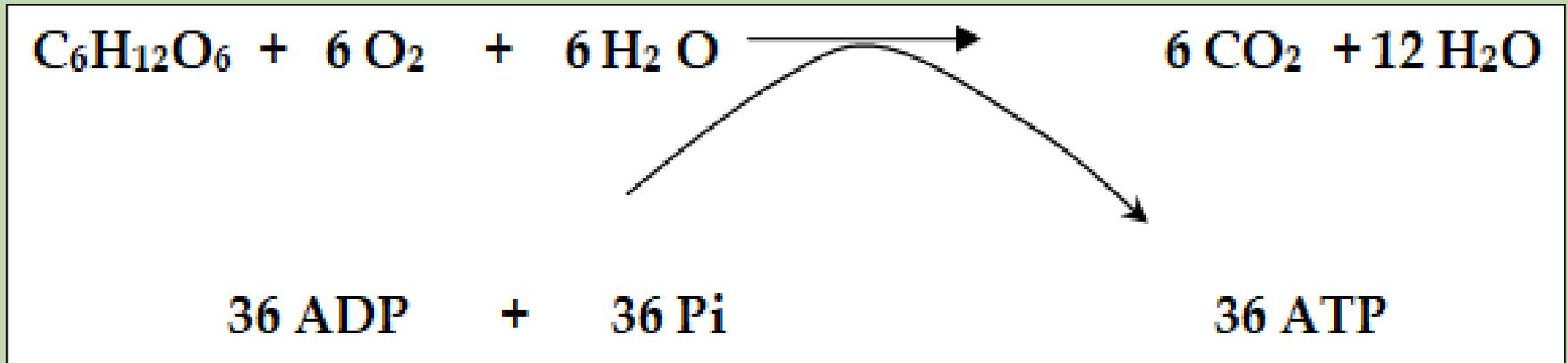
L'ATP synthétase, une turbine moléculaire. Le complexe protéique formé par l'ATP synthétase fonctionne à la manière d'une turbine alimentée par un flux de protons. Cette enzyme se retrouve dans la membrane des mitochondries et des chloroplastes eucaryotes, et dans la membrane plasmique des procaryotes. Elle se compose d'un rotor, d'un arbre et d'un stator, chaque partie étant constituée de plusieurs sous-unités protéiques.

[CAMPBELL & REECE, 2004]

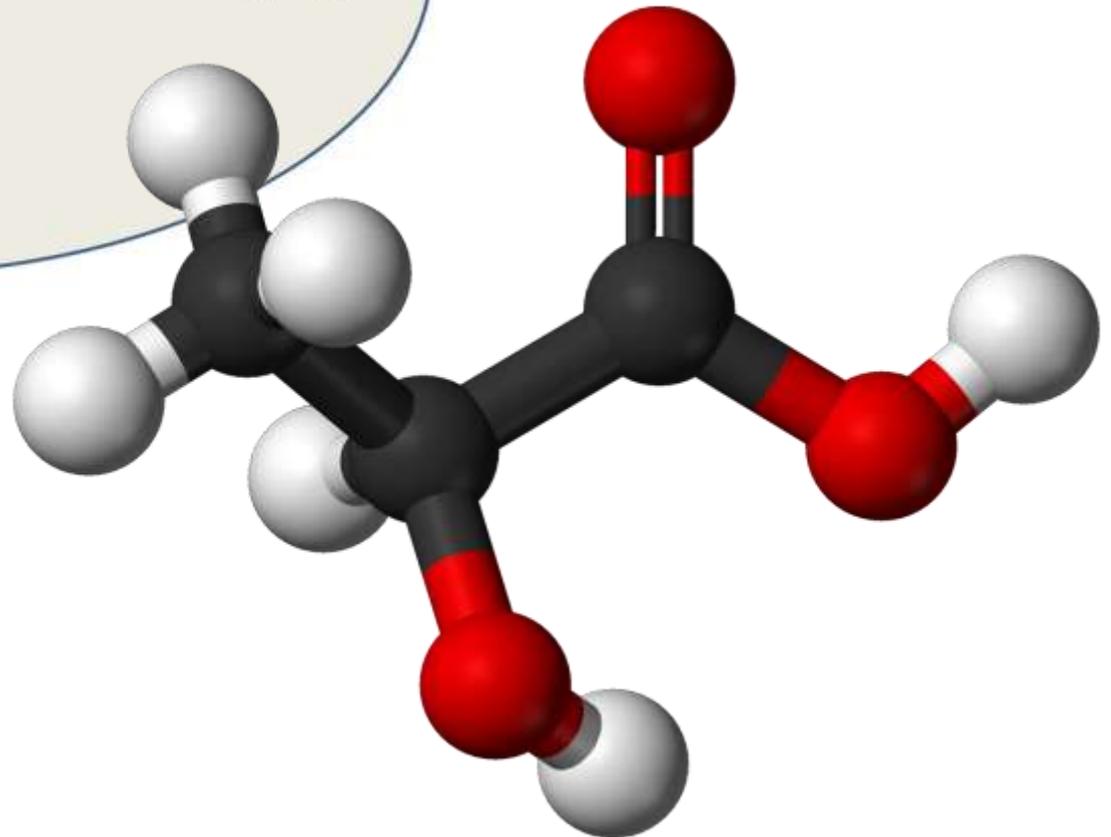
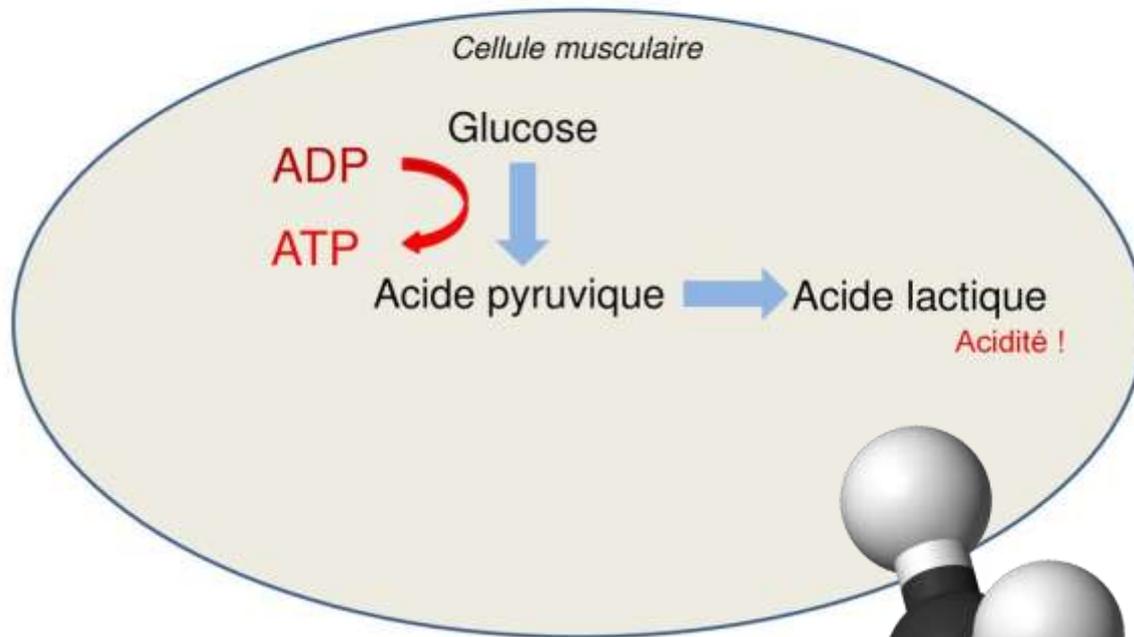
c. La dernière étape se déroule au niveau des crêtes de la membrane interne de la mitochondrie. Les composés réduits NADPH cèdent leurs électrons et protons à travers une chaîne d'oxydo-réductions appelée chaîne respiratoire.

