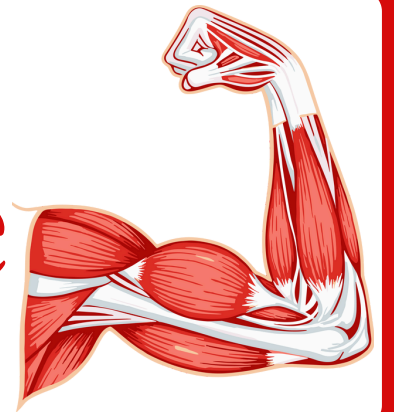




La contraction musculaire



Problématiques générales : Comment une fibre musculaire peut-elle se contracter ?

Par quelles voies métaboliques la fibre musculaire produit l'ATP nécessaire à sa contraction ?

I. L'organisation structurale du muscle squelettique

A) Le muscle, un organe contractile

B) La fibre musculaire, une cellule spécialisée dans la contraction

II. Le mécanisme de la contraction musculaire

A) La contraction musculaire à l'échelle cellulaire et moléculaire

B) Les myopathies, une dégénérescence des cellules musculaires

III. L'origine de l'ATP lors de la contraction musculaire

A) La respiration cellulaire (voie aérobie)

B) La fermentation lactique (voie anaérobie)

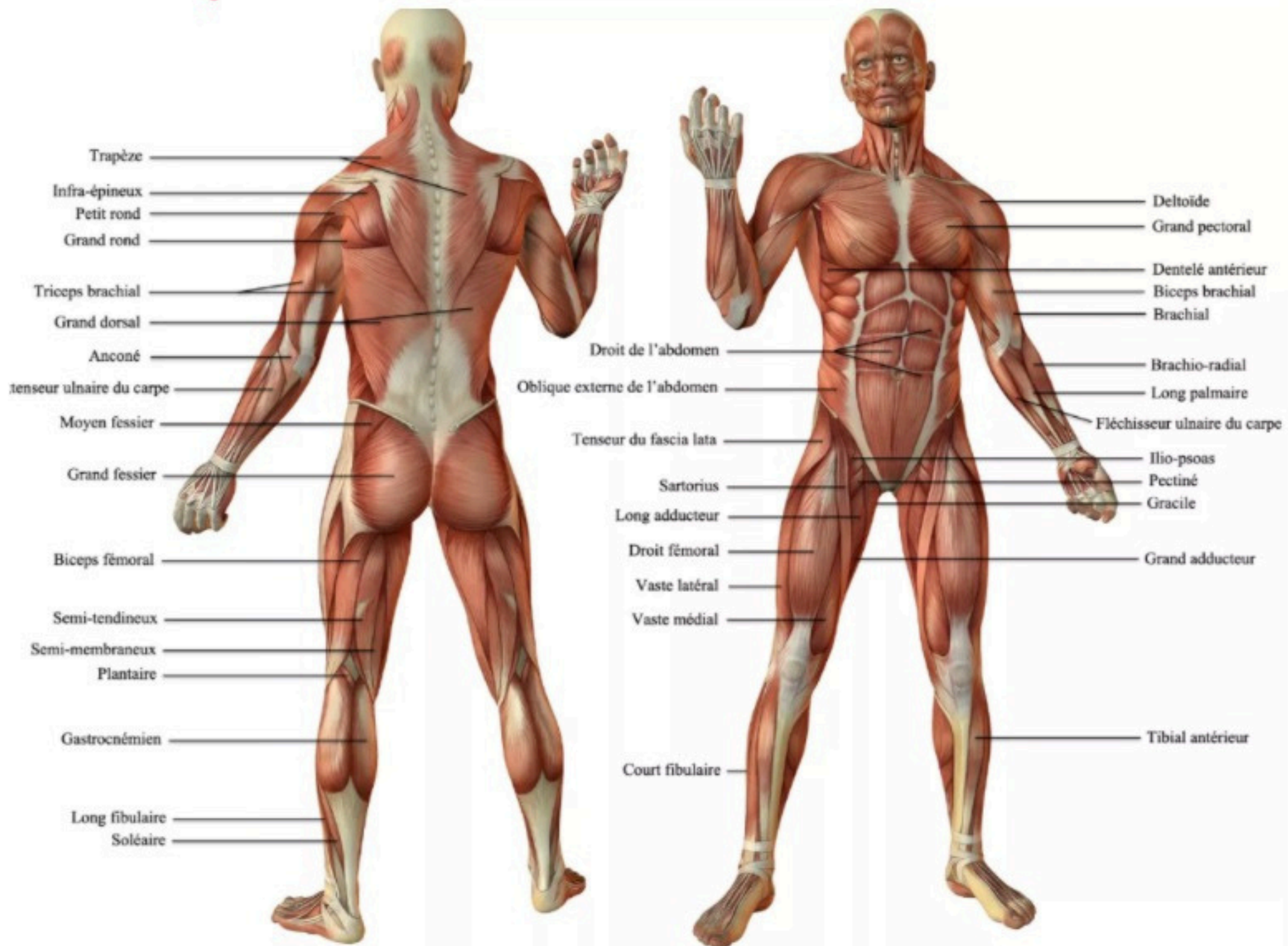
C) L'adaptabilité du muscle squelettique aux pratiques sportives



I. L'organisation structurale du muscle squelettique

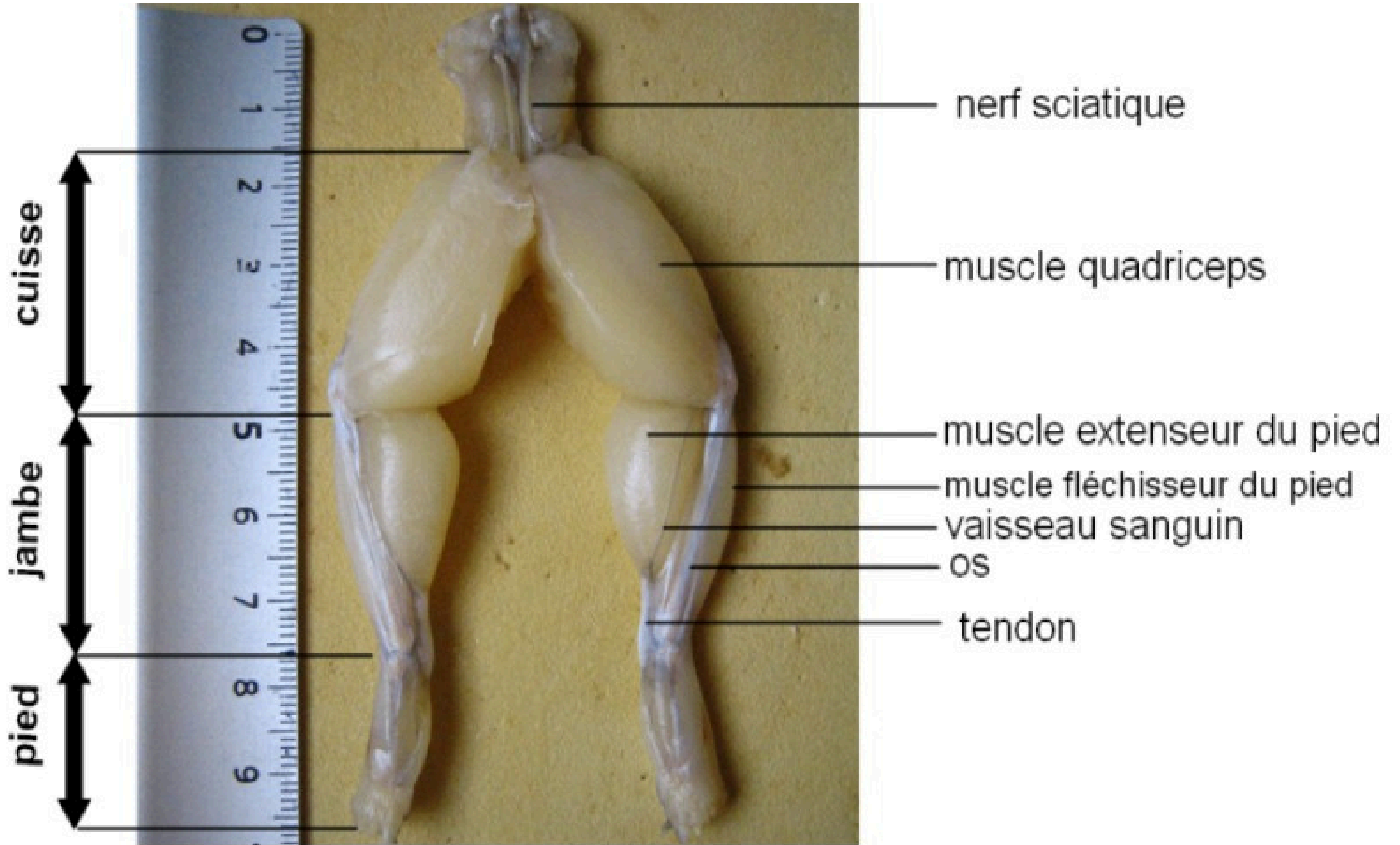
→ A) Le muscle, un organe contractile

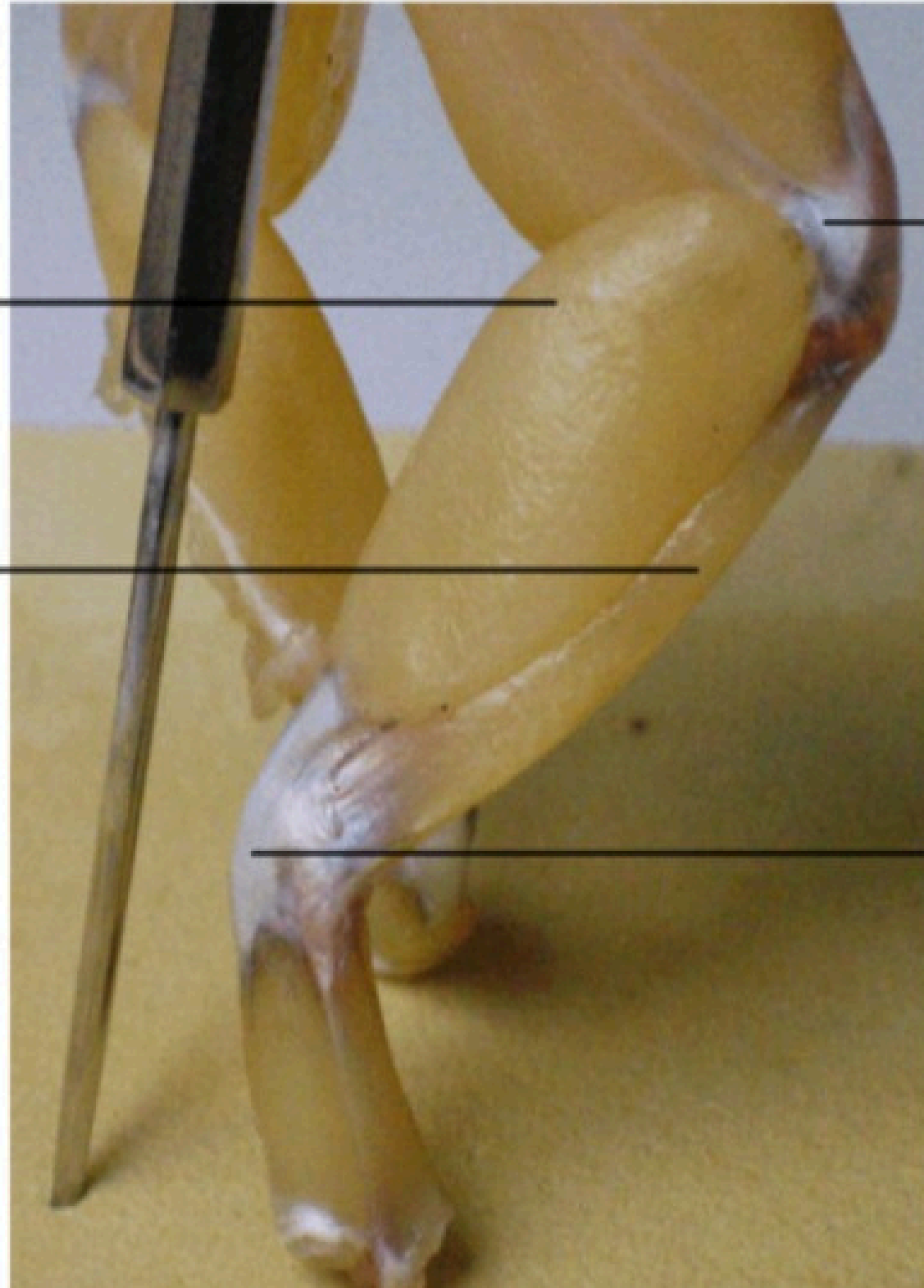




- Trapèze
- Infra-épineux
- Petit rond
- Grand rond
- Triceps brachial
- Grand dorsal
- Anconé
- tenseur ulnaire du carpe
- Moyen fessier
- Grand fessier
- Biceps fémoral
- Semi-tendineux
- Semi-membraneux
- Plantaire
- Gastrocnémien
- Long fibulaire
- Soléaire

- Deltoïde
- Grand pectoral
- Dentelé antérieur
- Biceps brachial
- Brachial
- Brachio-radial
- Long palmaire
- Fléchisseur ulnaire du carpe
- Ilio-psoas
- Pectiné
- Gracile
- Grand adducteur
- Tibial antérieur
- Droit de l'abdomen
- Oblique externe de l'abdomen
- Tenseur du fascia lata
- Sartorius
- Long adducteur
- Droit fémoral
- Vaste latéral
- Vaste médial
- Court fibulaire