Le dioxygène (O_2) est la dernière molécule qui accepte des électrons en produisant de l'eau (H_2O). Cette réaction est couplée à la production de 34 ATP

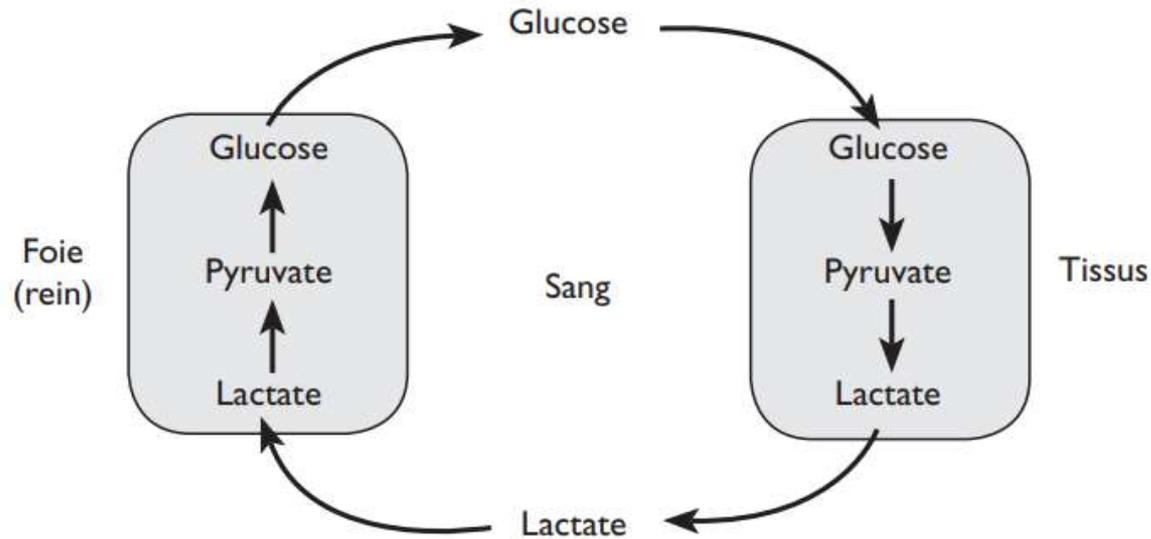
d. Au total, 36 molécules d'ATP ont été produites par molécule de glucose. Le glucose (molécule organique) a subi une oxydation totale en CO_2 (molécule minérale)



Filière anaérobie lactique



Métabolisme du lactate



L'accumulation d'anions lactate dans le cytosol de la cellule musculaire s'accompagne d'une accumulation de protons H^+ responsable de la fatigue musculaire et de crampes.



4 . Les cellules musculaires peuvent aussi produire de l'ATP par une autre voie métabolique, la **fermentation lactique**. Cette autre voie est plus rapide, ne nécessite pas de dioxygène (anaérobie), mais produit beaucoup moins d'ATP.

a. Le pyruvate issu de la glycolyse reste dans le cytoplasme. Il subit une oxydation partielle en acide lactique.

b . Cette transformation permet la réoxydation des composés réduits lors de la glycolyse (NADPH)

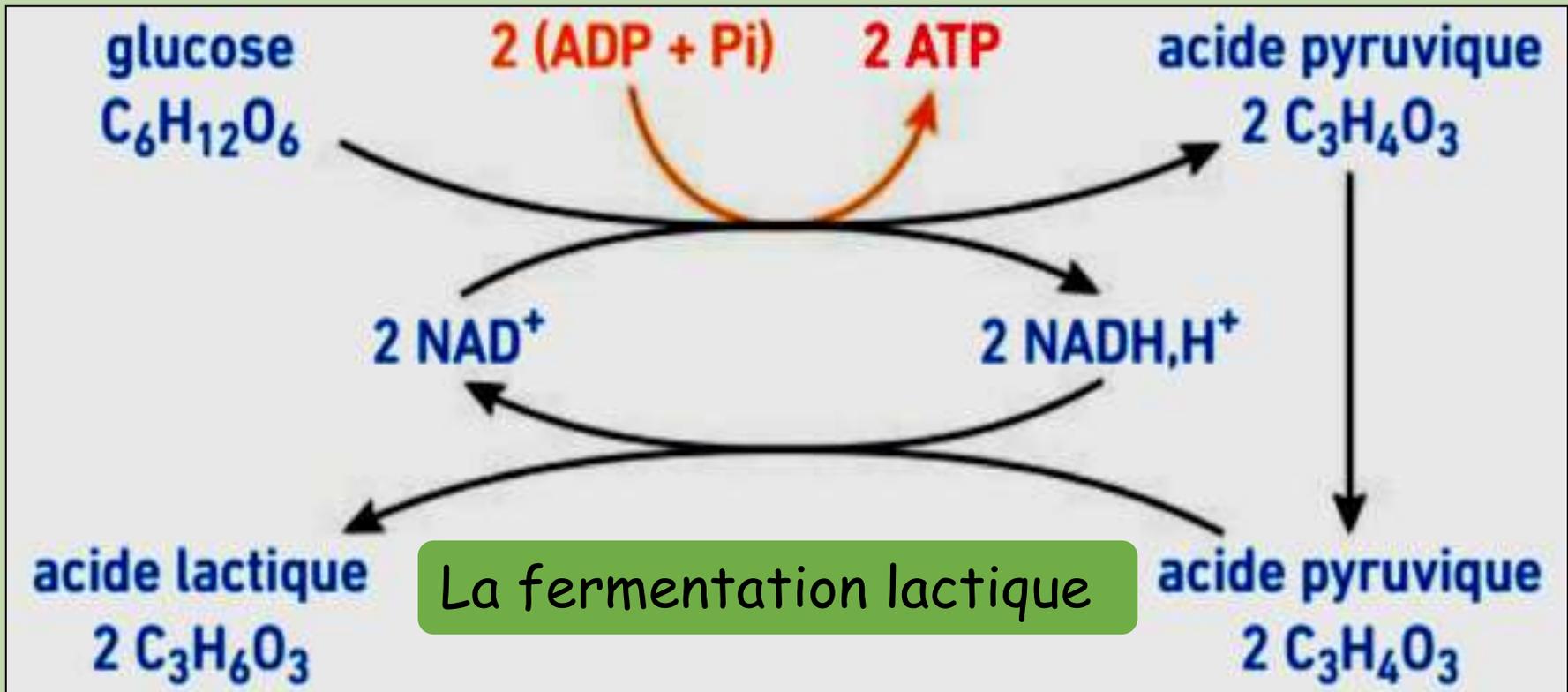
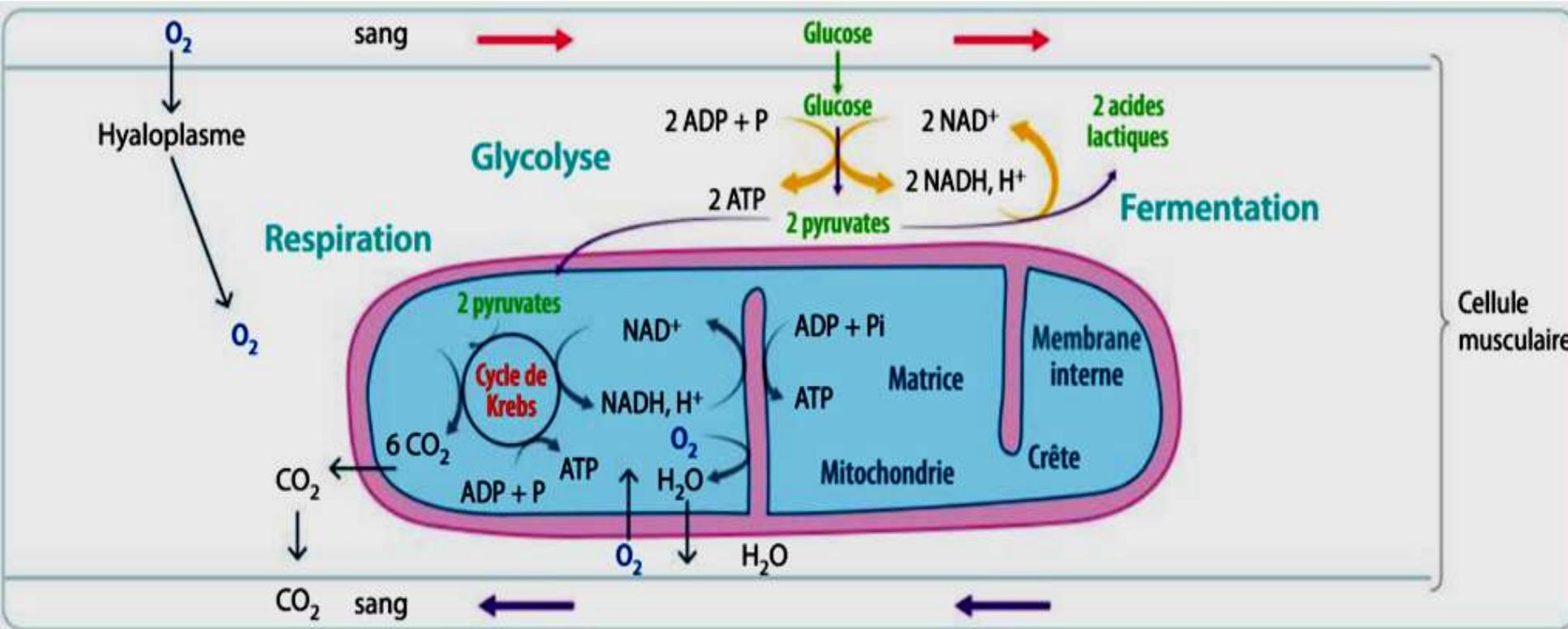


Schéma 5 : Bilan du métabolisme des cellules musculaires



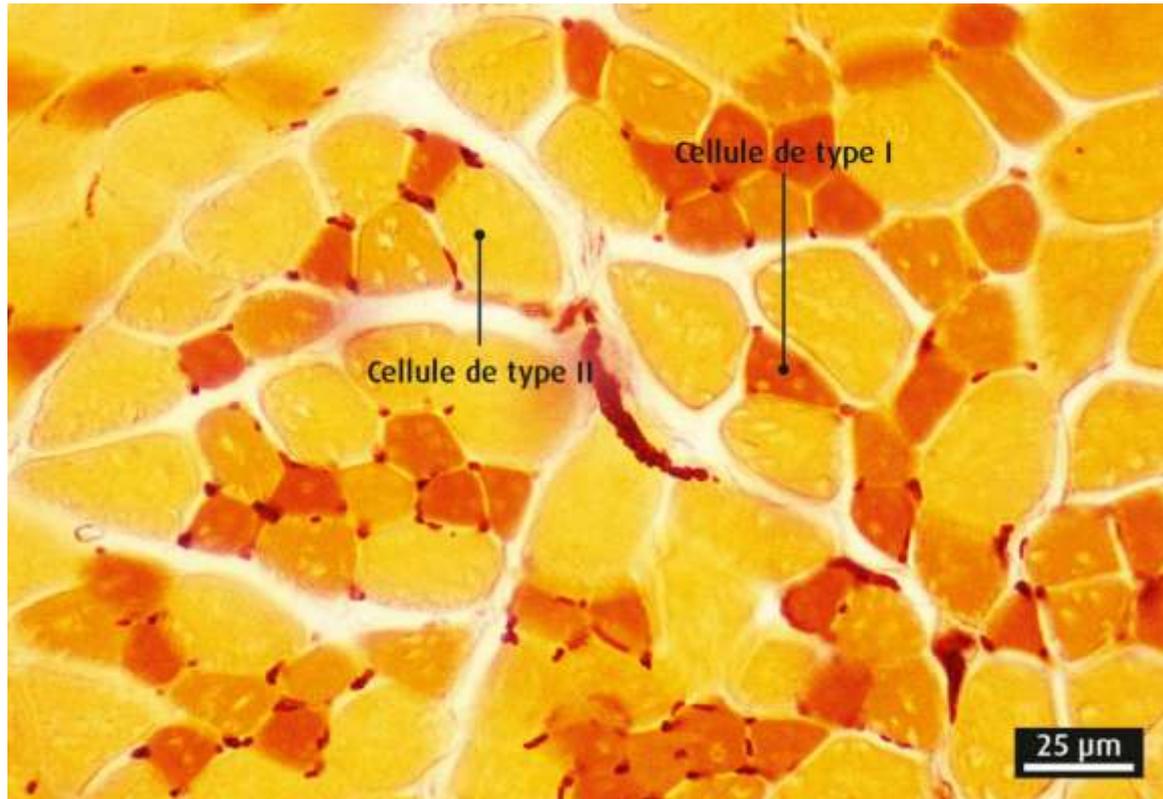
IV - Les cellules musculaires adaptent leur métabolisme en fonction du type d'effort à fournir : la fermentation intervient surtout dans les exercices courts et puissants.

La respiration, qui exige un apport important en O₂ durant l'effort, est privilégiée pour les activités d'endurance (effort prolongés de moindre intensité).

Coupe transversale d'un muscle observé au microscope optique.

Un entraînement spécifique en **puissance** se traduit par une augmentation de la proportion des cellules de **type II**.

Un entraînement en **endurance** provoque une augmentation de la proportion des cellules de **type I**.



Mise en évidence de l'activité ATP-ase par une coloration

Voies différentes selon les types de fibres



A Coupe colorat

	Fibre de type I	Fibre de type II
Résistance à la fatigue	forte	faible
Vitesse de contraction	lente	rapide
Richesse en mitochondries	élevée	faible
Teneur en enzymes de la fermentation lactique	faible	moyenne à élevée
Irrigation sanguine	forte	faible
Teneur en glycogène*	faible	élevée

B Quelques caractéristiques biochimiques des deux types de fibres musculaires. Types I utilisent la respiration

Types II utilisent la fermentation

Voies différentes selon les types de fibres

	Fibre de type I	Fibre de type II
Résistance à la fatigue	forte	faible
Vitesse de contraction	lente	rapide
Richesse en mitochondries	élevée	faible
Teneur en enzymes de la fermentation lactique	faible	moyenne à élevée
Irrigation sanguine	forte	faible
Teneur en glycogène*	faible	élevée

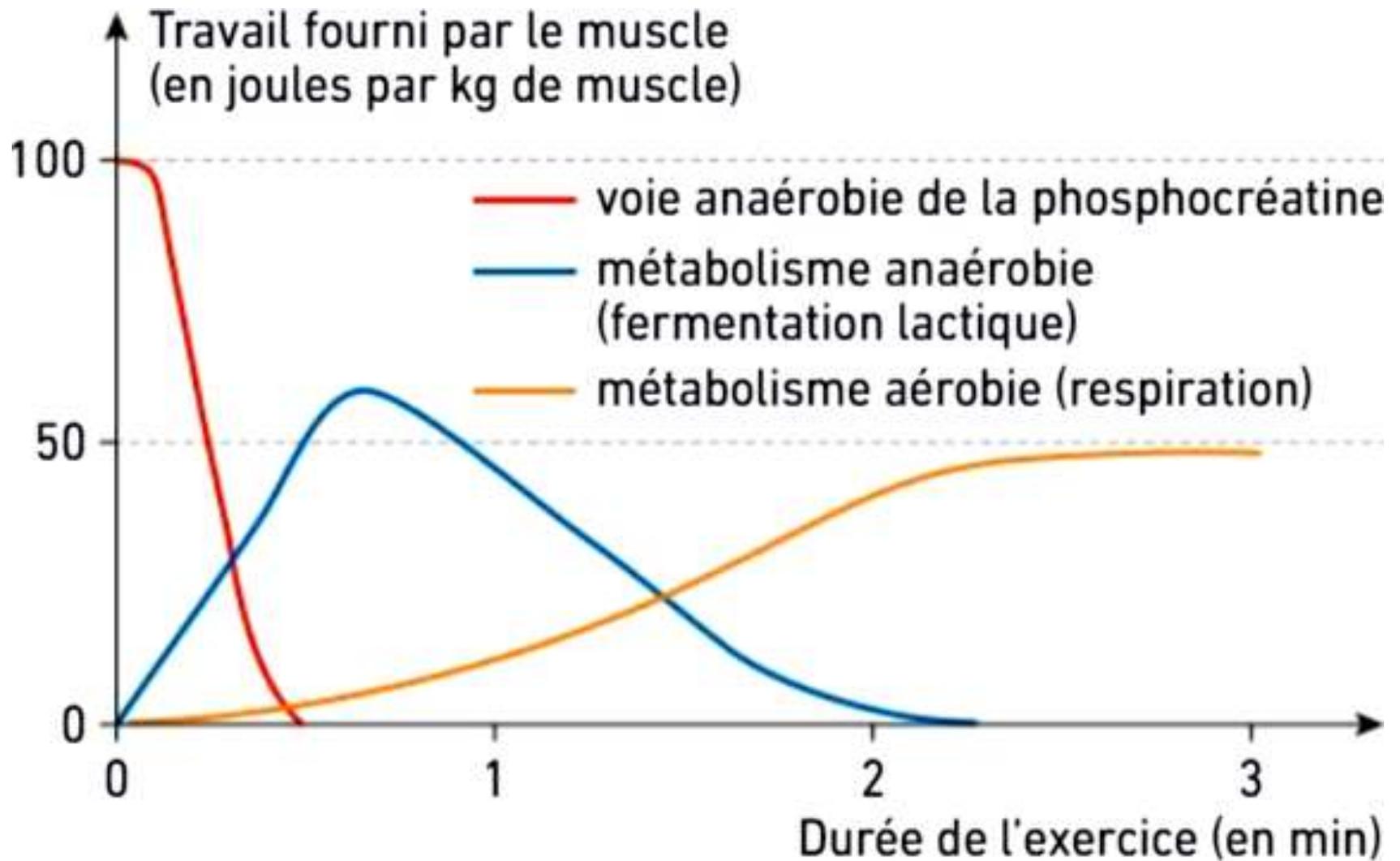
Types I impliquées dans les efforts d'endurance :

action lente, fort rendement, apport important en O_2 et glucose, peu de réserves. => Dépendantes du cœur et des poumons.