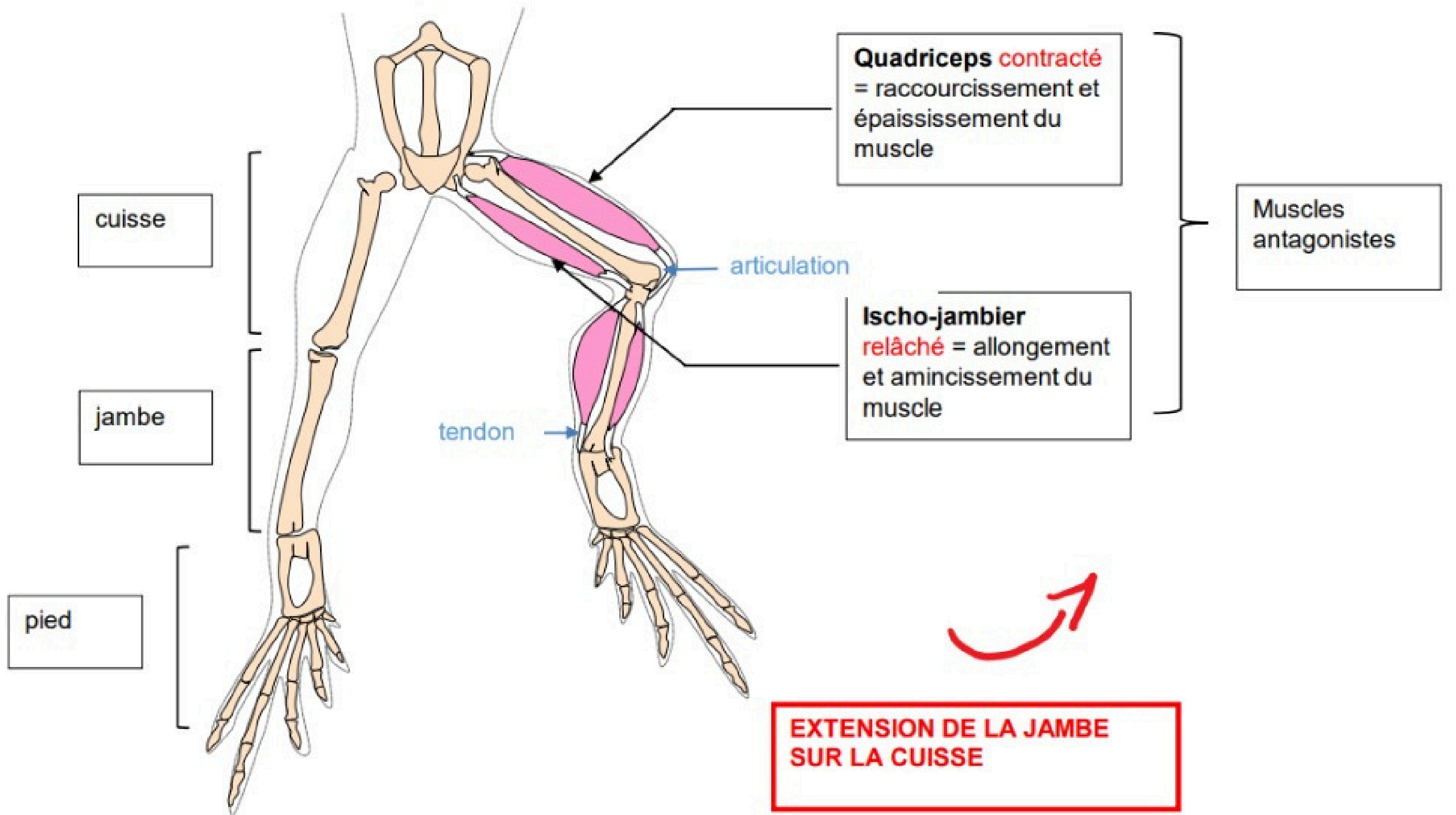


muscle extenseur du pied

muscle fléchisseur du pied

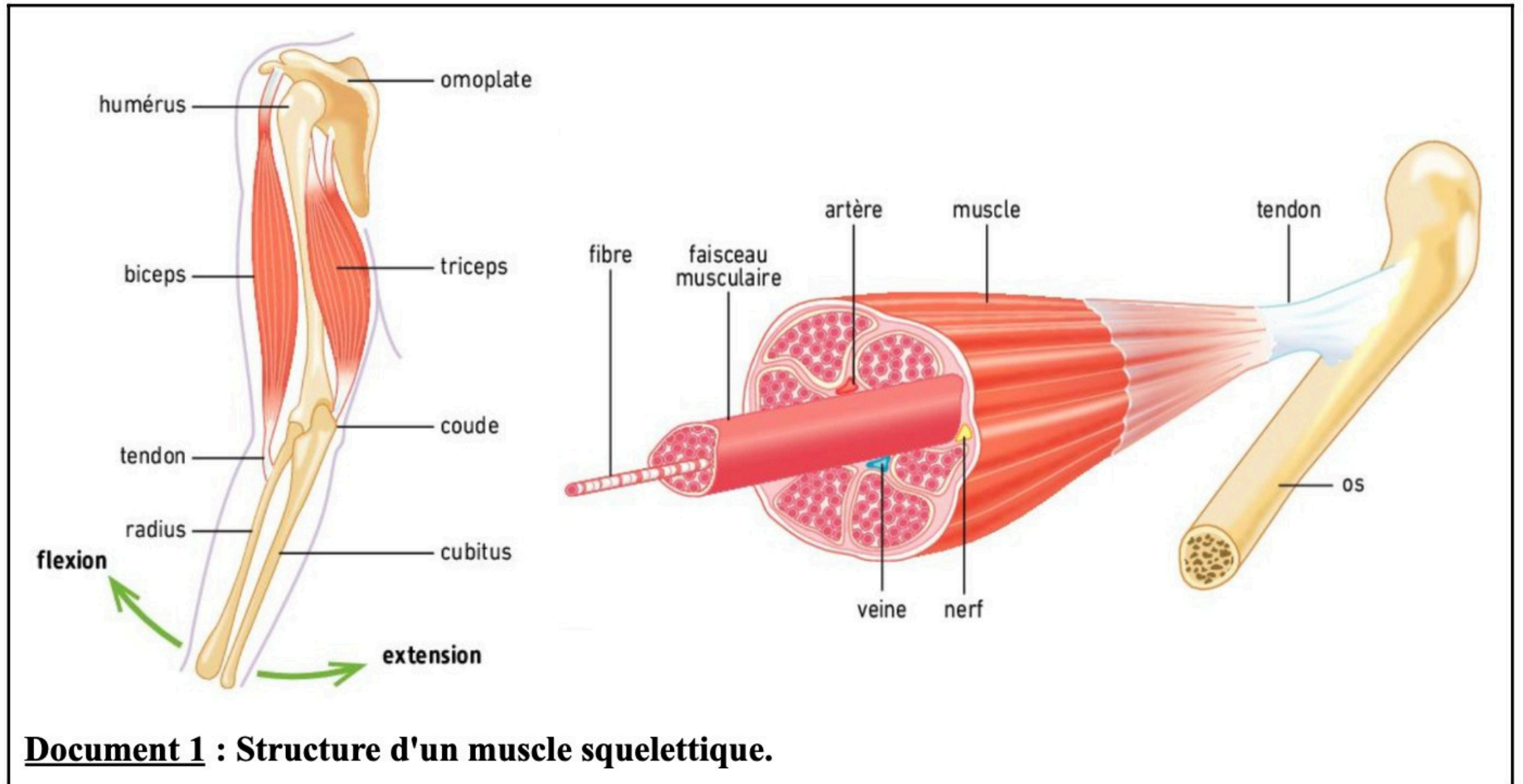
tendon du muscle
extenseur du pied
lié à l'os de la
jambe

tendon du muscle
extenseur du pied
lié à l'os du pied





ARGUMENT : Organisation fonctionnelle des éléments musculo-articulaires



Document 1 : Structure d'un muscle squelettique.

I. L'organisation structurale du muscle squelettique

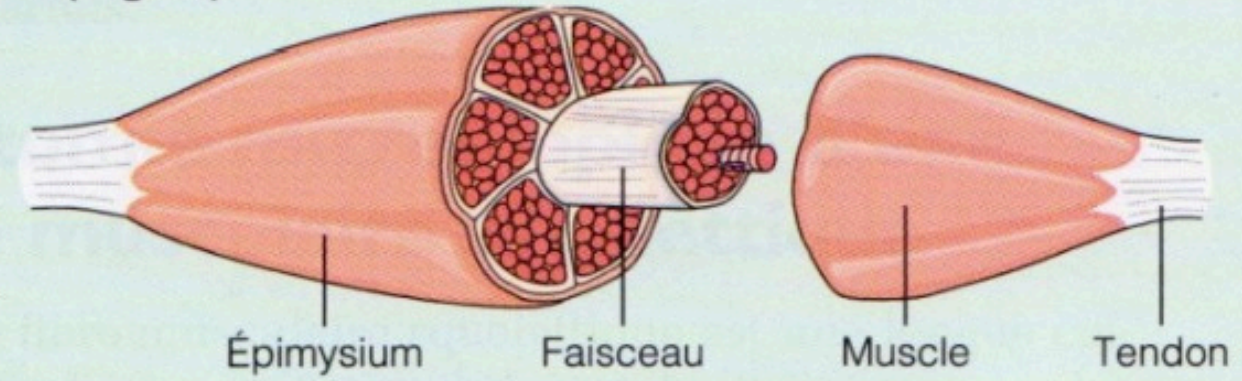
A) Le muscle, un organe contractile

→ B) La fibre musculaire, une cellule

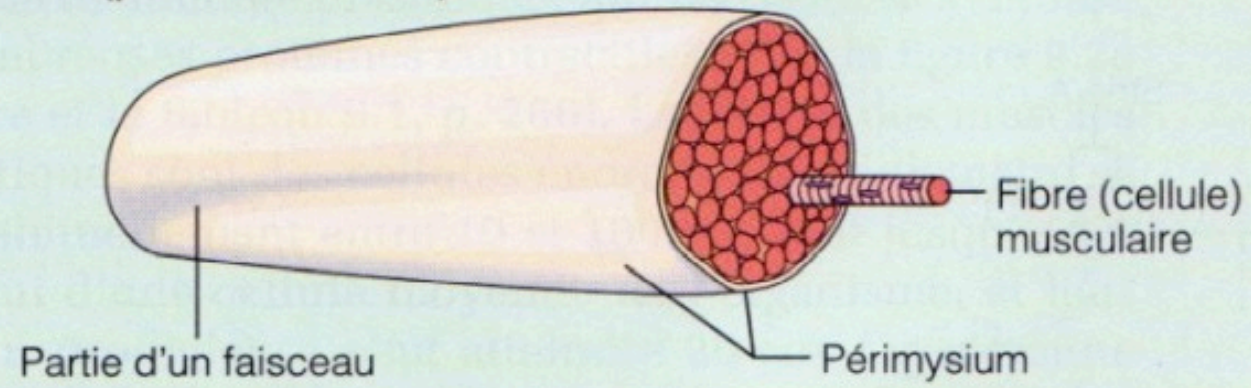
spécialisée dans la contraction



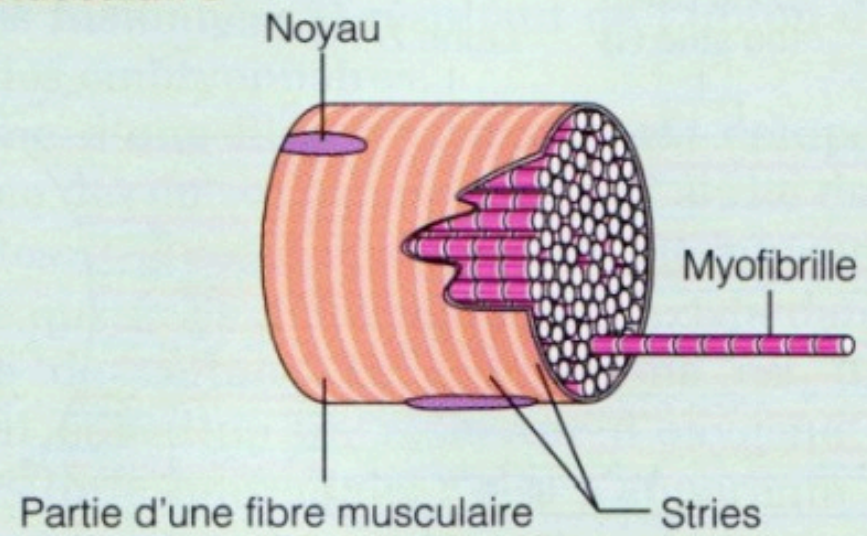
Muscle (organe)

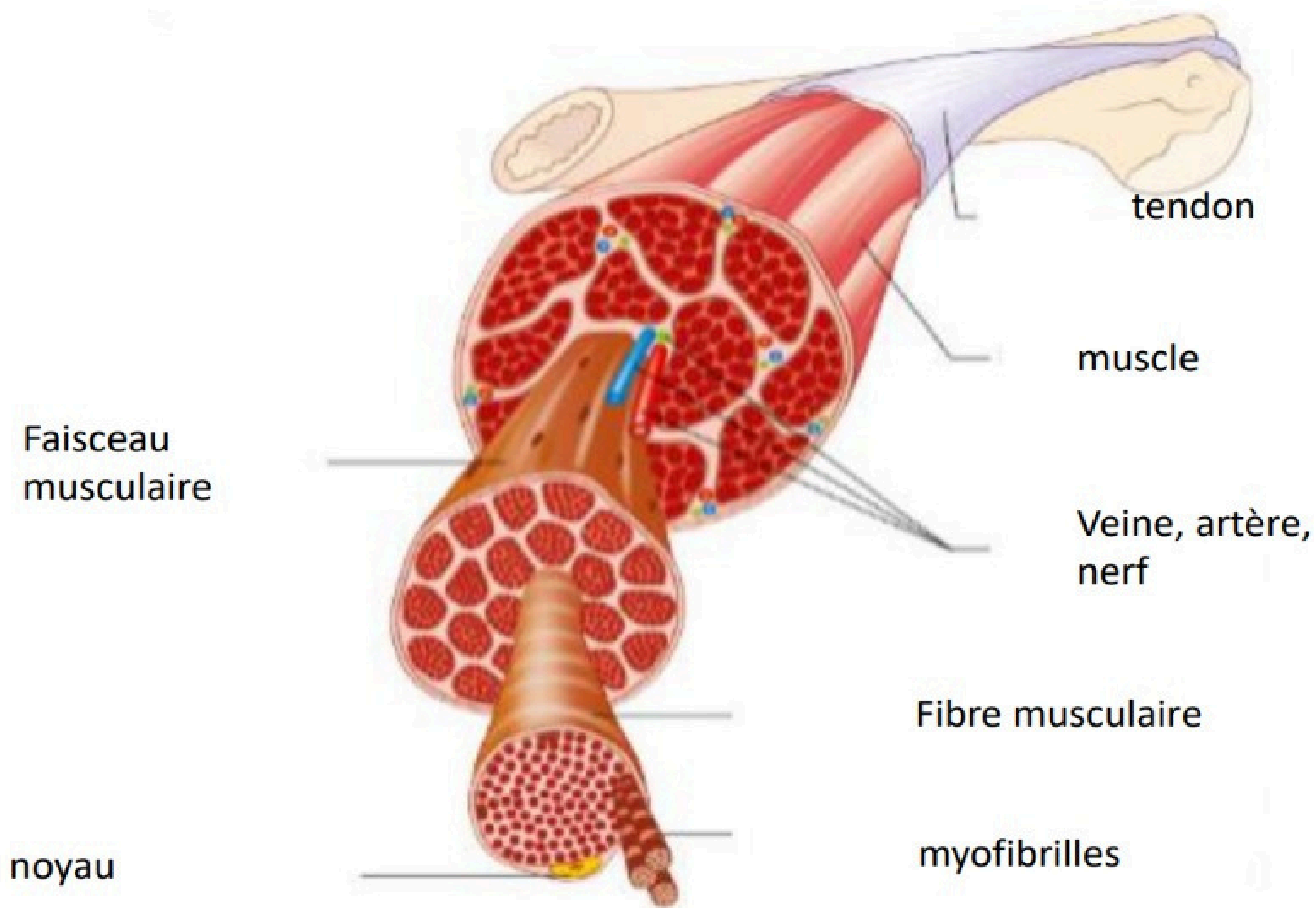


Faisceau (partie du muscle)



Fibre (cellule) musculaire





tendon

muscle

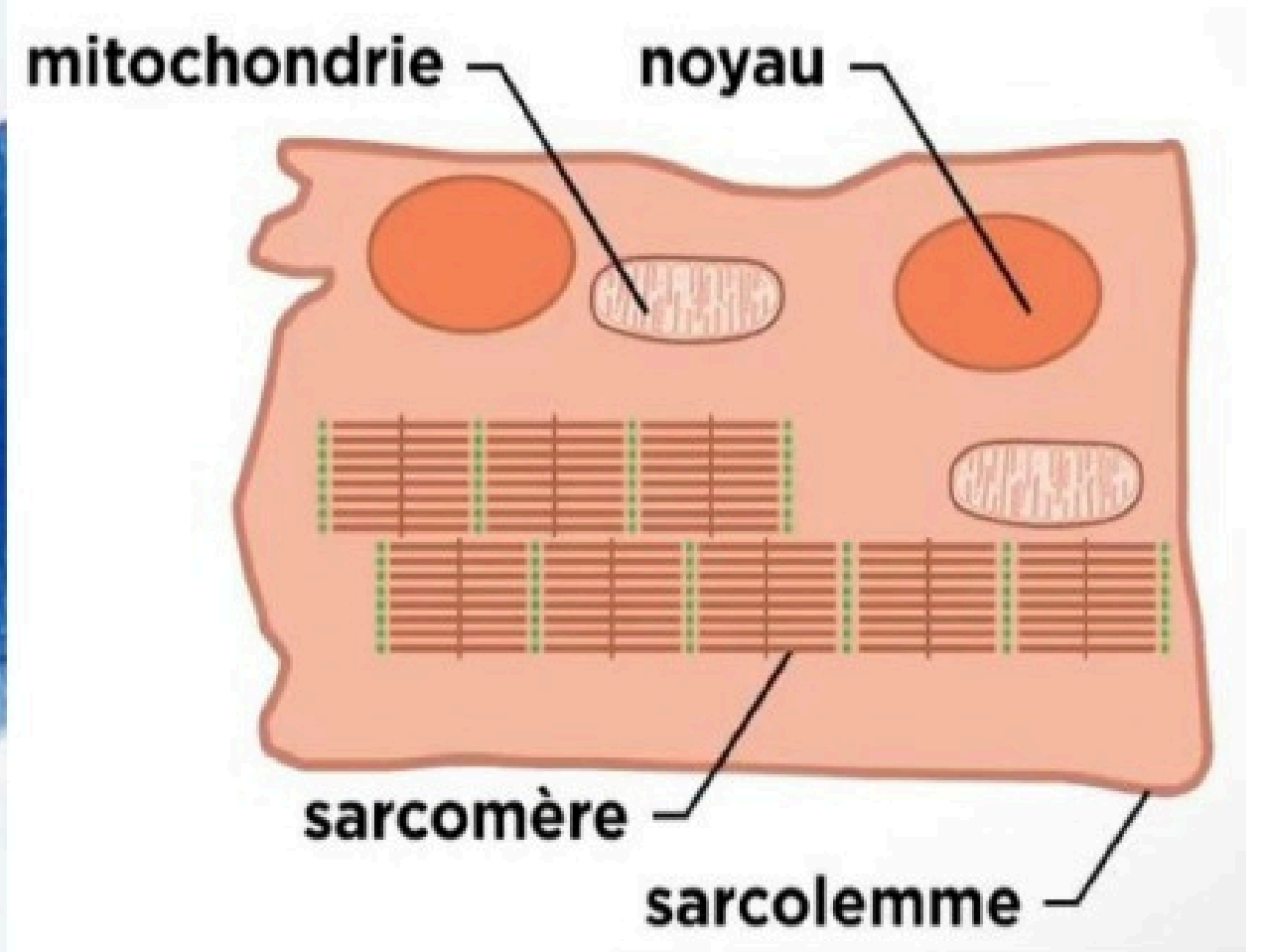
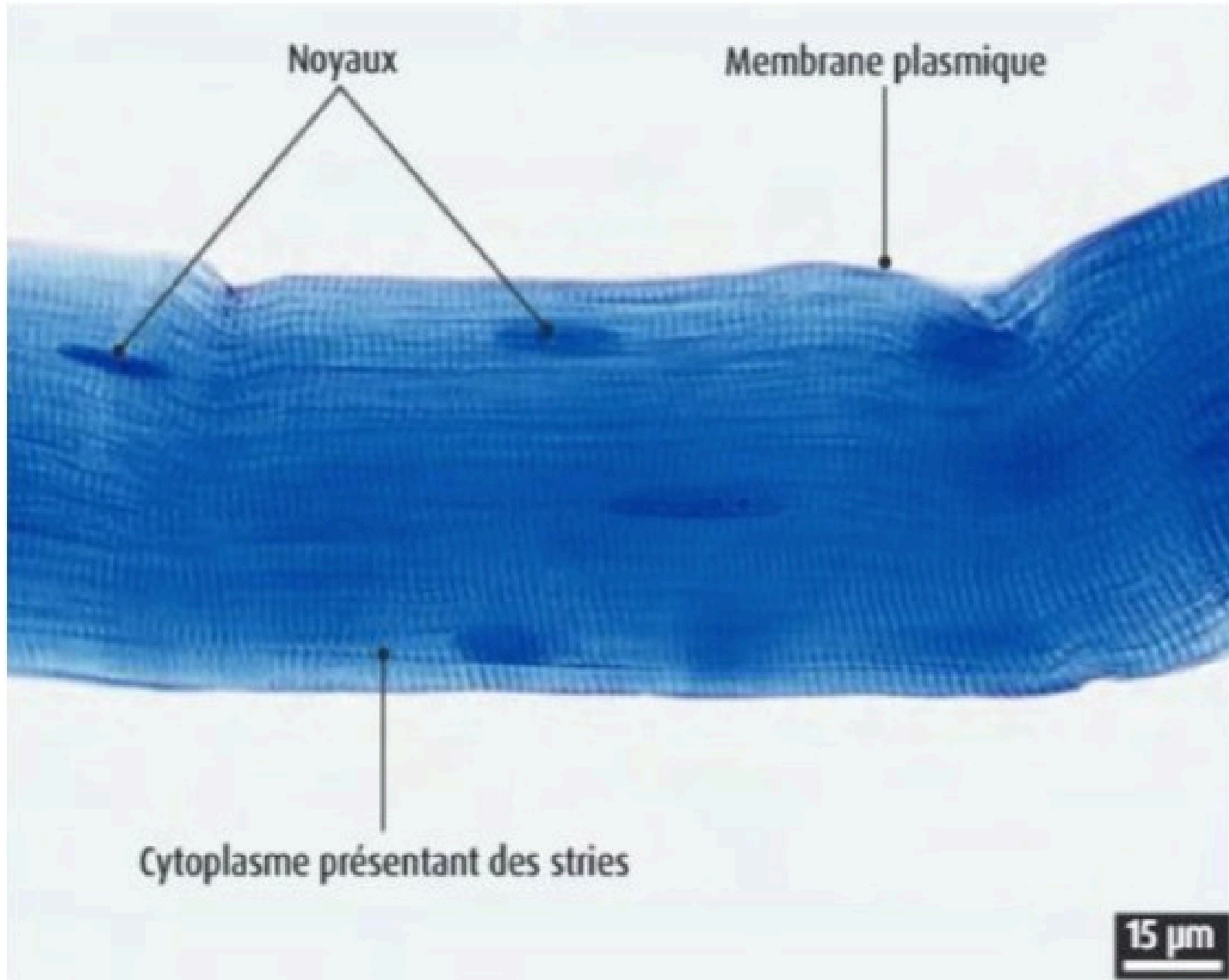
Veine, artère,
nerf