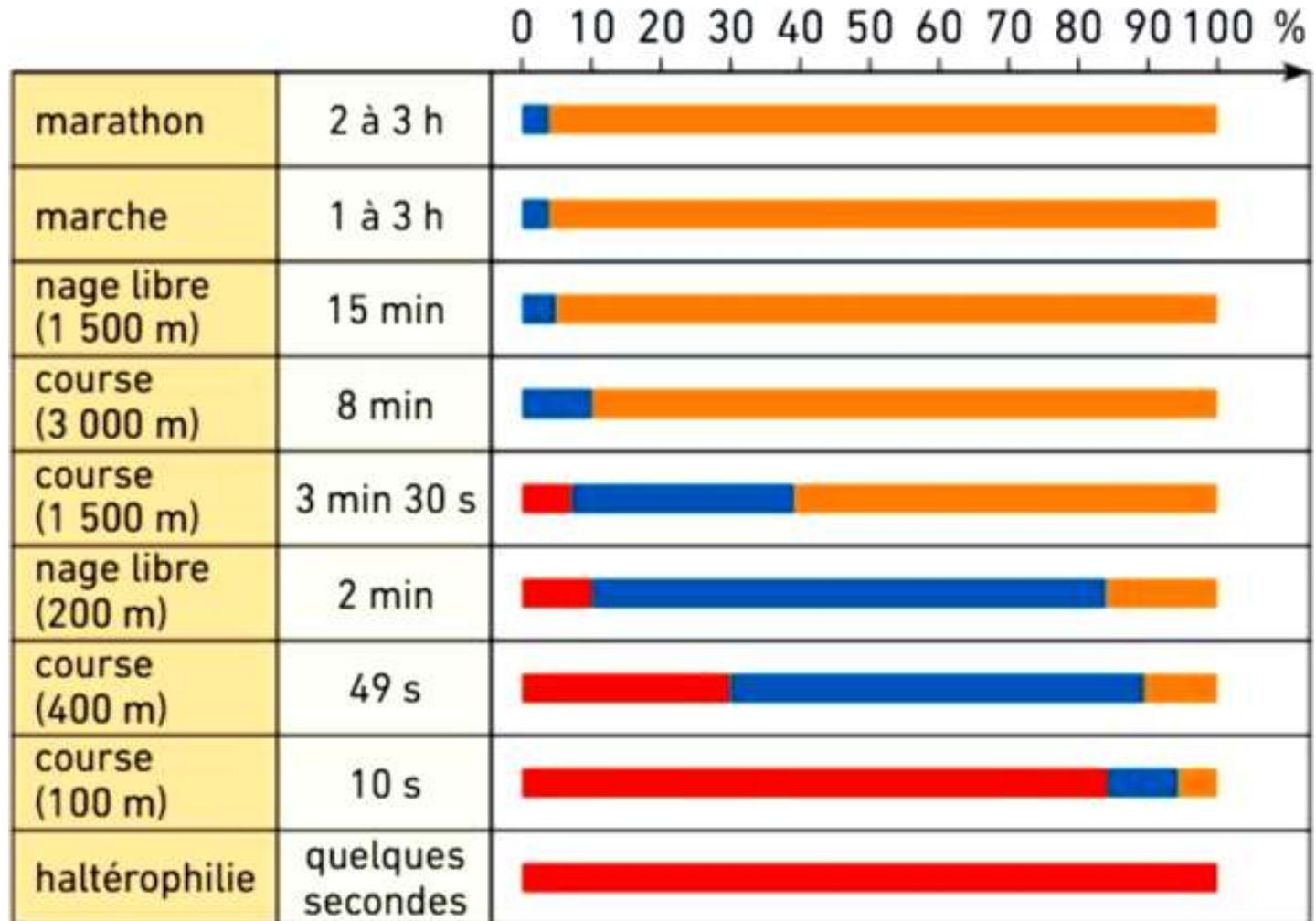
Types II impliquées dans les efforts intenses

action rapide, faible rendement, apport faible en O_2 et glucose, beaucoup de réserves. => indépendantes du cœur et des poumons.

Voies différentes selon les types de fibres



Voies différentes selon le type de sport



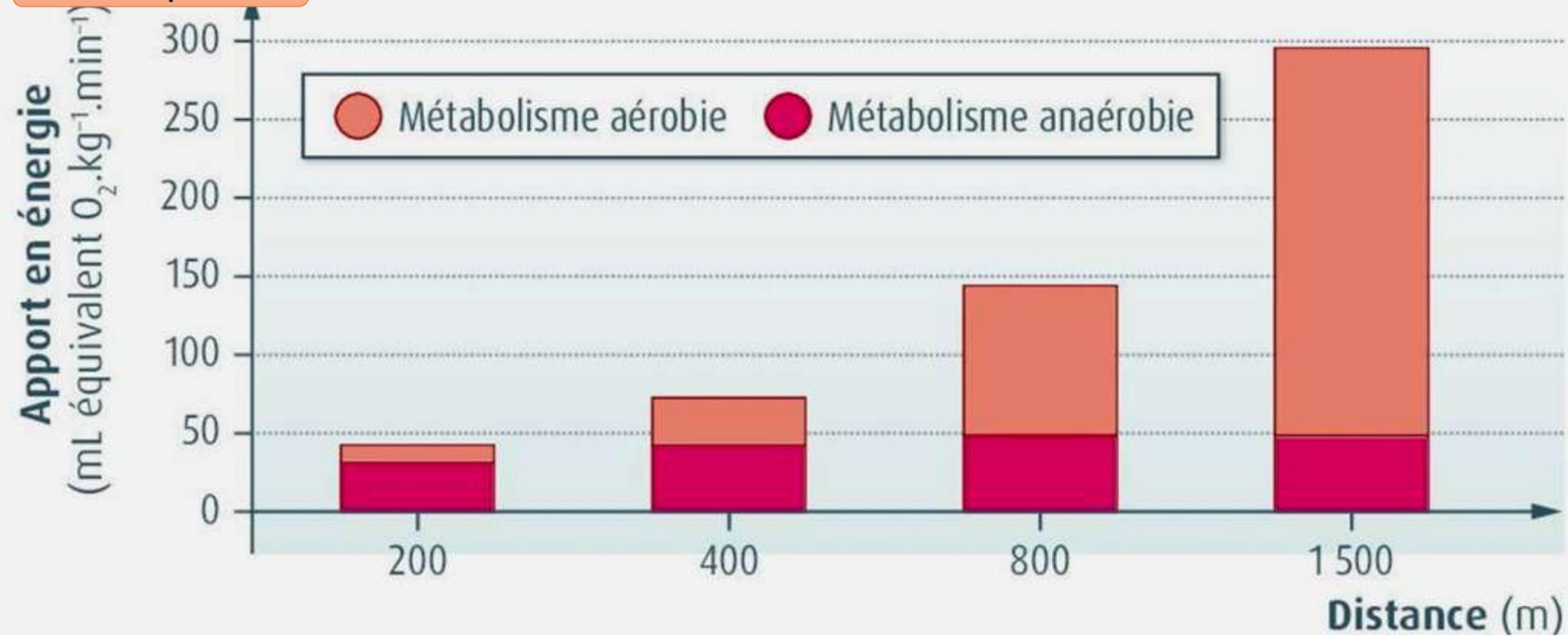
voie anaérobie de la phosphocréatine

métabolisme anaérobie
(fermentation lactique)

métabolisme aérobie
(respiration)

Type de métabolisme en fonction de la distance d'une course à pied

Doc 3 p 436



1. Dans le muscle, il existe deux catégories de fibres qui diffèrent selon le type de métabolisme
 - a. Les fibres musculaires de type I (fibres rouges) sont riches en mitochondries et réalisent le métabolisme aérobie
 - b. Les fibres de type II (fibres blanches), pauvres en mitochondries, réalisent la fermentation
2. Selon l'intensité et la durée de l'exercice, la fermentation lactique et la respiration prennent le relai, permettant le maintien du travail musculaire.

	Respiration	Fermentation lactique
Points communs	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'énergie • À partir de glucose • Par glycolyse 	Production d'énergie à partir de MO
Différences	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation d'O₂ • Libération de CO₂ • Production de 36 ATP par glucose 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de consommation d'O₂ • Libération d'acide lactique • Production de 2 ATP par glucose