Fibre musculaire

myofibrilles

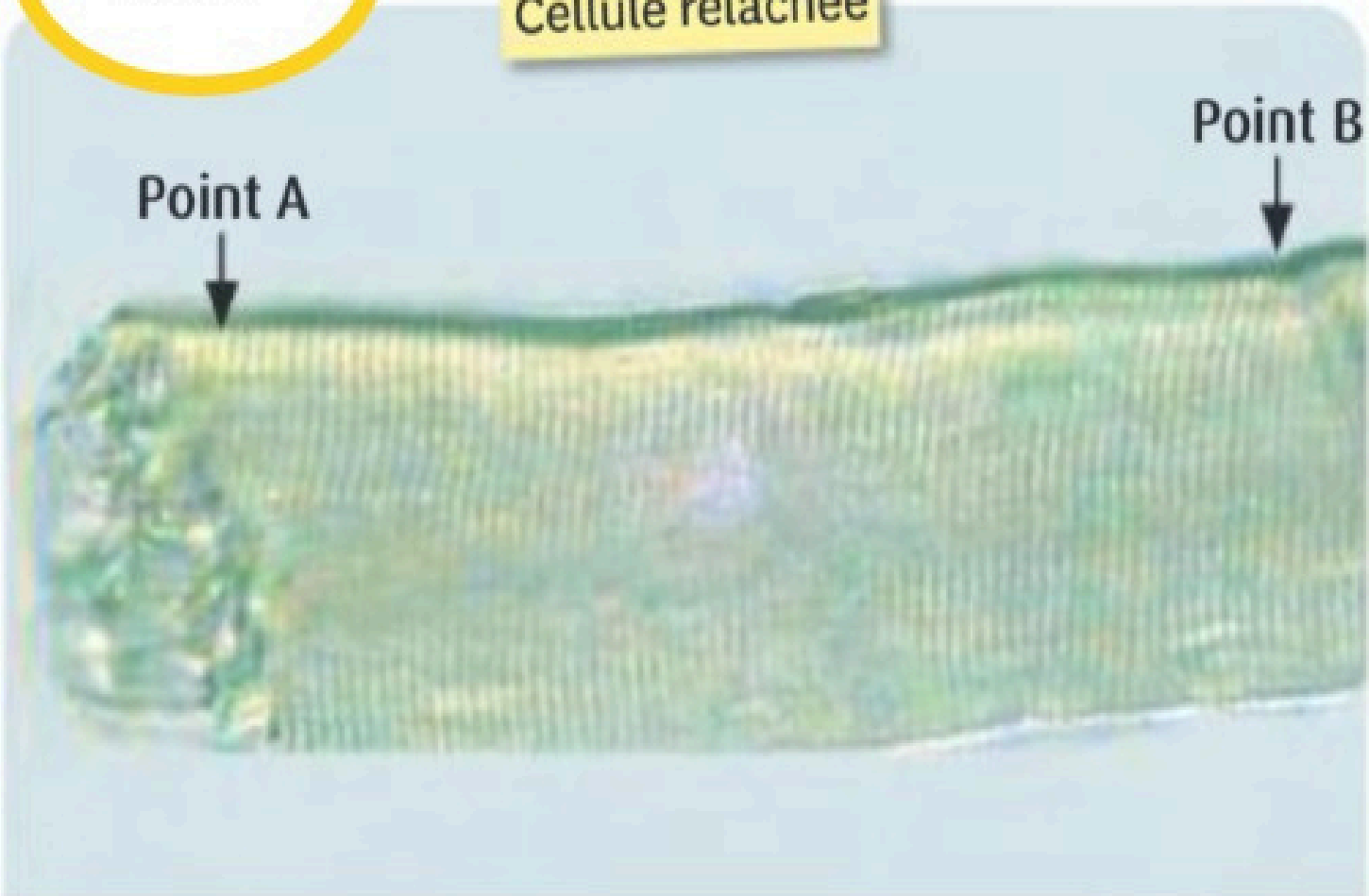
Faisceau
musculaire

noyau

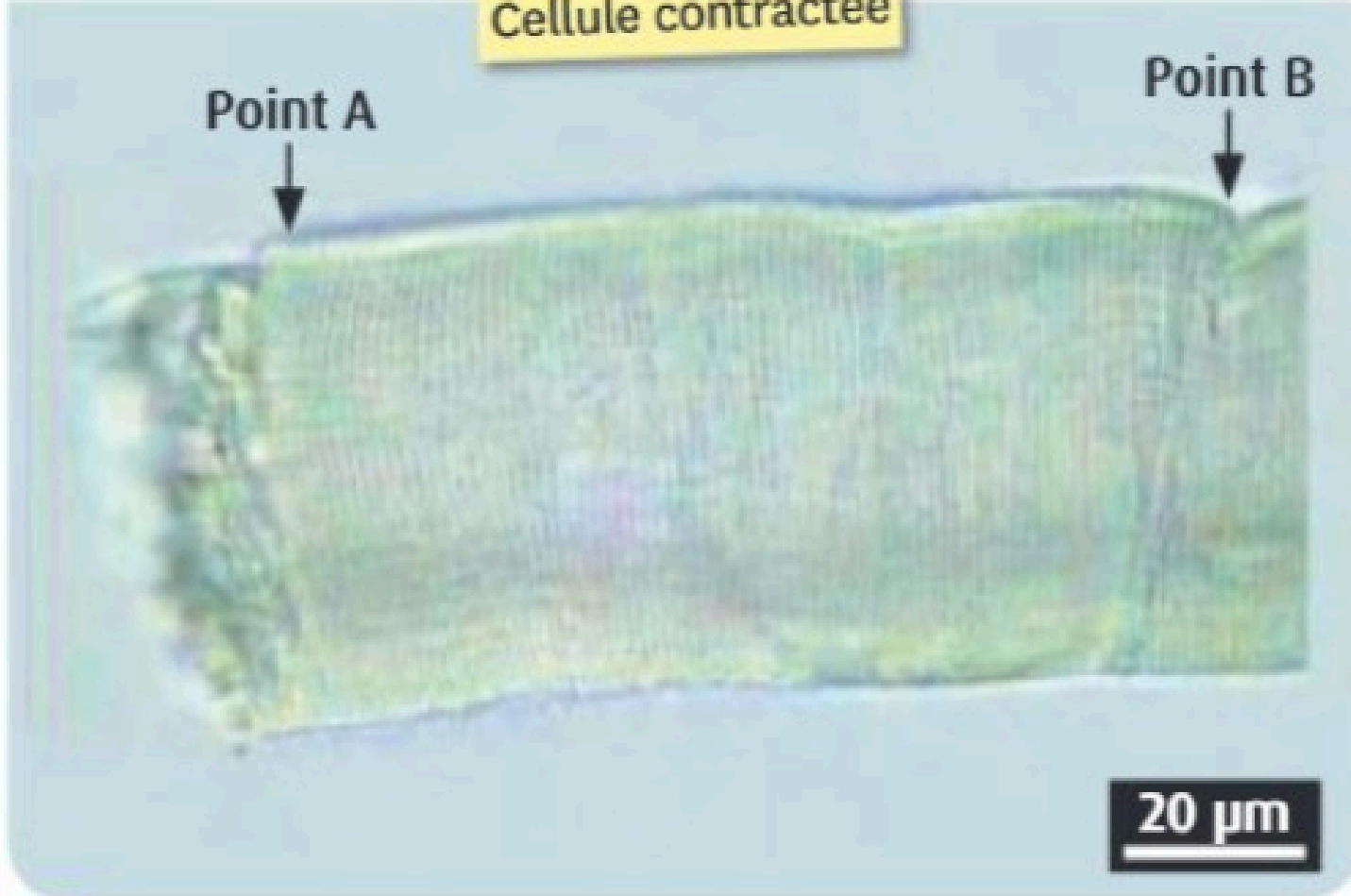


MO

Cellule relâchée

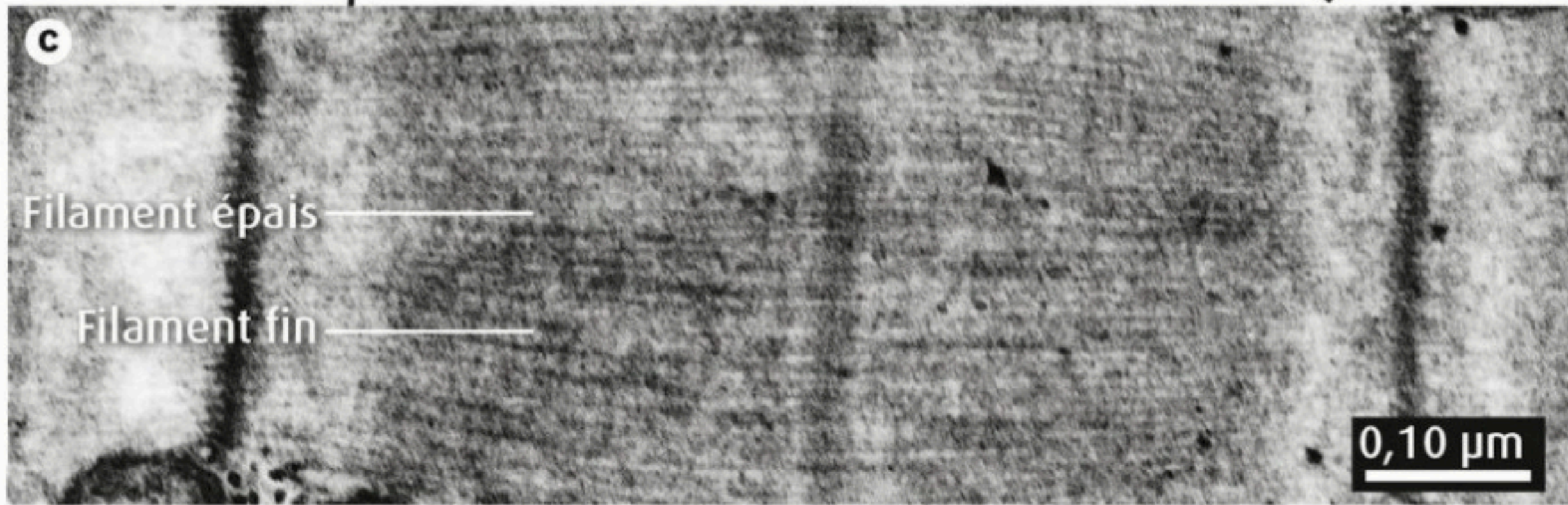
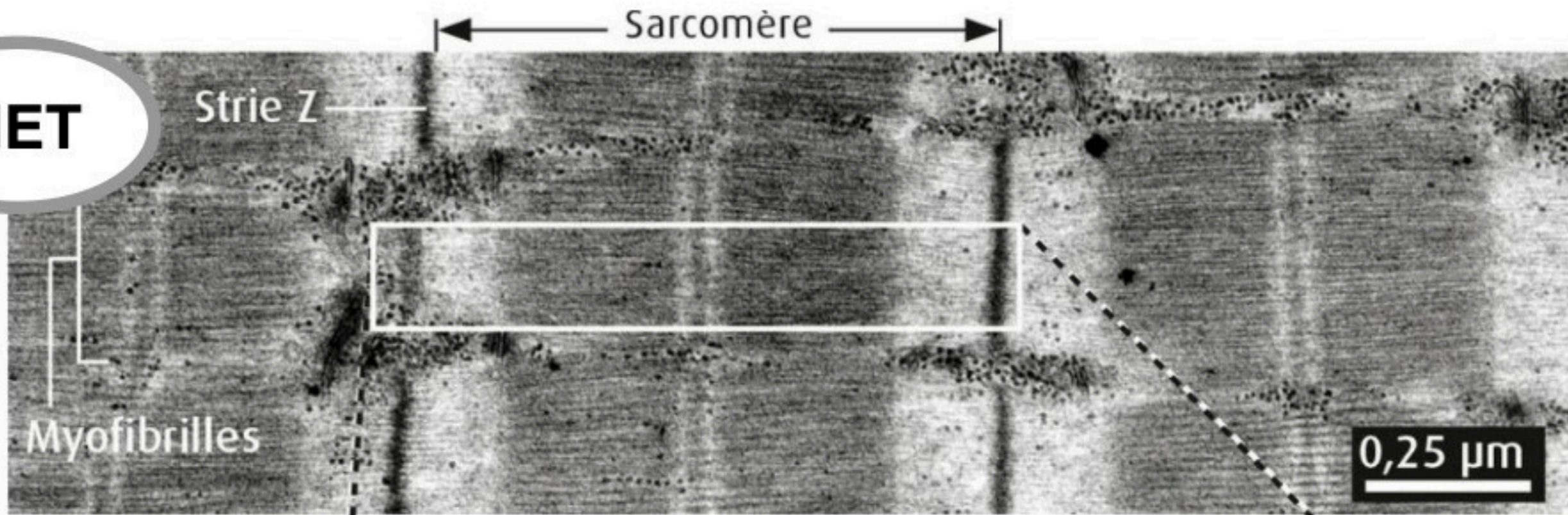


Cellule contractée

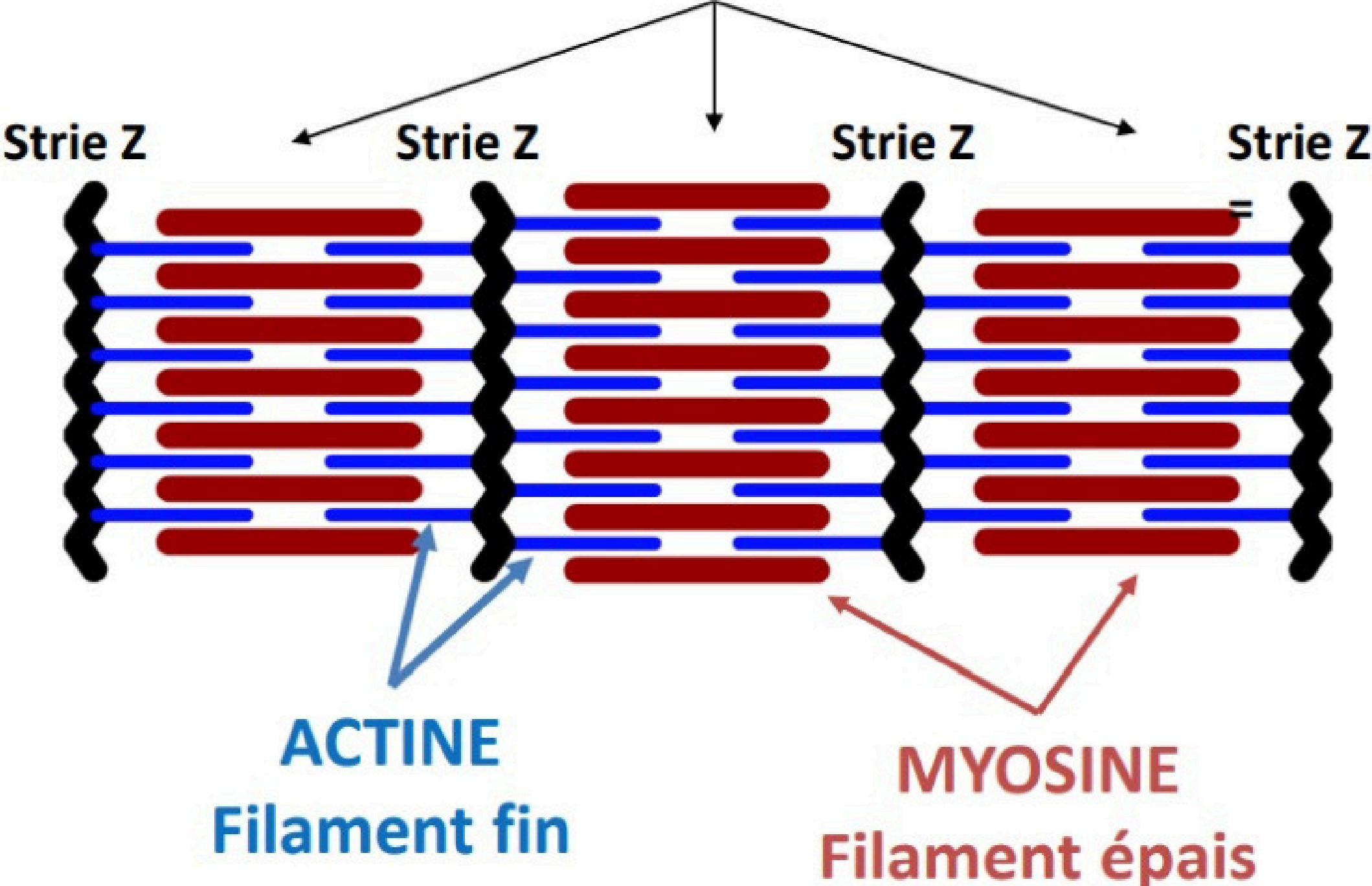


+ ATP

MET

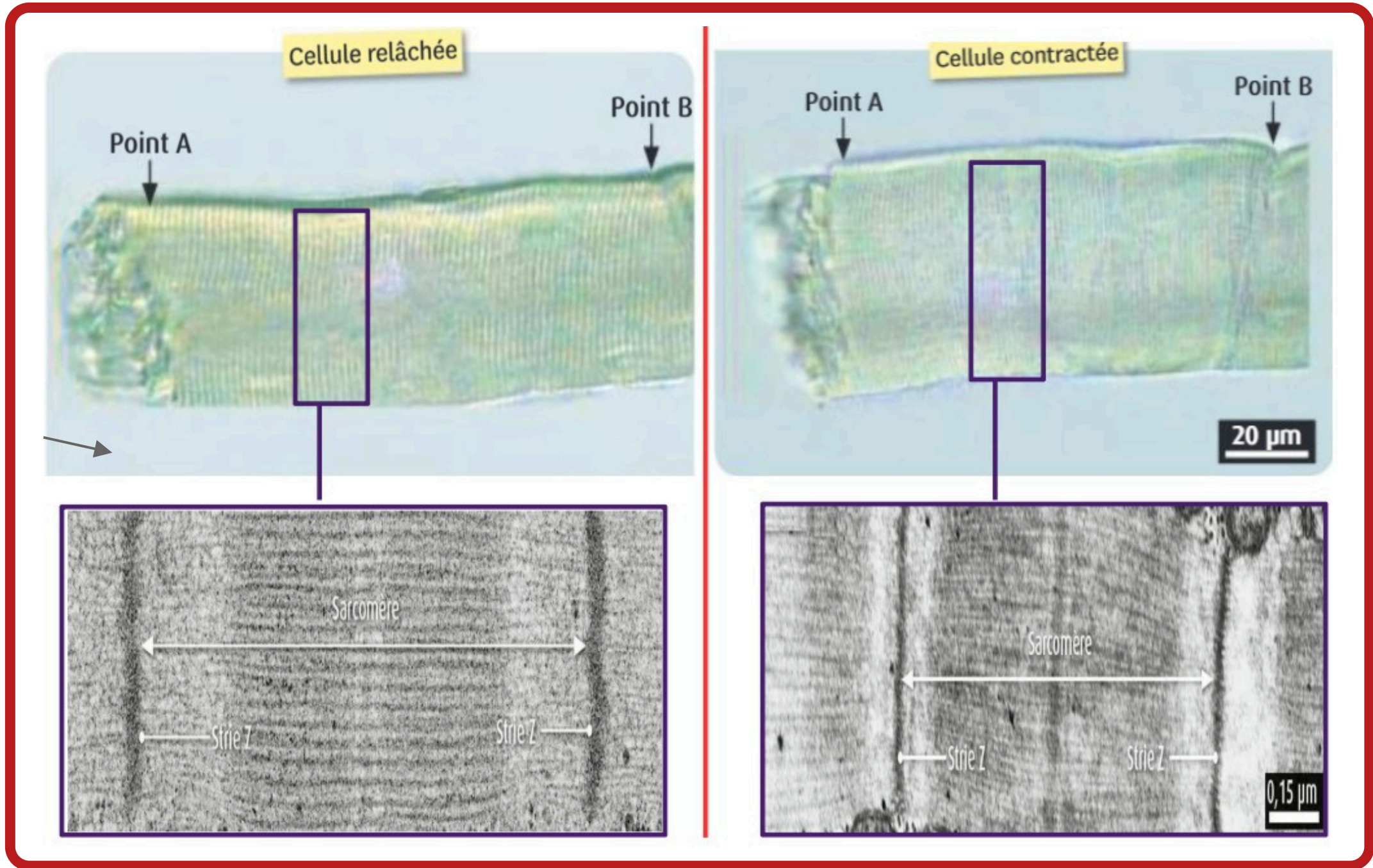


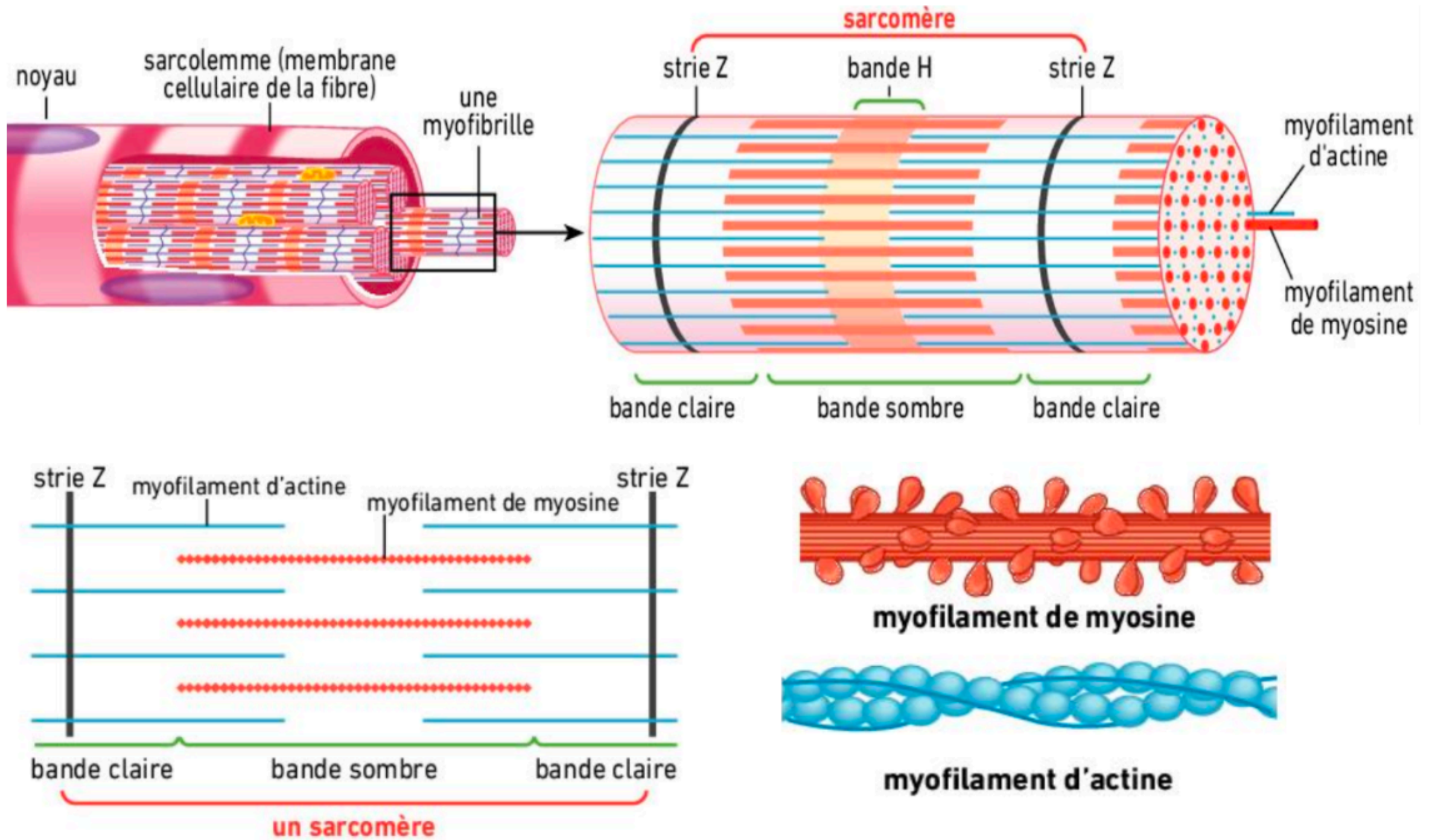
3 sarcomères





ARGUMENT : Observation microscopique et d'électronographies de cellules musculaires contractée et relâchée





Document 2 : Schéma des différentes sous-unités d'une fibre musculaire.



Bilan: Le muscle strié squelettique est un ensemble de cellules musculaires, qui sont organisées en faisceaux musculaires. Le raccourcissement et l'épaississement des muscles lors de la contraction musculaire permettent le mouvement relatif des deux os auxquels ils sont reliés par des tendons. Les cellules musculaires sont des cellules très spécialisées, possédant un cytosquelette original fait de longues fibres protéiques appelées myofibrilles.

Chaque myofibrille comprend un ensemble de filaments fins d'actine et de filaments épais de myosine, et montre une structure répétitive formée d'unités appelées sarcomères.

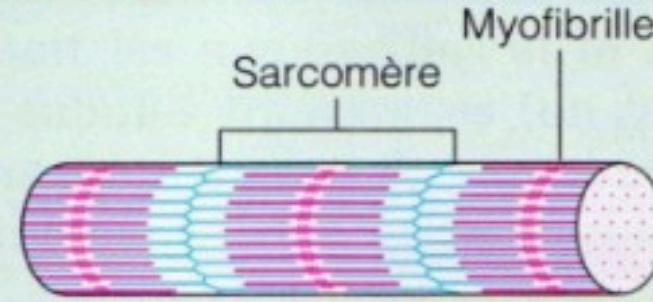
II. Le mécanisme de la contraction musculaire

→ A) La contraction musculaire à l'échelle cellulaire et moléculaire

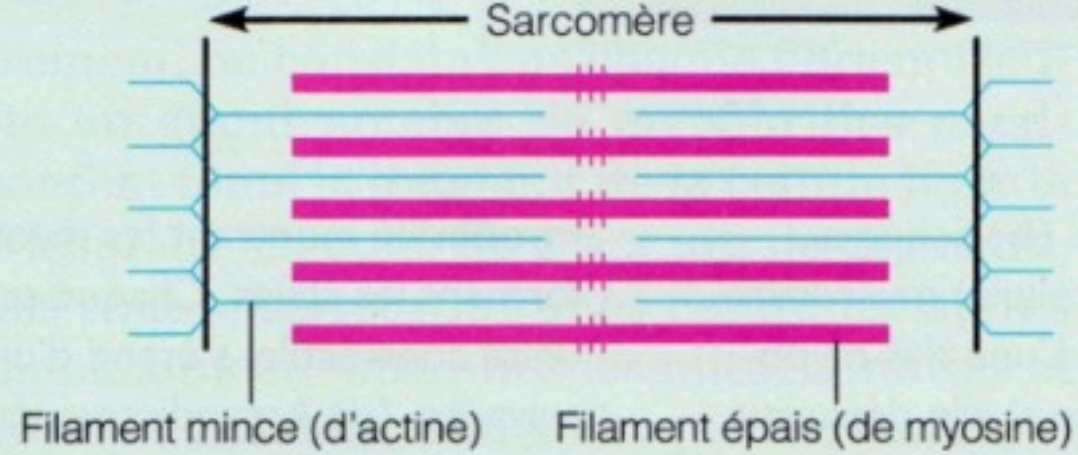


MOLECULE

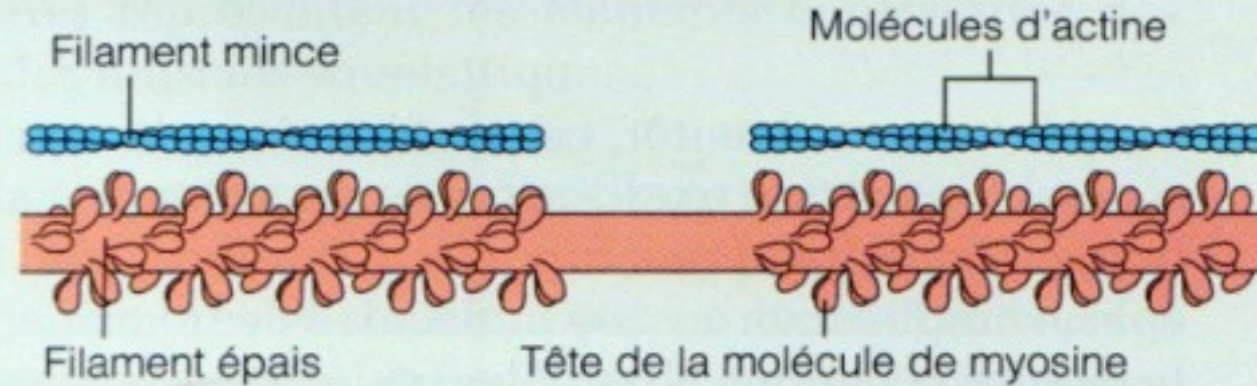
Myofibrille ou fibrille (organe complexe constitué de groupes de filaments)

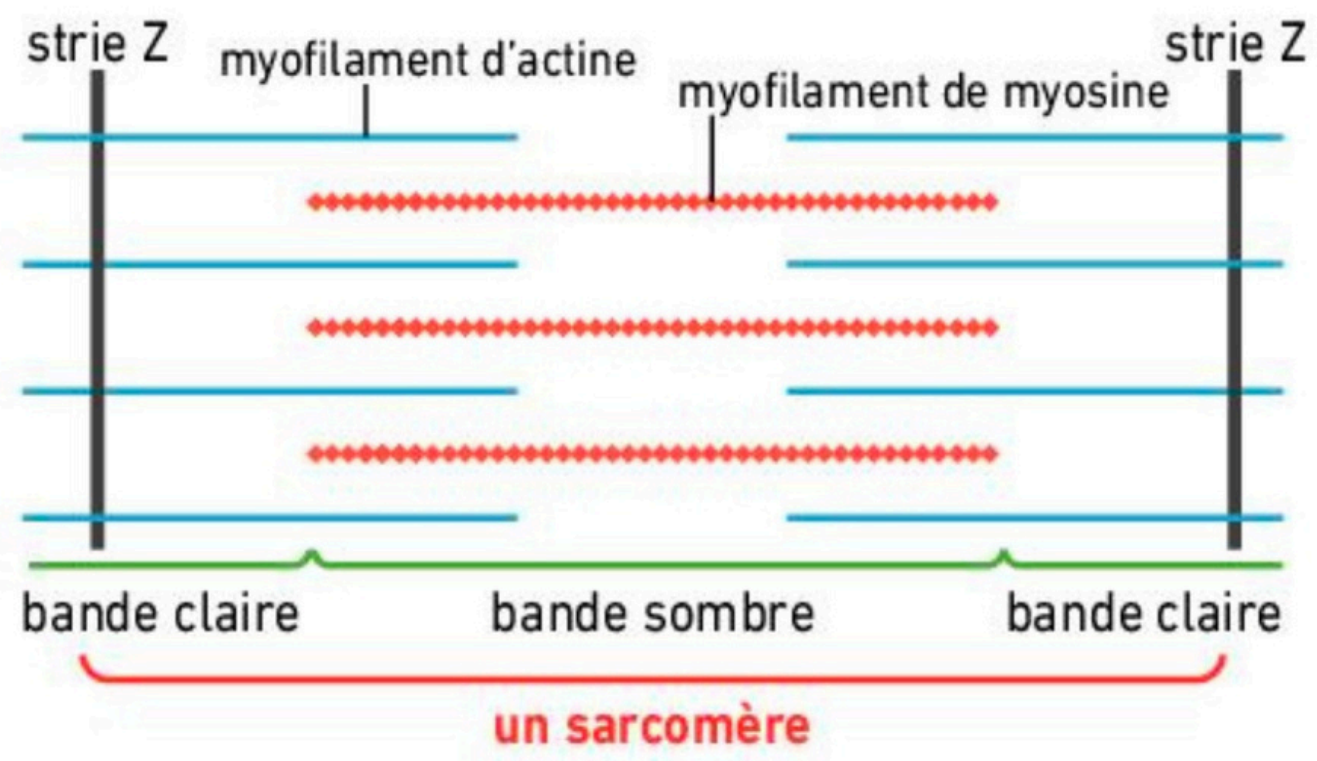
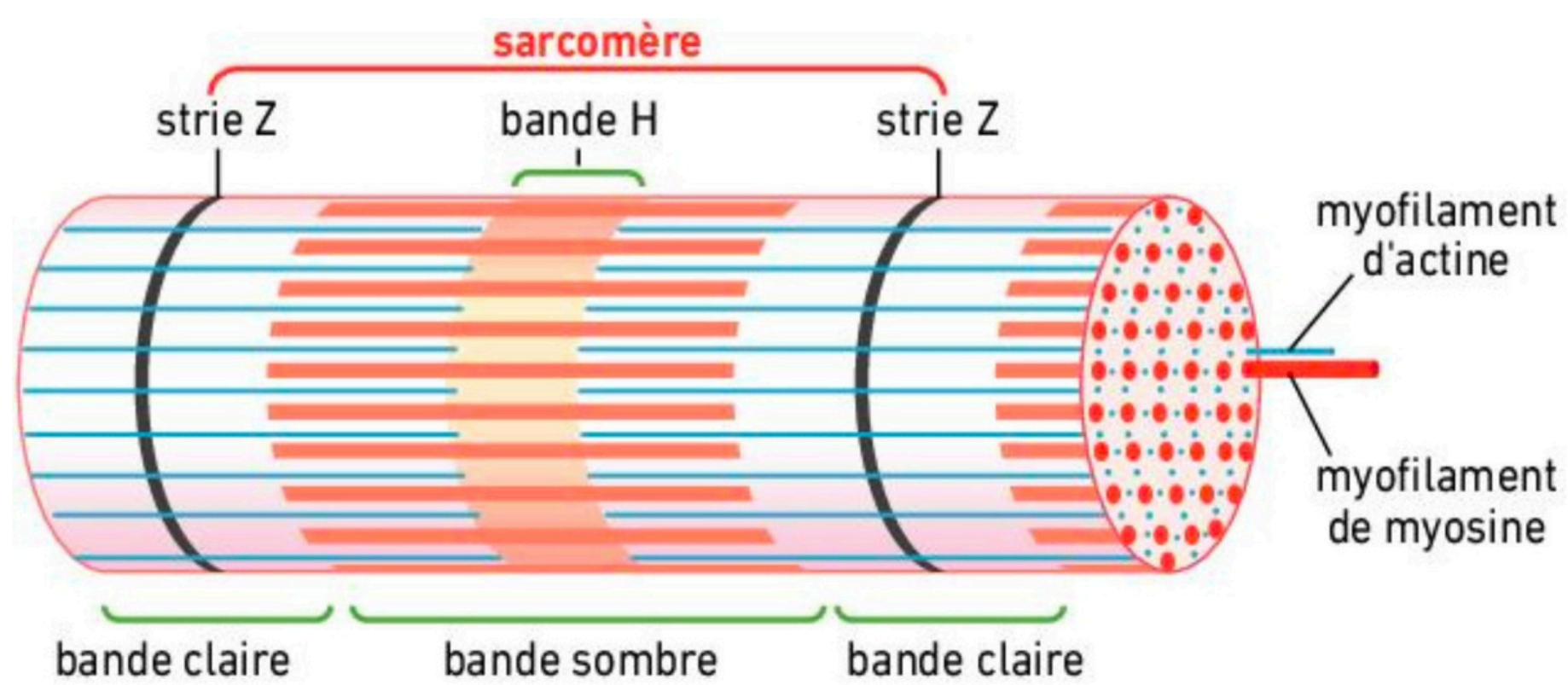