Conditions différentes

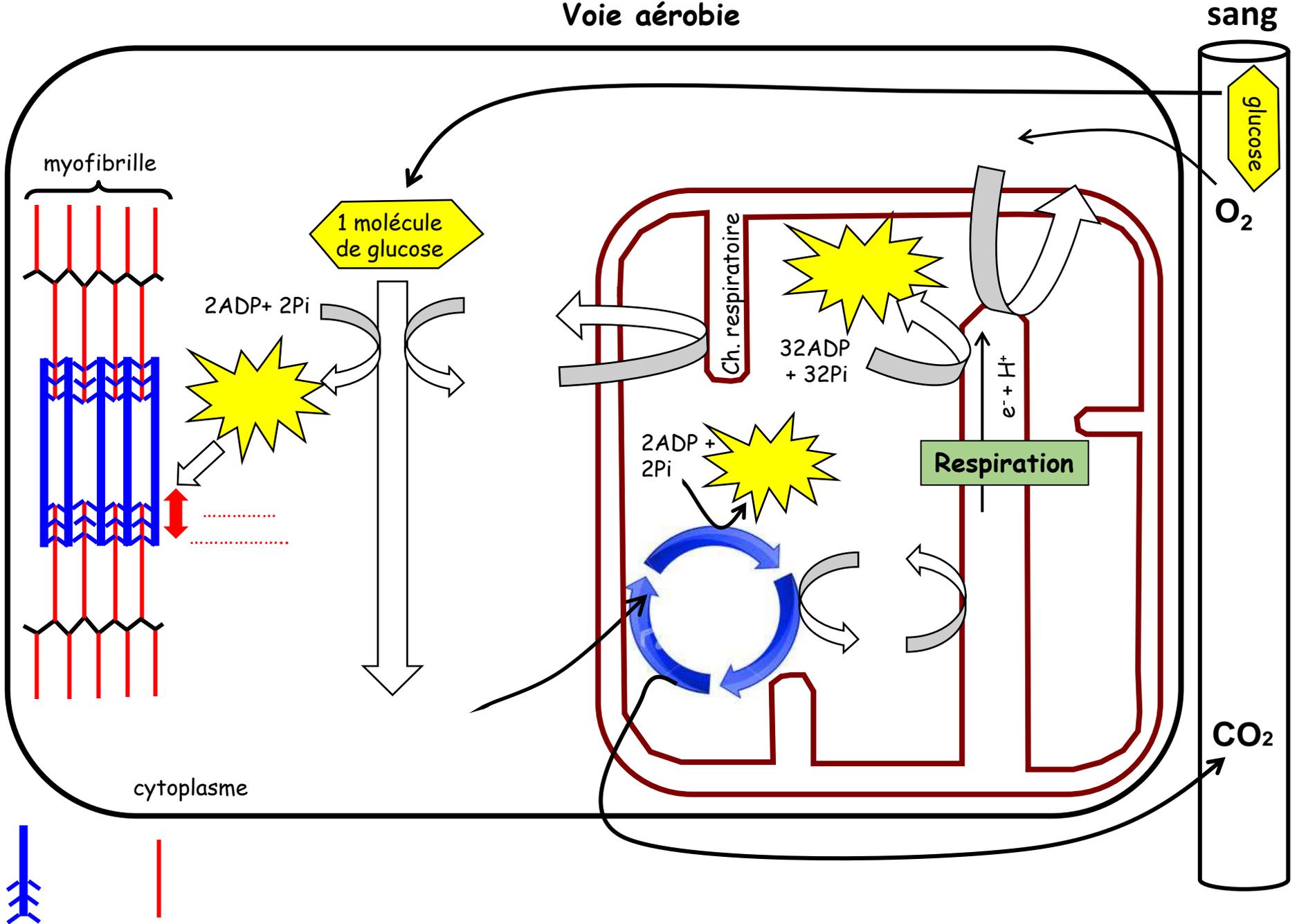
Rendements différents

Calcul des rendements énergétiques de la respiration et de la fermentation lactique

	Respiration	Glucose $C_6H_{12}O_6$	mentation lactique
Substrat	2 860 kJ par mole de glucose		
Énergie potentielle initiale	Aérobiose		Anaérobiose
Conditions	6 CO_2 + 6 H_2O		2 $C_3H_6O_3$
Produits	0 kJ		1 330 kJ \times 2 = 2 660 kJ
Énergie potentielle finale ATP	36 moles par mole de glucose		2 moles par mole de glucose
ATP produit			
Énergie chimique disponible produite (1 mole d'ATP fournit 50 kJ)	36 \times 50 = 1 800 kJ		2 \times 50 = 100 kJ
	$\frac{1\ 080}{2\ 860} \times 100 = 63\%$		$\frac{100}{2\ 860} \times 100 = 3,5\%$
Rendement énergétique			

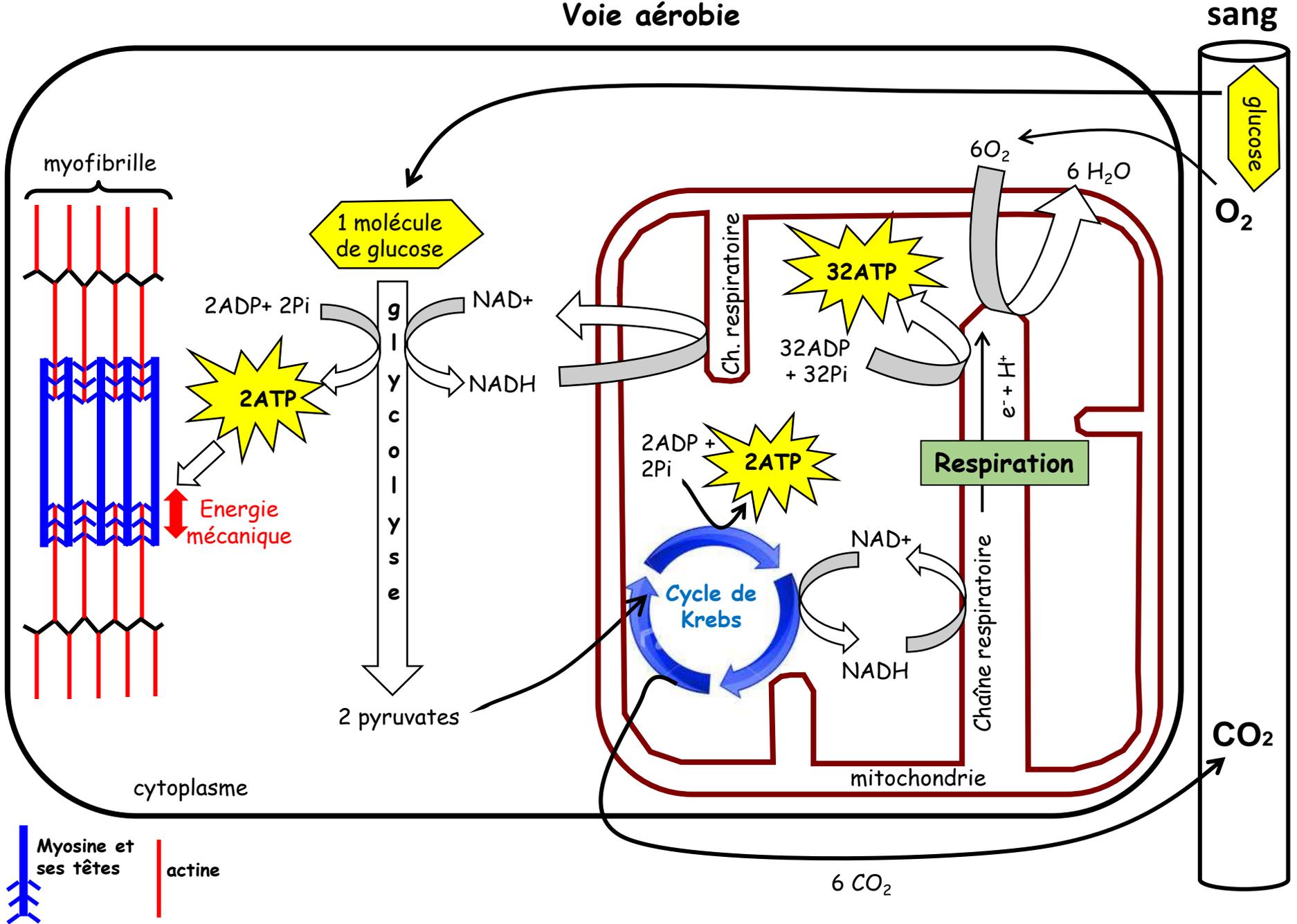
Origine de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire