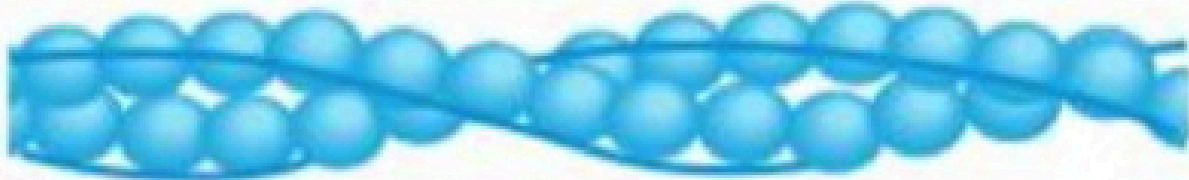
Sarcomère (segment d'une myofibrille)



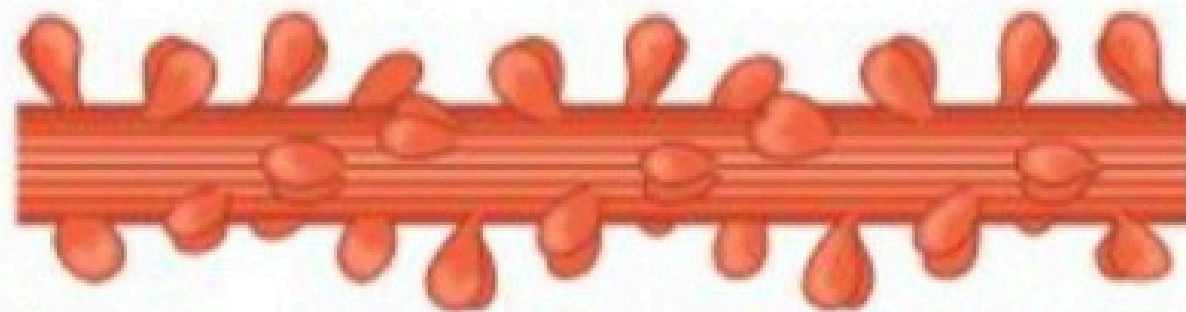
Myofilament ou filament (structure macromoléculaire)



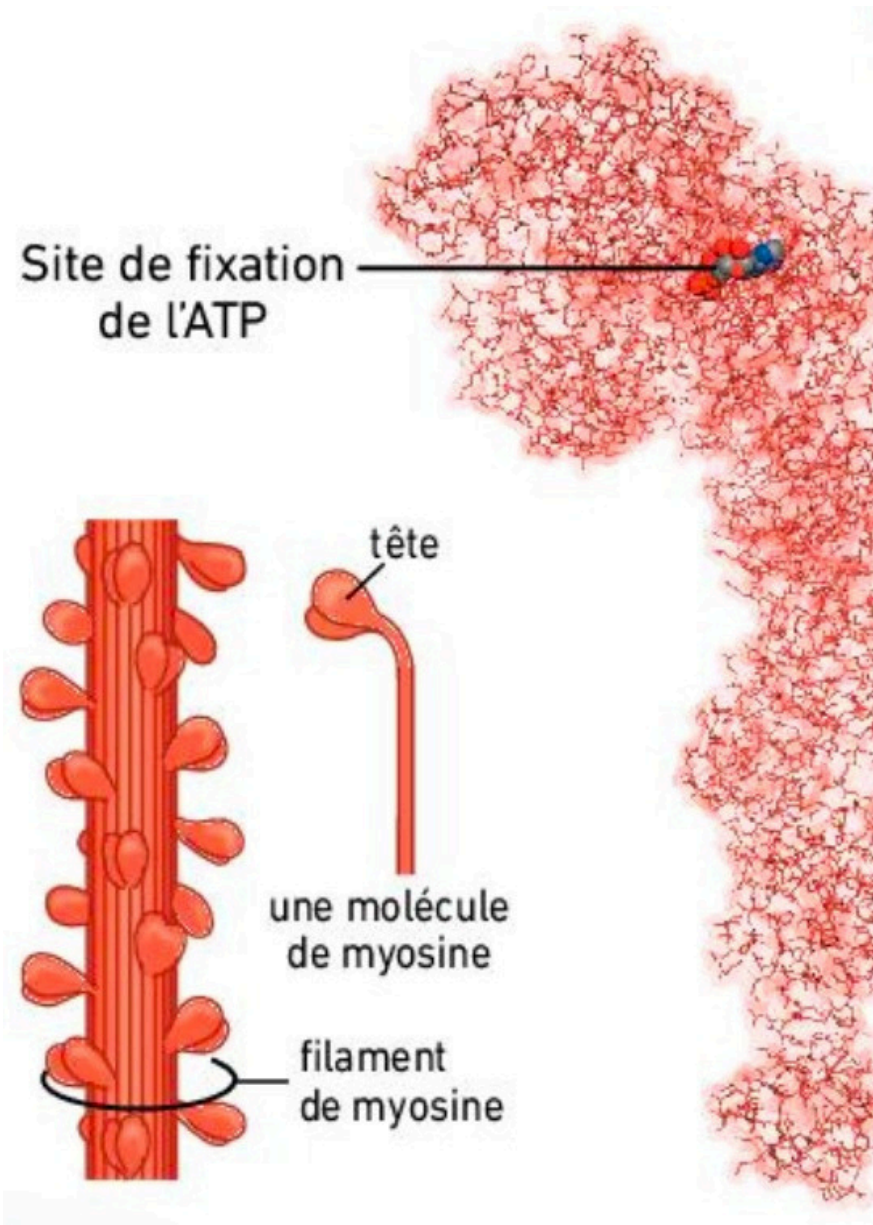




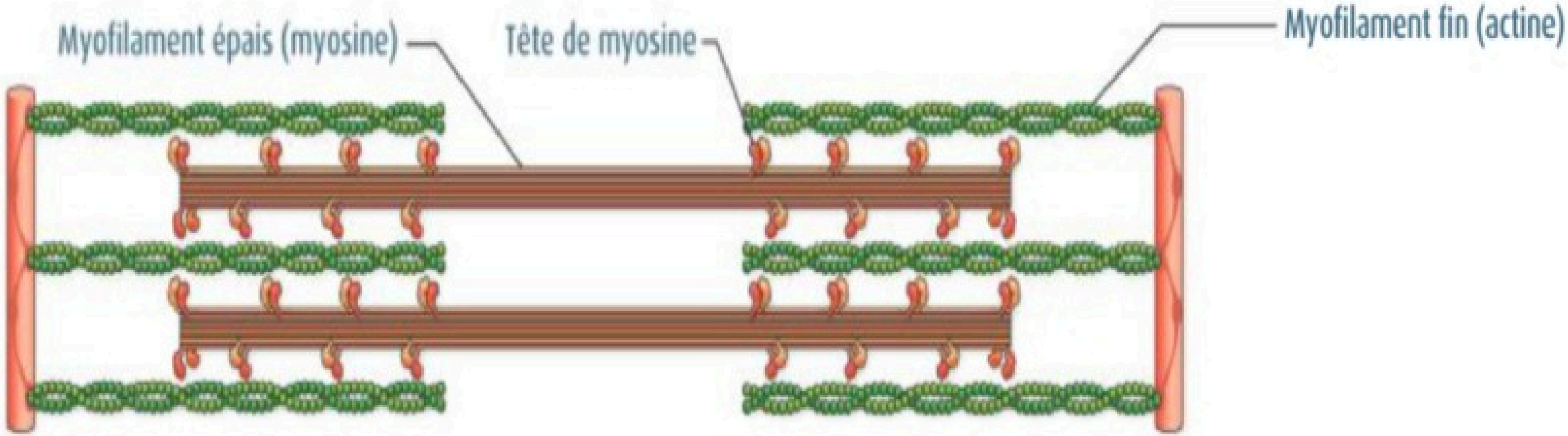
myofilament d'actine



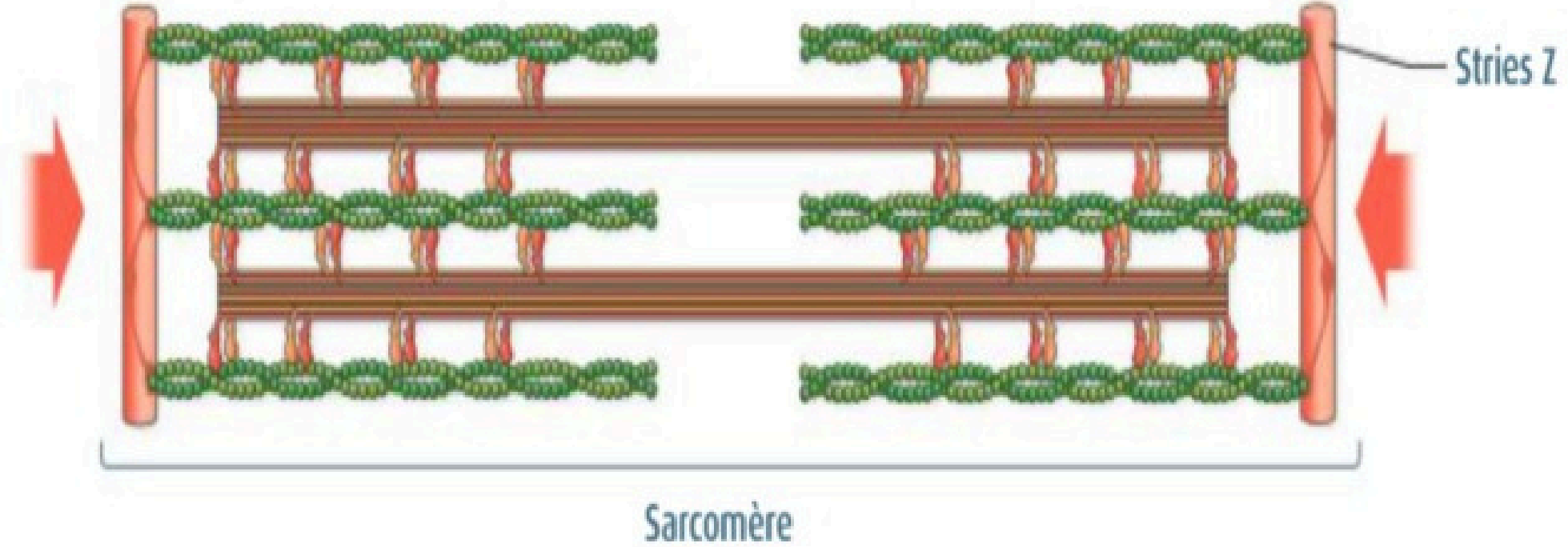
myofilament de myosine



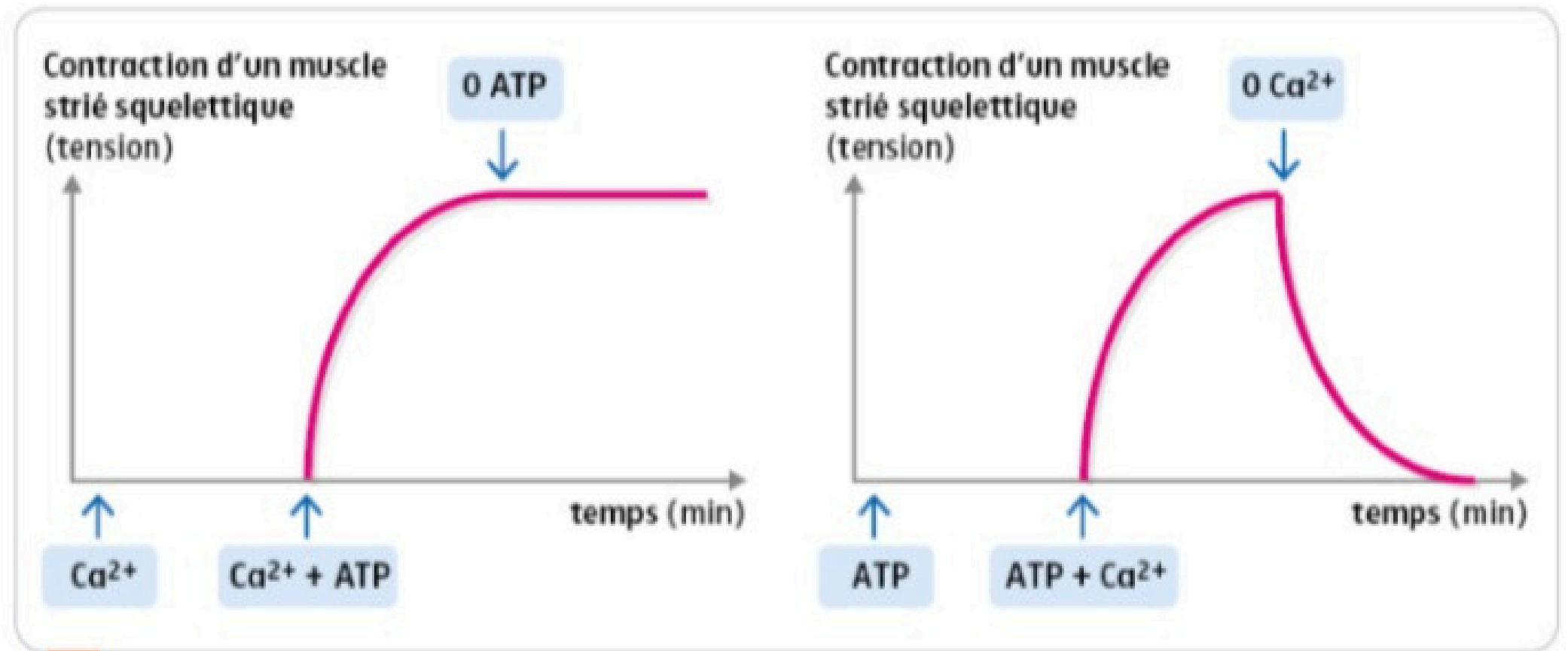
Relâchement



Contraction



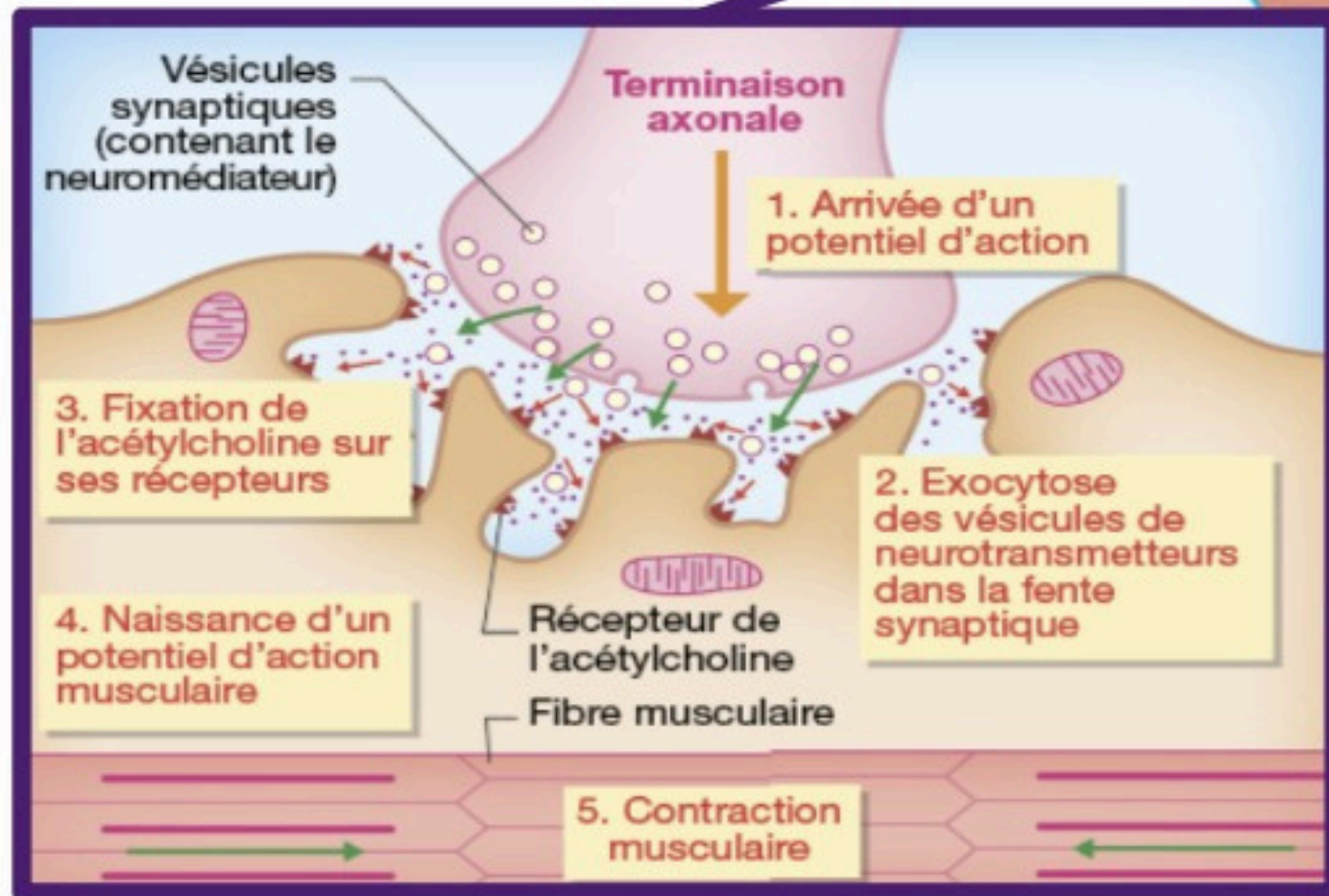
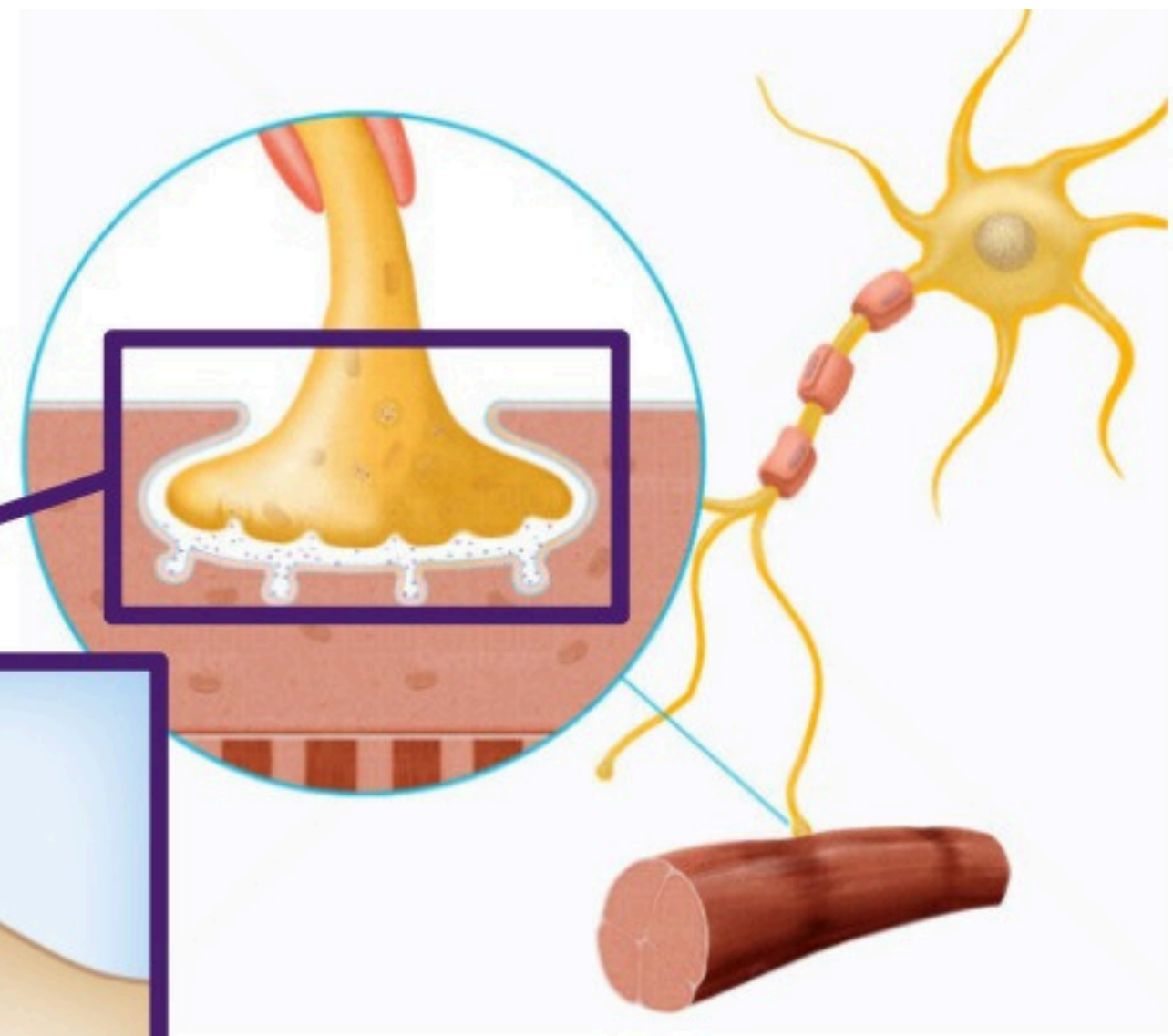
On mesure la contraction d'un muscle strié squelettique (tension) en présence ou en l'absence d'ions calcium (Ca^{2+}) et d'ATP.