Voie aérobie



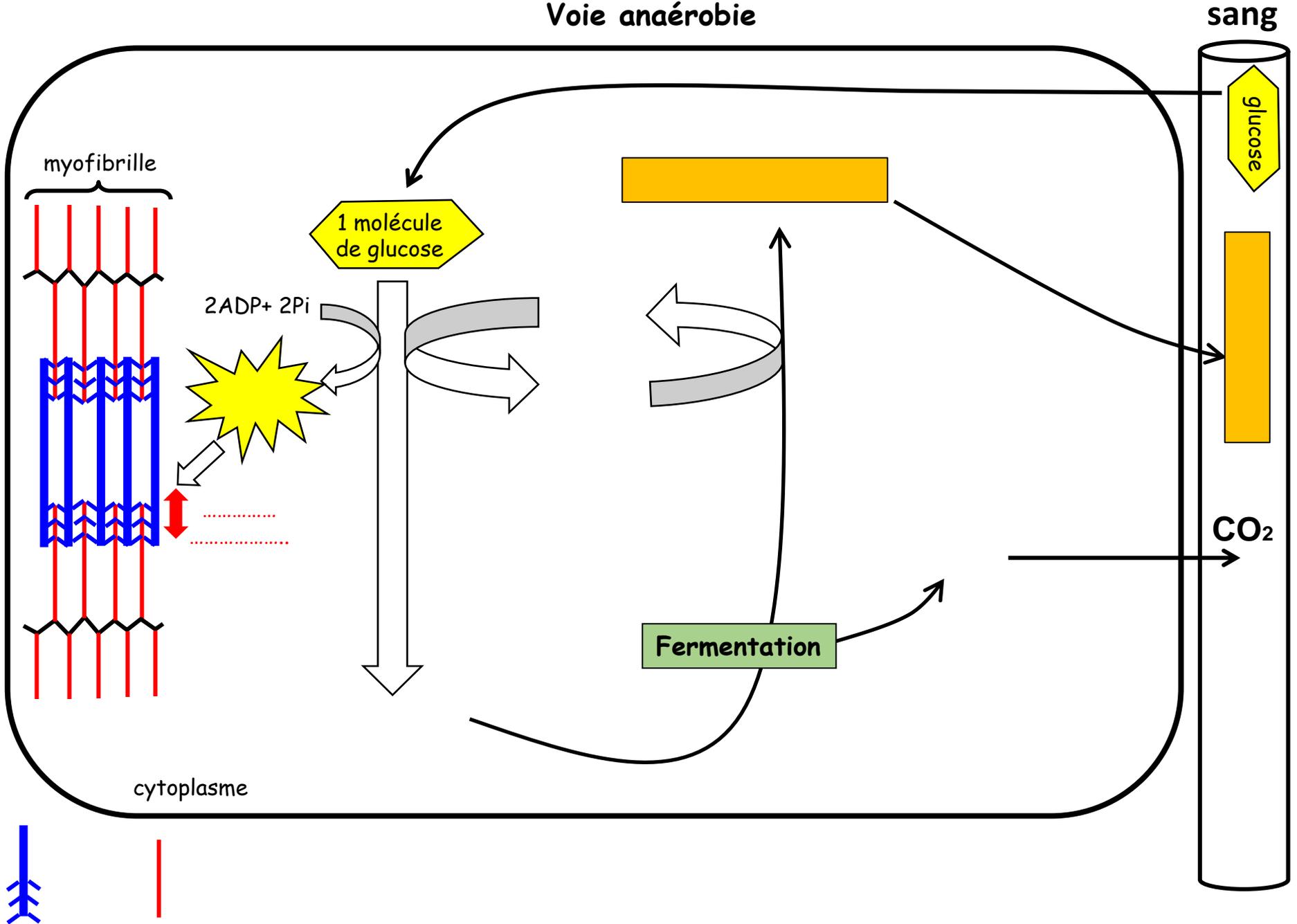
Origine de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire

Voie aérobie



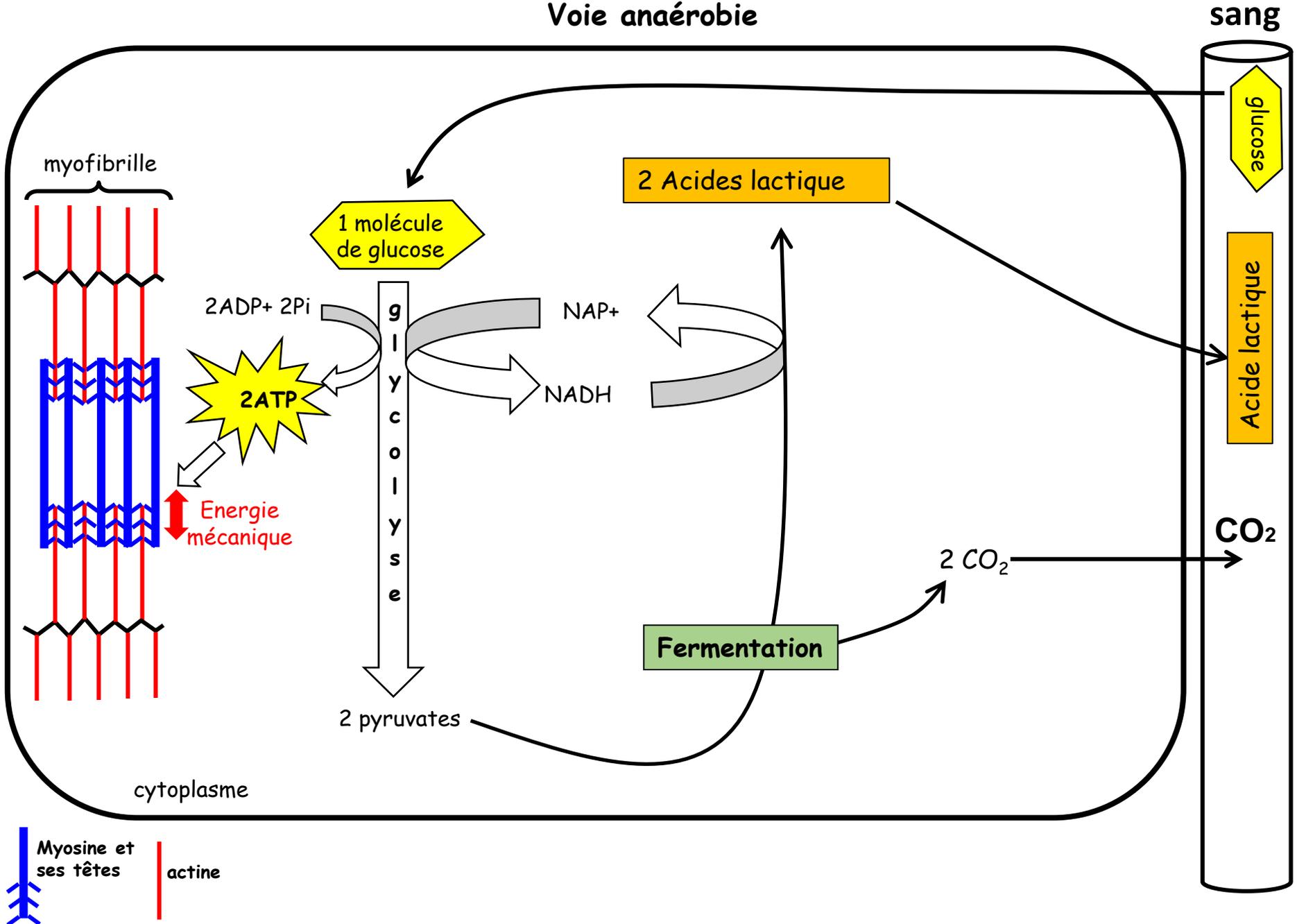
Origine de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire