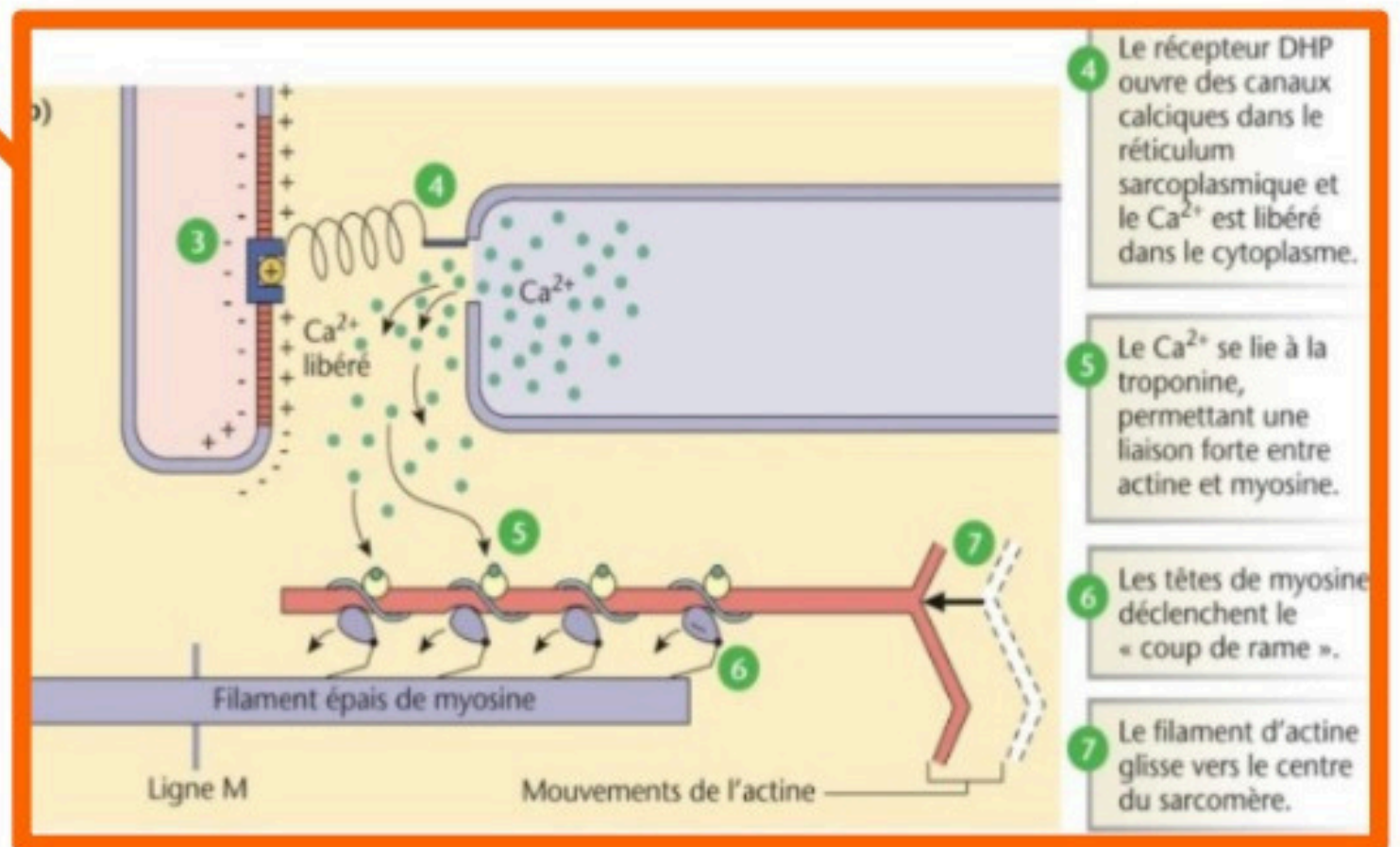
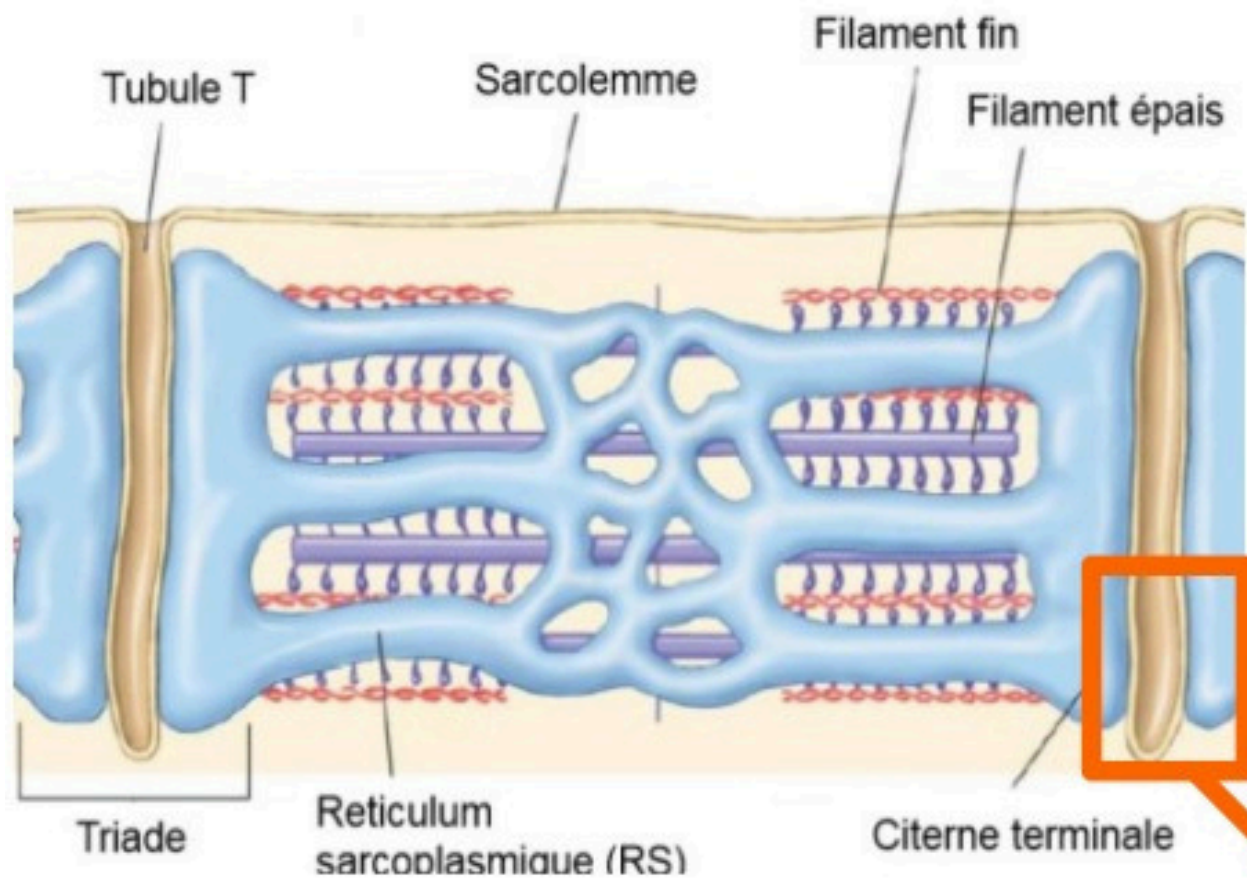


1 Expériences des conditions nécessaires à la contraction musculaire.

Constituants du milieu		
	État initial	État final
Milieu 1	Filaments d'actine + ATP + Ca^{2+}	Filaments d'actine + ATP + Ca^{2+}
Milieu 2	Filaments de myosine + ATP + Ca^{2+}	Filaments de myosine + ATP + Ca^{2+} + faible quantité d'ADP et de Pi
Milieu 3	Filaments d'actine + filaments de myosine + ATP + Ca^{2+}	Ponts actine-myosine + grande quantité d'ADP et de Pi

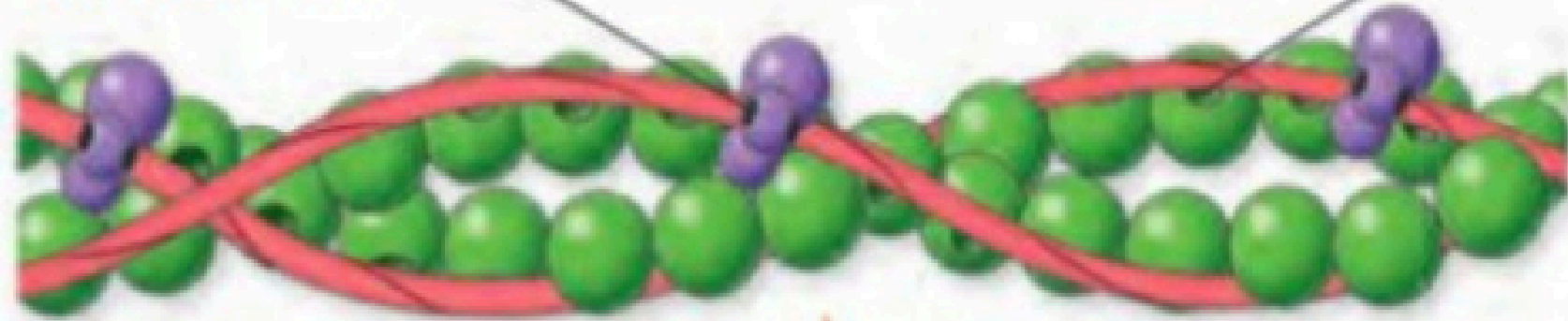
2 Identification au niveau moléculaire du rôle de l'ATP et des ions calcium.





Sites de fixation
des ions calcium

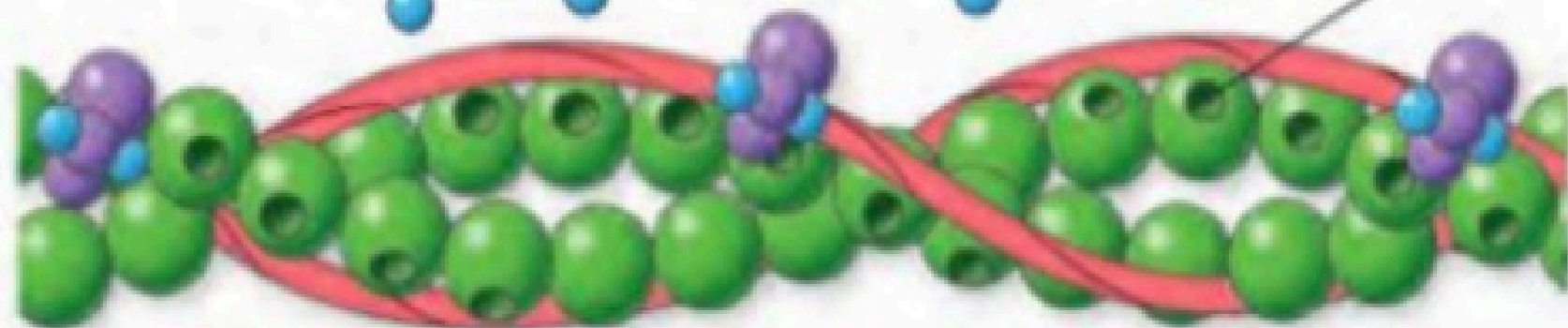
Site de fixation de la myosine
sur l'actine : **non accessible**