Voie anaérobie

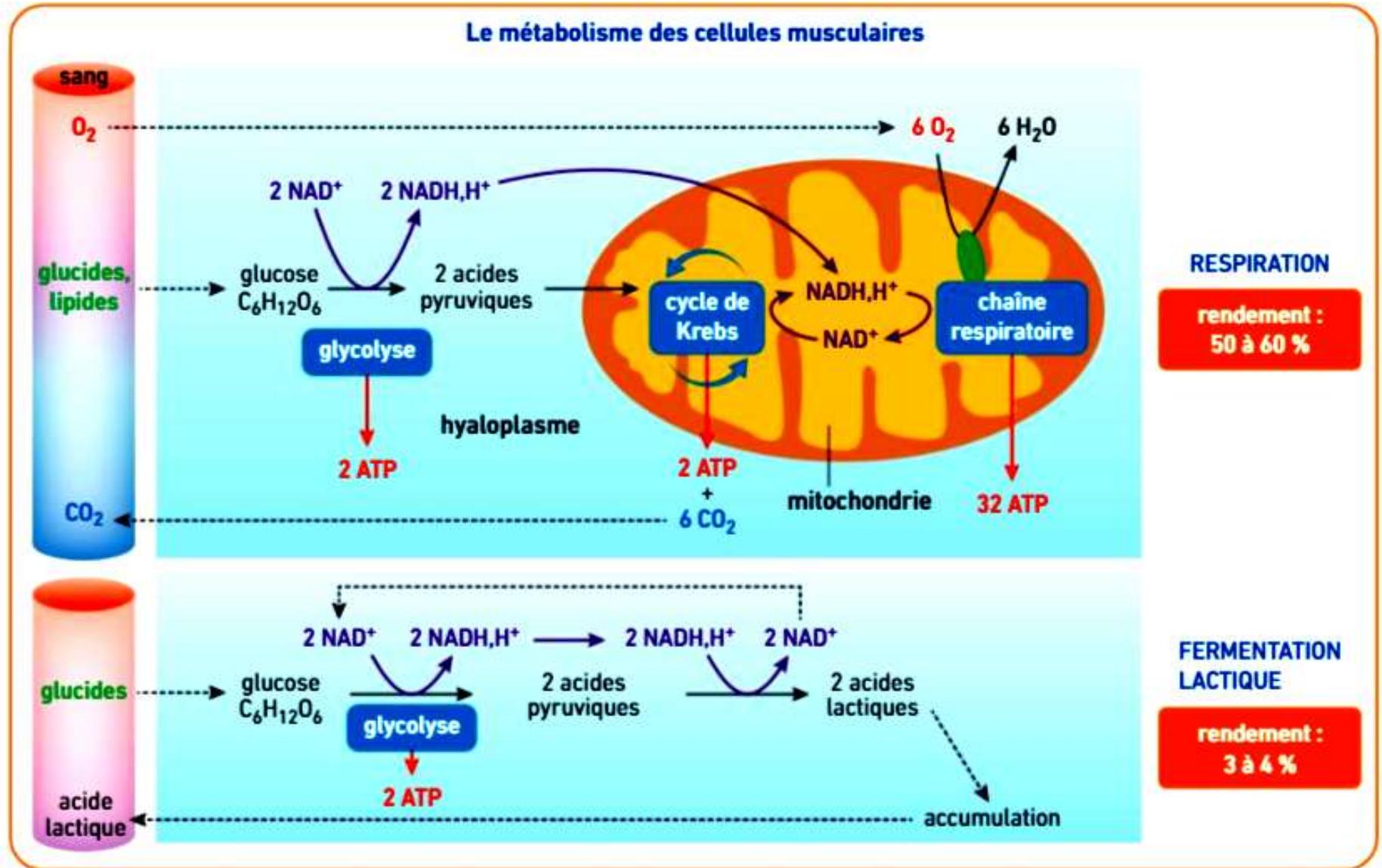


Origine de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire

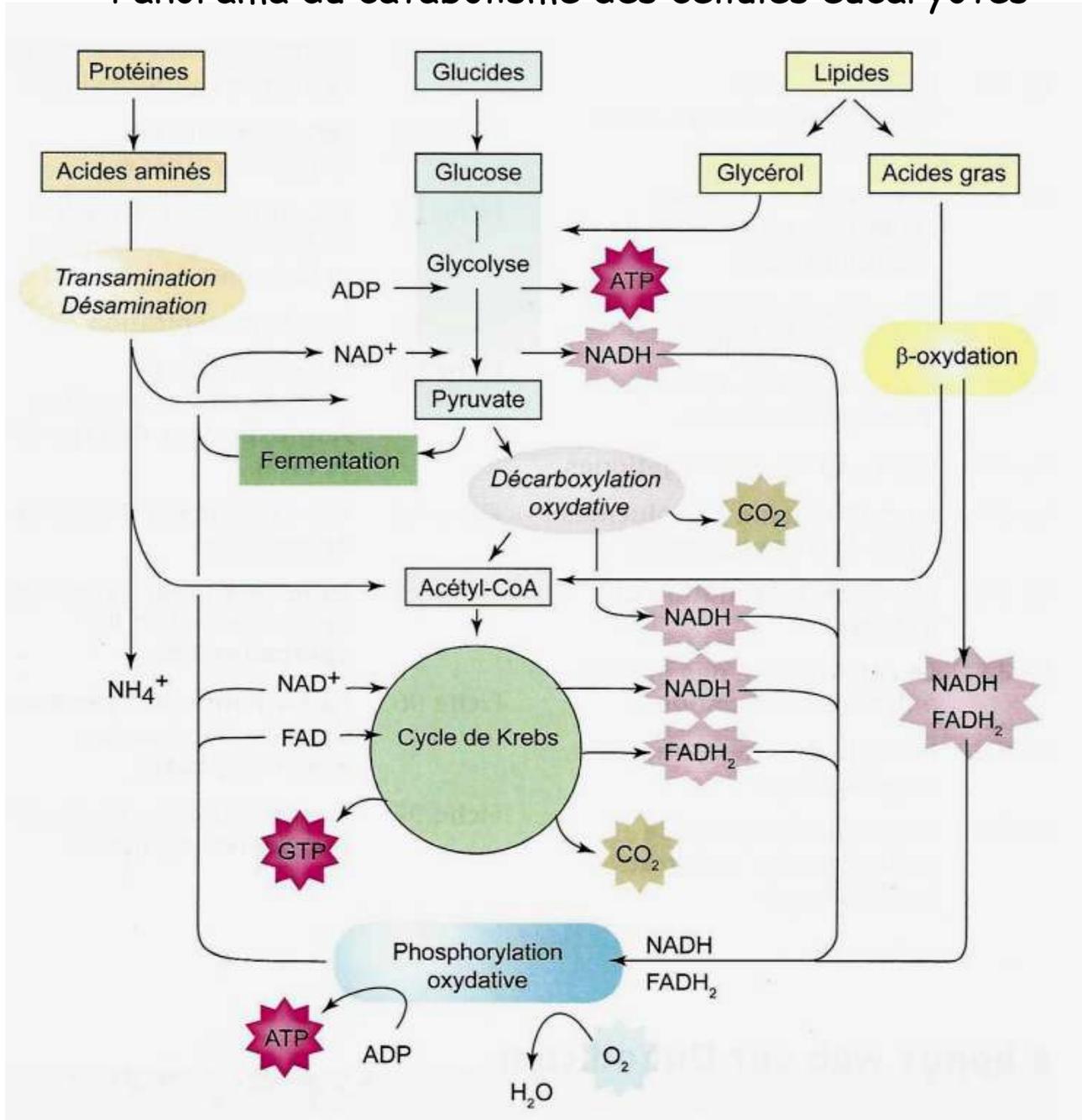
Voie anaérobie



La respiration et la fermentation lactique sont les deux moyens utilisés par les muscles pour obtenir de l'ATP.



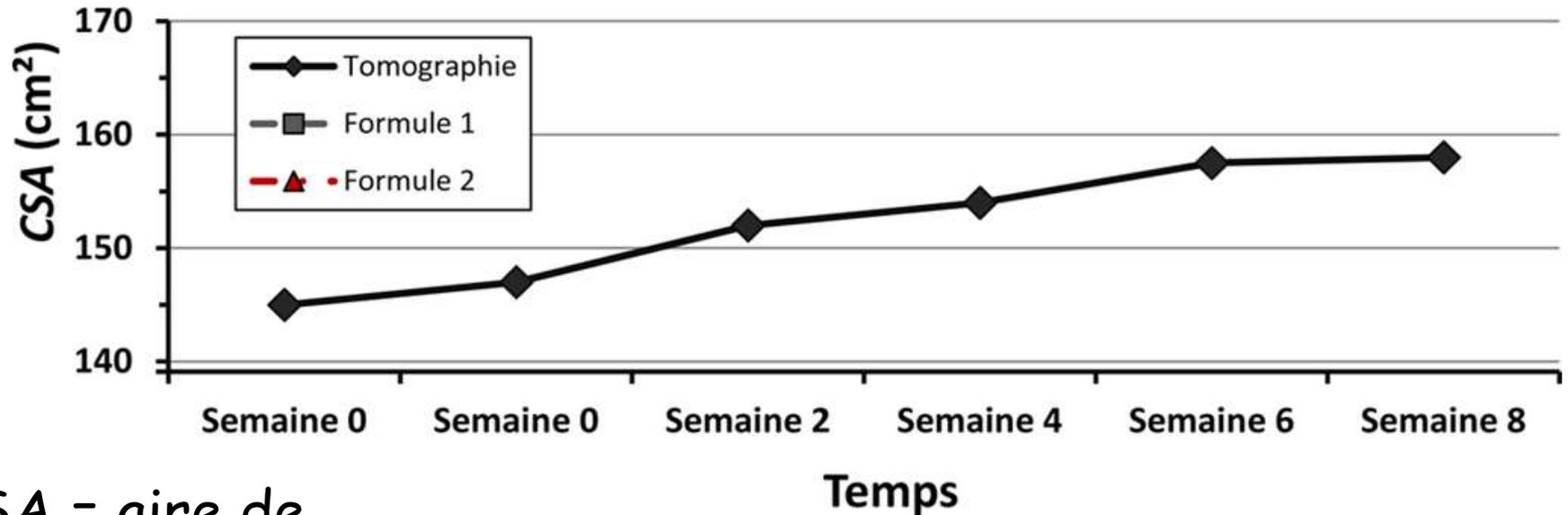
Panorama du catabolisme des cellules eucaryotes



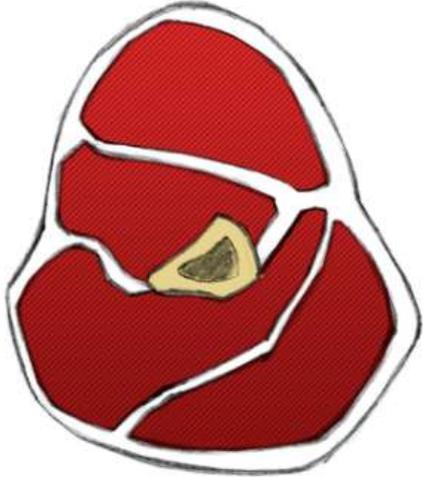
V - Des substances exogènes (produits dopants) peuvent améliorer artificiellement la performance sportive, avec parfois des effets graves pour la santé. Leur usage est interdit.