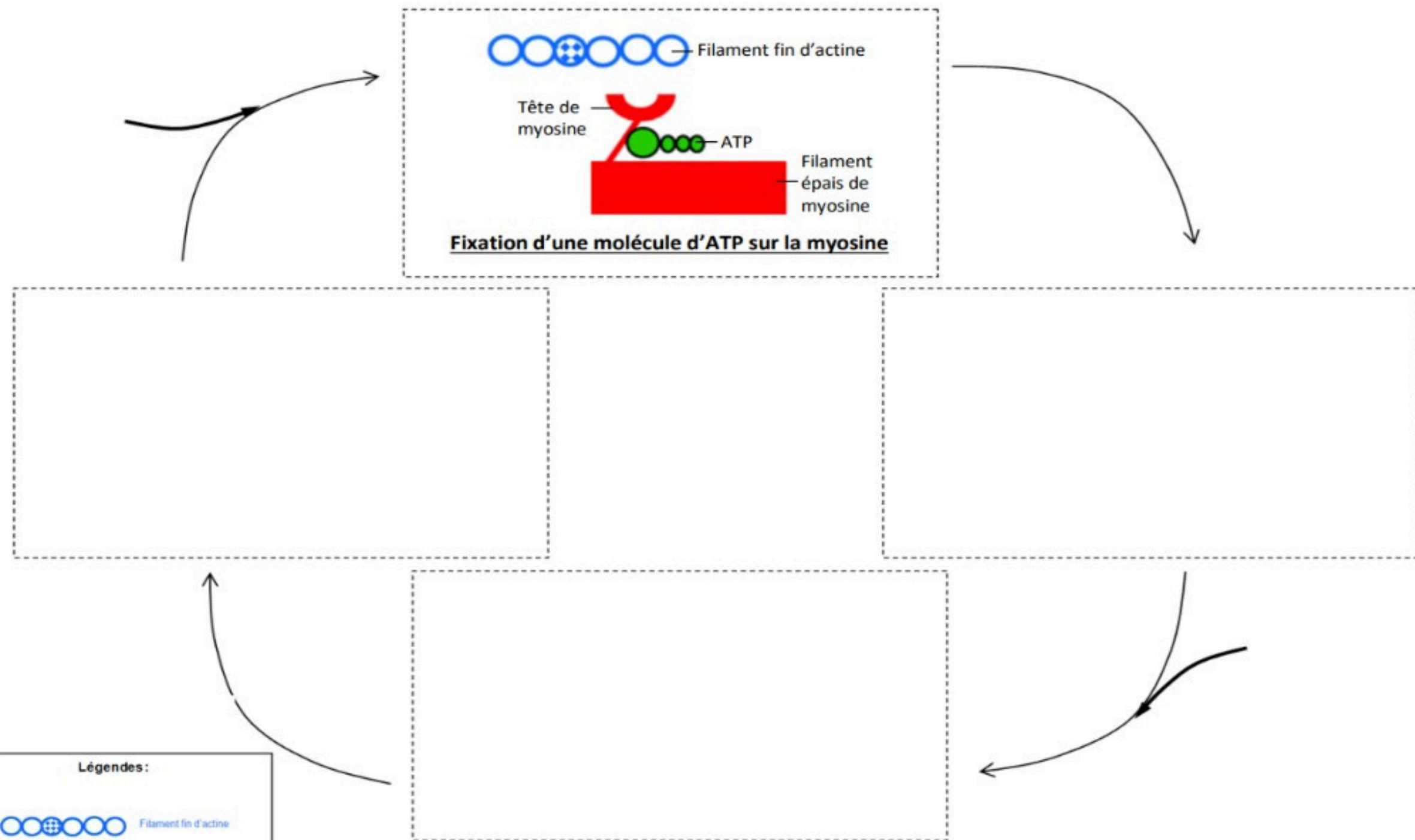
Filament d'actine

Ca²⁺ libéré
du sarcoplasme





Site de fixation de la myosine
sur l'actine : **accessible**

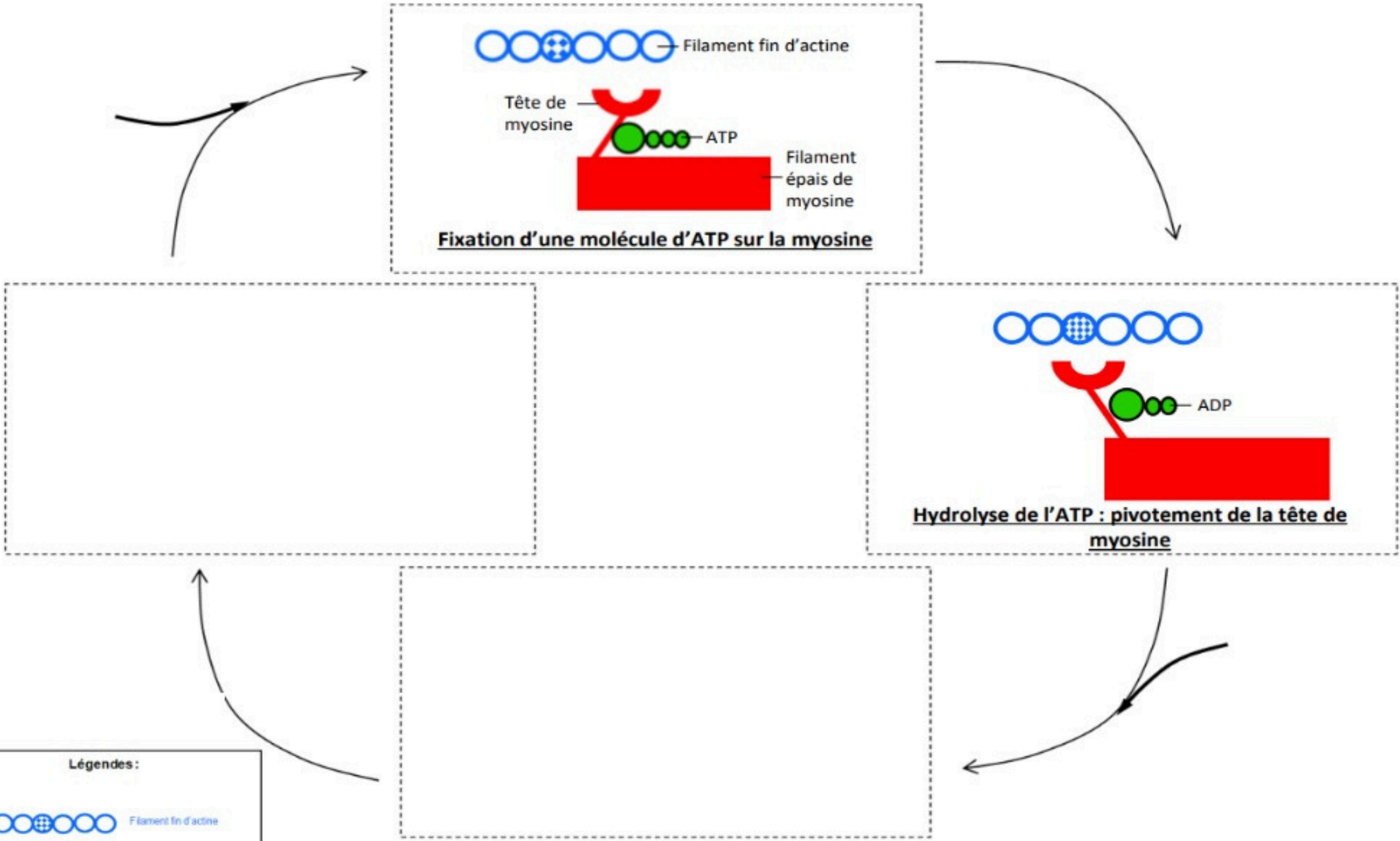


Filament d'actine



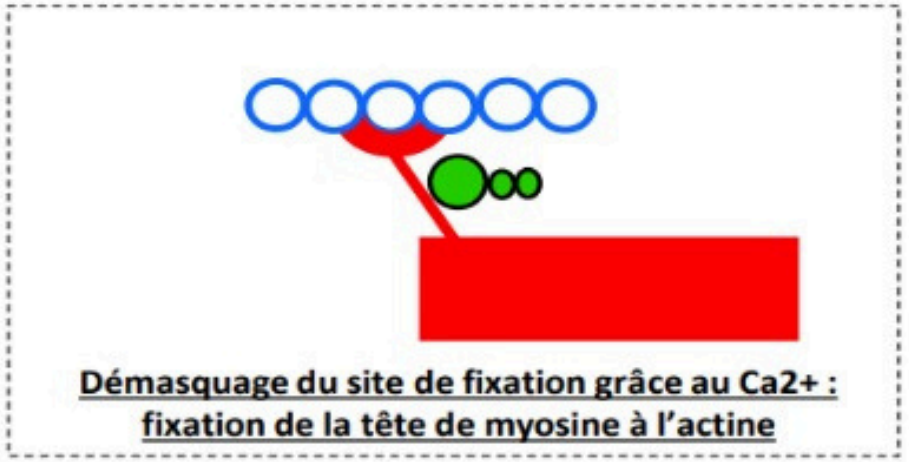
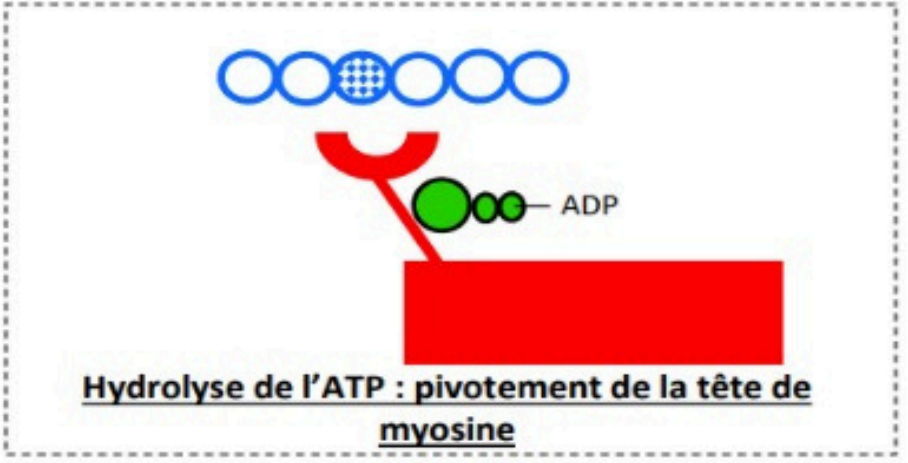
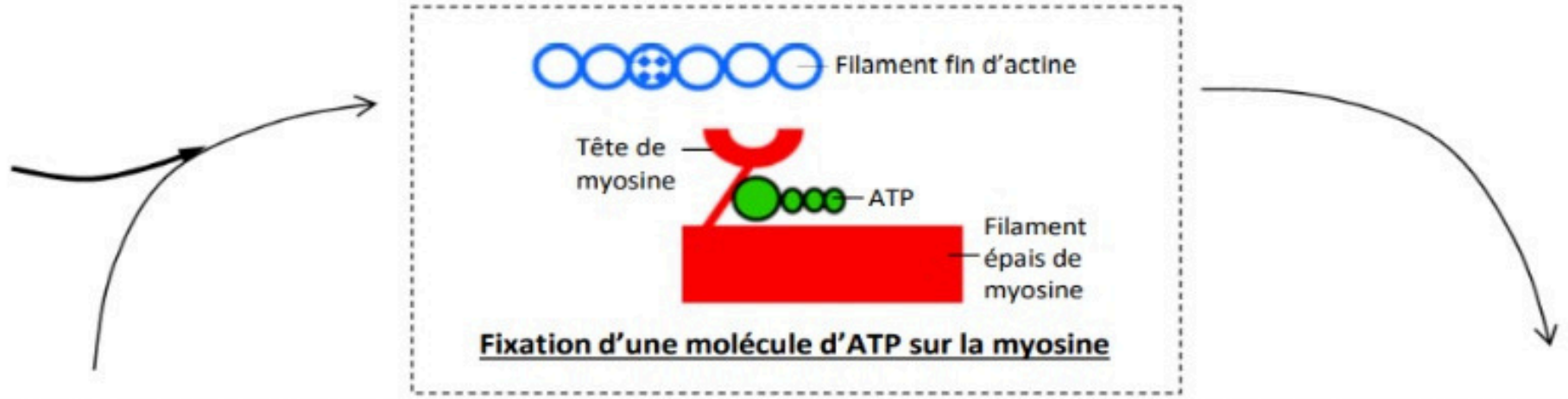
Légendes :

-  Filament fin d'actine
-  Site de fixation de la myosine sur l'actine masqué
-  Filament épais de myosine
-  ATP (Adénosine triphosphate)



Légendes :

- Filament fin d'actine
- Tête de myosine
- Filament épais de myosine
- ATP (Adénosine triphosphate)
- Site de fixation de la myosine sur l'actine masqué



Ca²⁺
libéré par l'arrivée du message nerveux

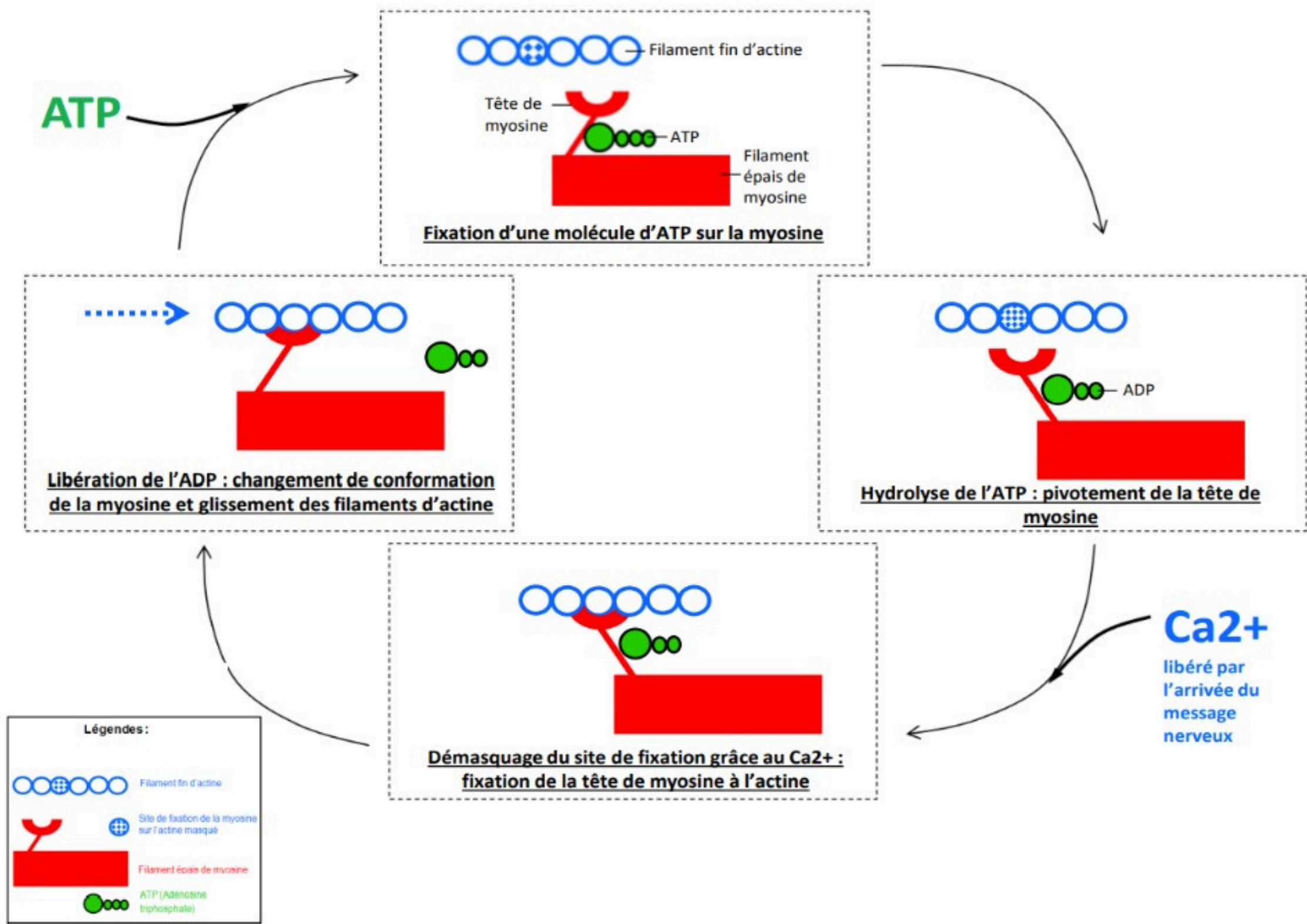
Légendes :

Filament fin d'actine

Site de fixation de la myosine sur l'actine masqué

Filament épais de myosine

ATP (Adénosine triphosphate)



ATP

Filament fin d'actine

Tête de myosine

ATP

Filament épais de myosine

Fixation d'une molécule d'ATP sur la myosine

Libération de l'ADP : changement de conformation de la myosine et glissement des filaments d'actine

Hydrolyse de l'ATP : pivotement de la tête de myosine

ADP

Ca²⁺
libéré par l'arrivée du message nerveux

Démasquage du site de fixation grâce au Ca²⁺ : fixation de la tête de myosine à l'actine

Légendes :



Filament fin d'actine



Site de fixation de la myosine sur l'actine masqué



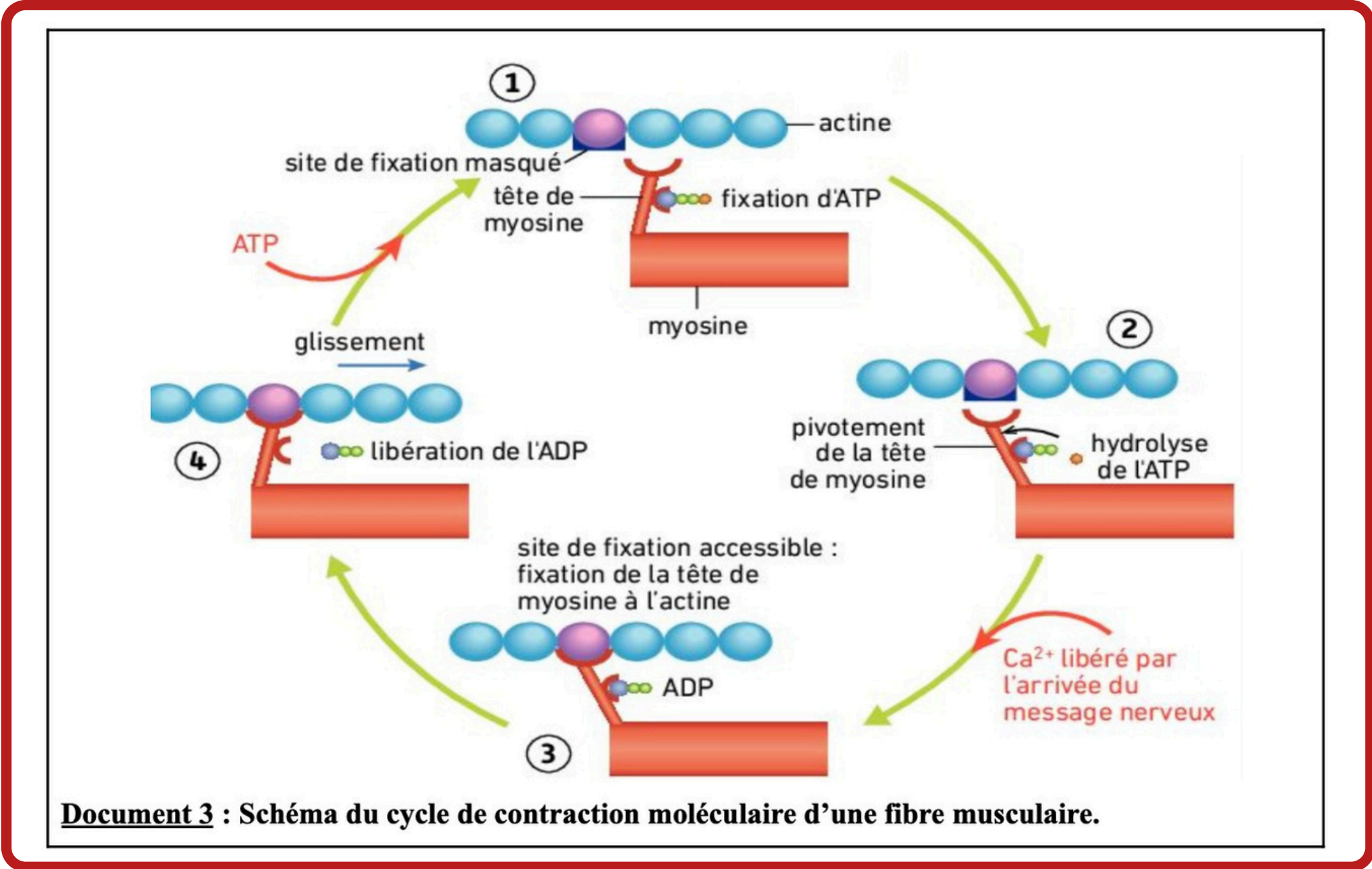
Filament épais de myosine



ATP (Adenosine triphosphate)



ARGUMENT : Schéma du cycle moléculaire de la contraction musculaire



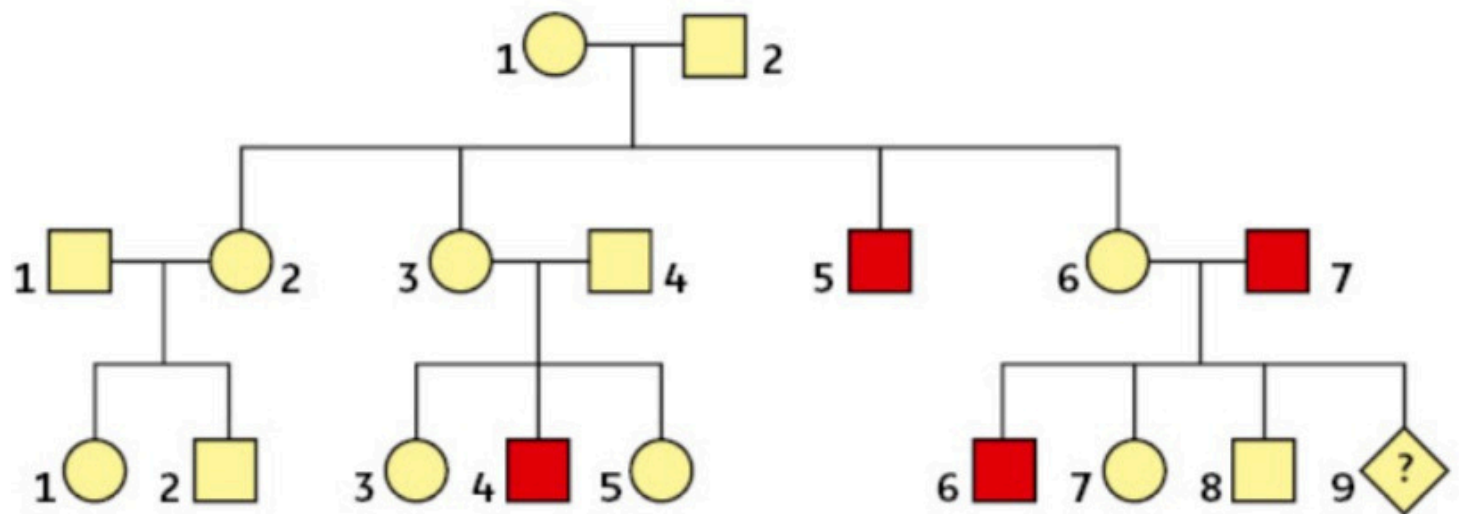
Document 3 : Schéma du cycle de contraction moléculaire d'une fibre musculaire.