Adaptabilité des muscles aux pratiques sportives



CSA = aire de section musculaire

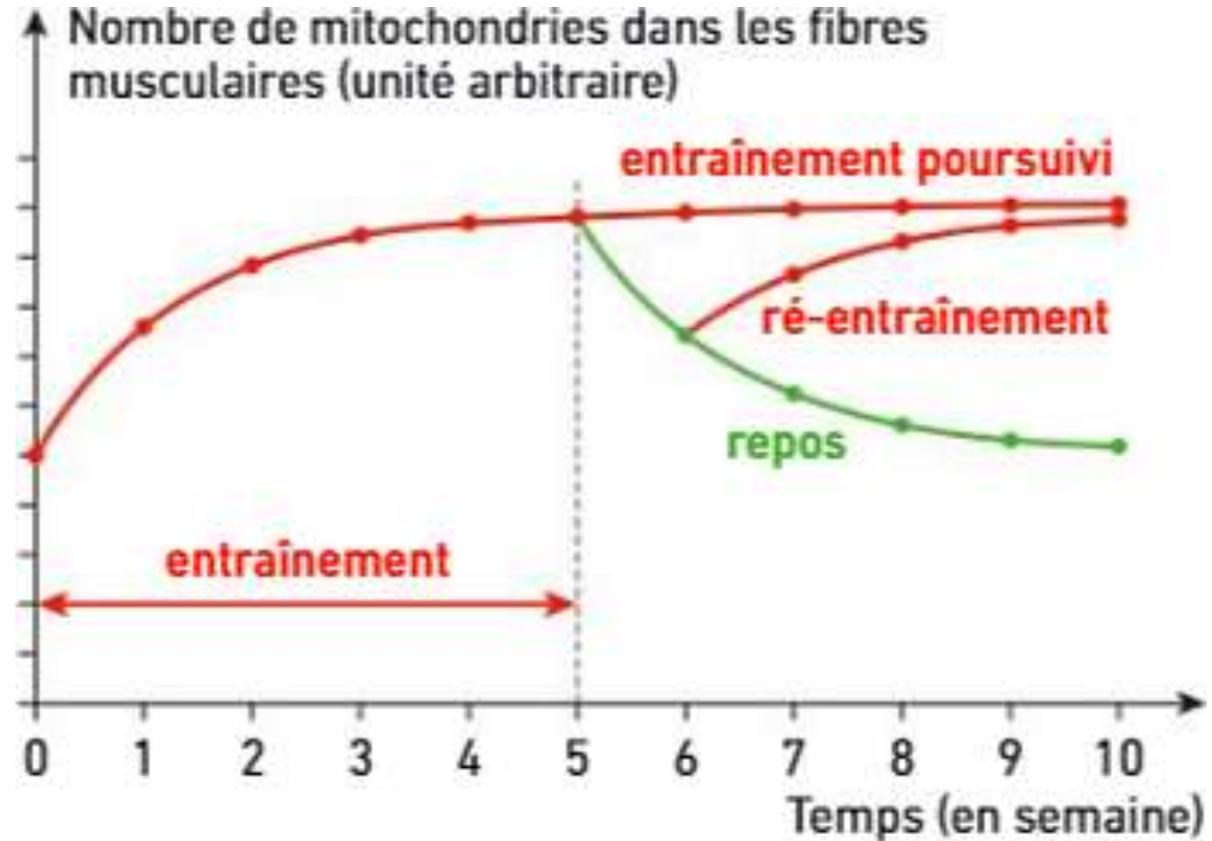


- mesure CSA fonc° durée effort
- CSA \nearrow avec durée effort
- les muscles s'épaississent lorsqu'on les utilise.
- **Remarque** : augmentation synthèse actine et myosine (protéines)

Adaptabilité des muscles aux pratiques sportives

Dosages effectués lors d'un stage d'endurance

Remarque : les mitochondries sont d'anciennes bactéries => elles peuvent se multiplier.

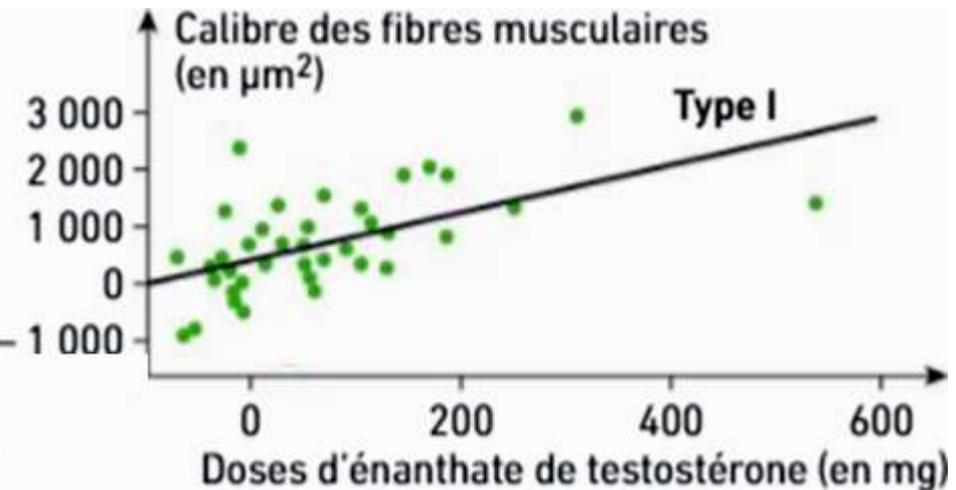
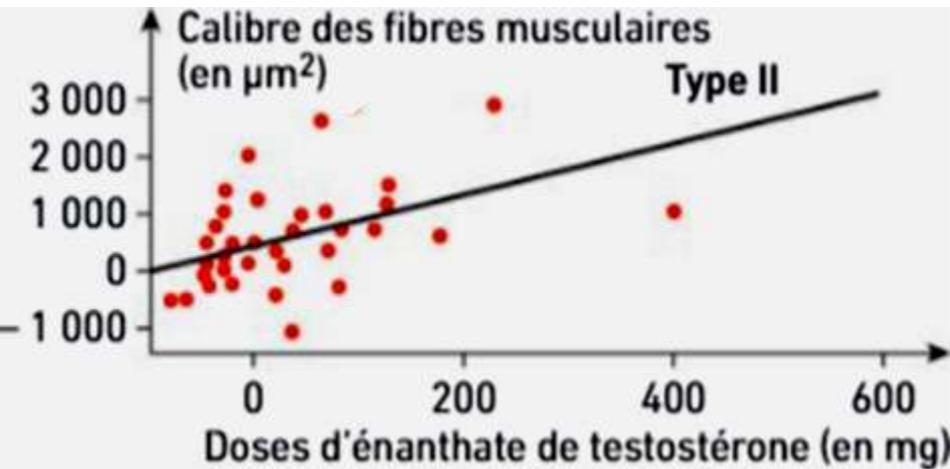
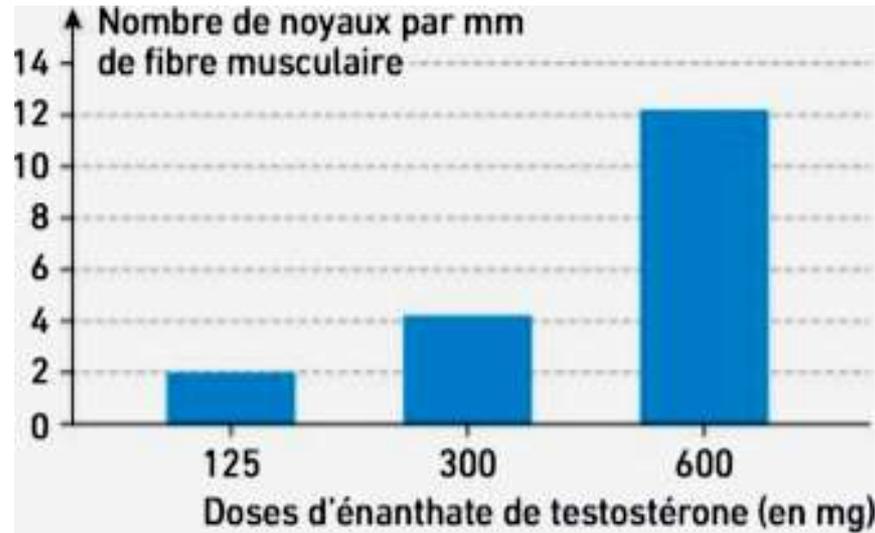


- mesure nombre mitochondries dans fibres musculaires au cours du temps

→ nb mito \nearrow avec durée entraînement puis stagne ; nb mito ne \searrow que si arrêt entraînement.

→ les muscles multiplient leurs mito lorsqu'on les utilise.

Les effets du dopage



Les effets du dopage

Quelques effets secondaires des anabolisants:

- Hypertension artérielle
- Accidents cardiaques
- Fragilité musculaire et tendineuse
- Atrophie testiculaire et infertilité
- Lésions du foie
- Voix plus grave (chez la femme)
- Acné
- Problèmes neurologiques
- Maladies reinales
- Agressivité



1. L'usage de produits dopants peut améliorer la performance sportive en augmentant la masse musculaire ou en stimulant le métabolisme énergétique de la cellule musculaire.
2. Cependant, de nombreux effets secondaires mettent en danger l'individu, pouvant conduire à la mort.

- a. Effets néfastes à court terme : lésions musculaires et tendineuses...etc.
- b. Effets néfastes à long terme : cancers, stérilité...