II. Le mécanisme de la contraction musculaire

A) La contraction musculaire à l'échelle cellulaire et moléculaire

→ B) Les myopathies, une dégénérescence des cellules musculaires

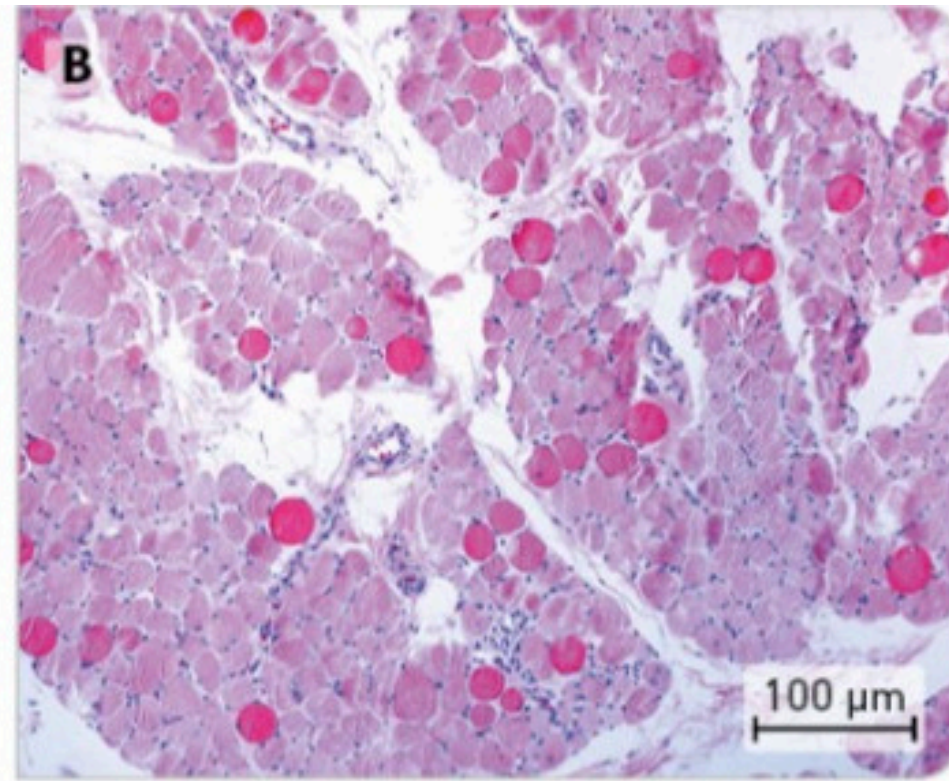
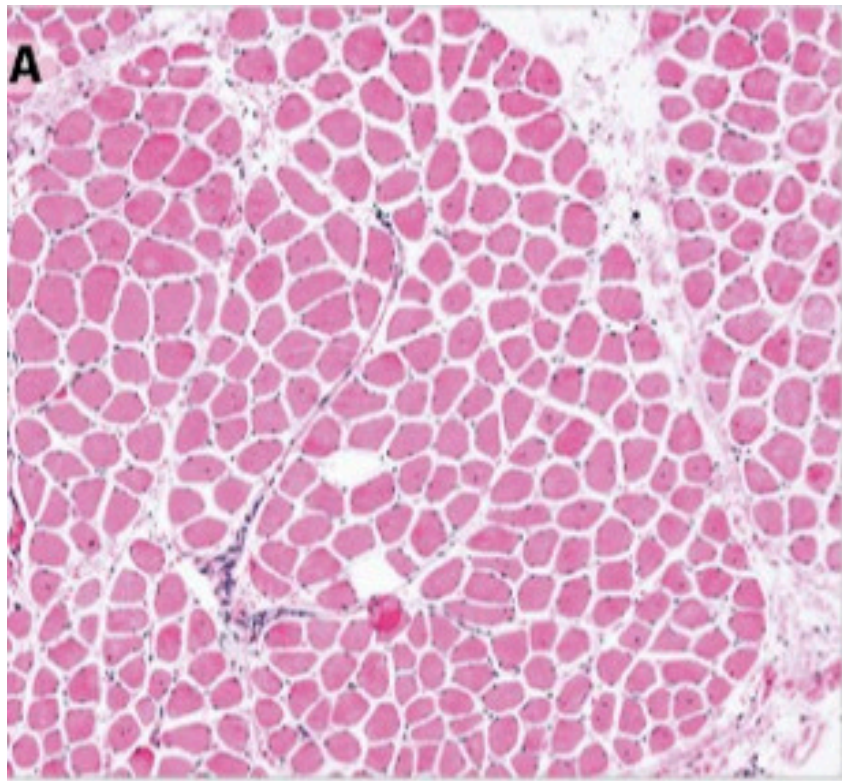




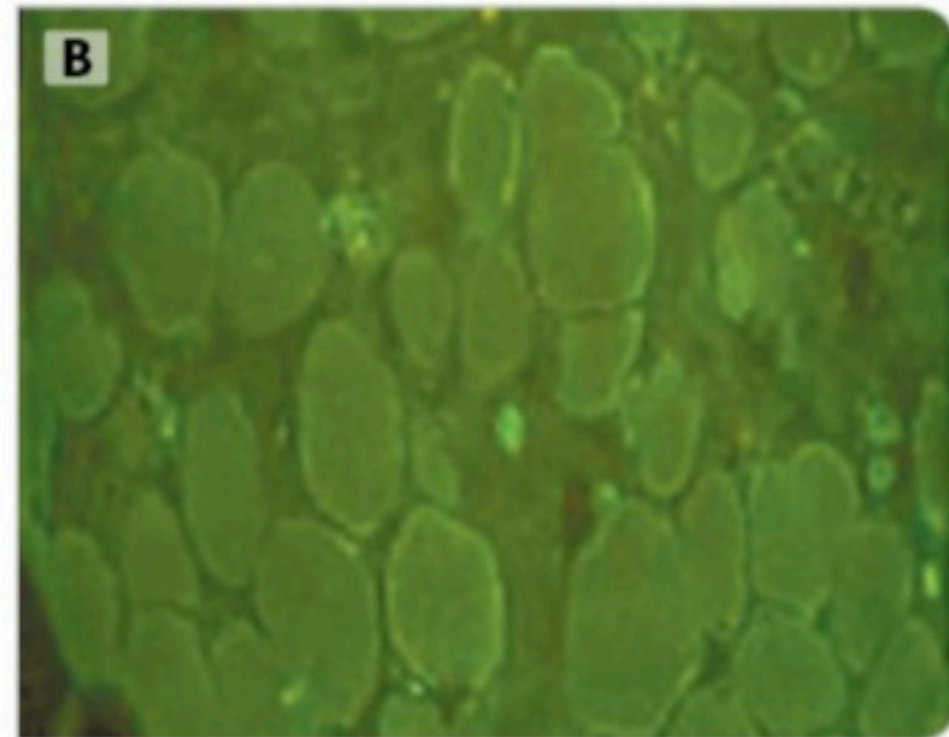
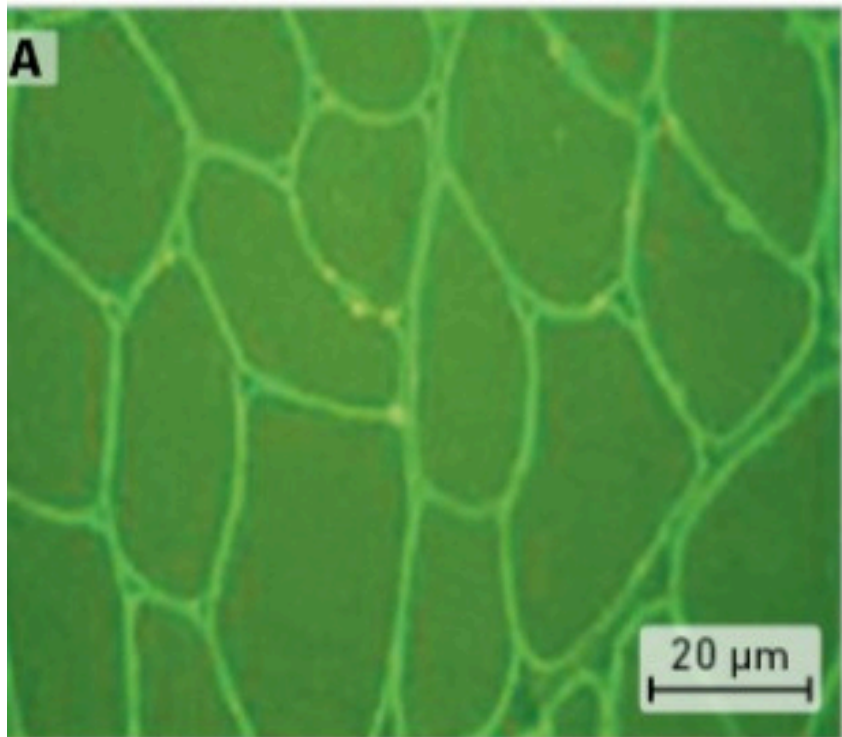
	Homme sain		Femme saine
	Homme malade		Femme malade

I
II
III

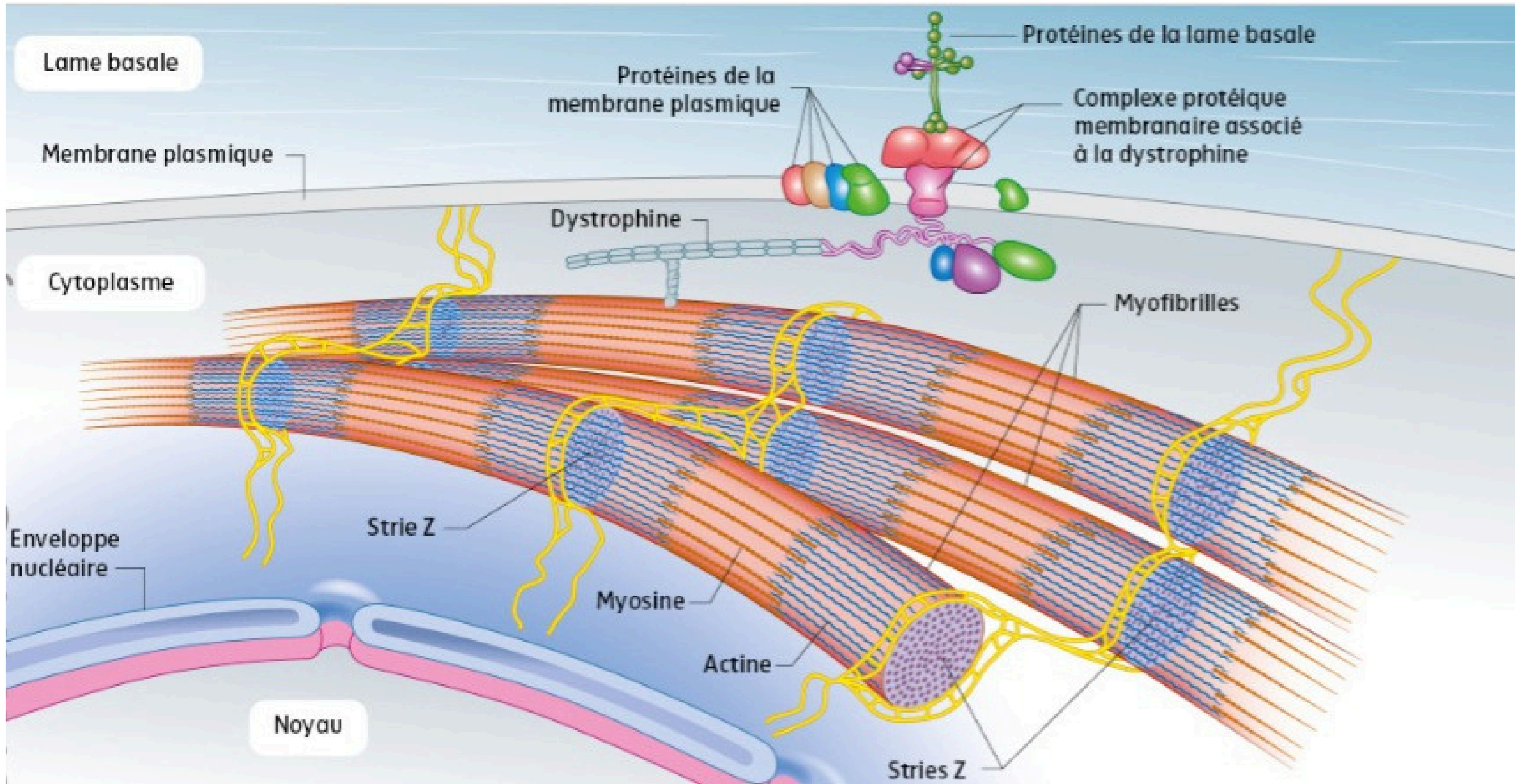


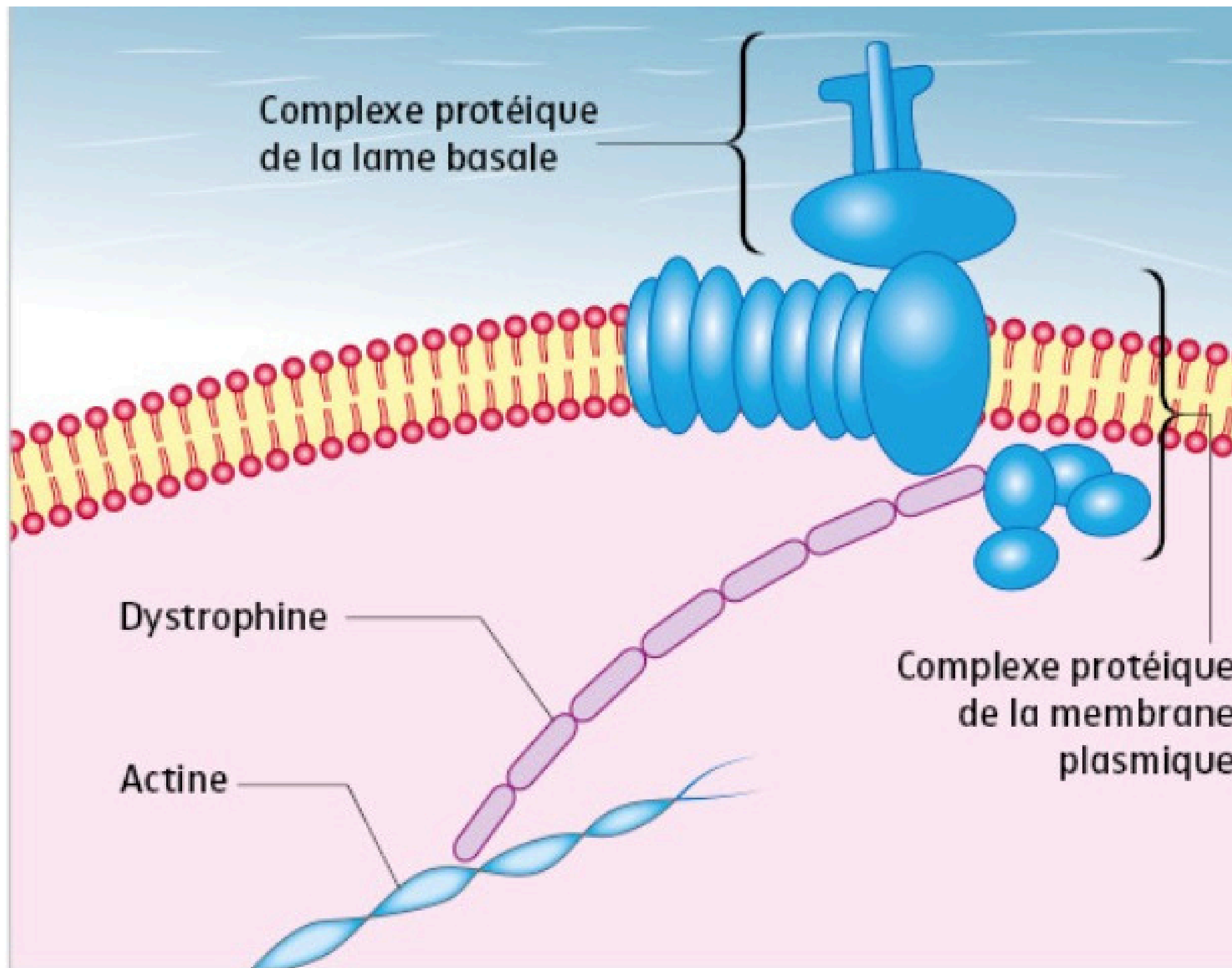


- 3** Phénotype cellulaire de la maladie.
A Muscle sain.
B Stade très avancé de la myopathie de Duchenne. Les cellules musculaires fonctionnelles sont colorées en rose.



- 4** Phénotype moléculaire de la maladie :
technique d'immunofluorescence utilisant
des anticorps dirigés contre la dystrophine.
A Muscle sain.
B Muscle atteint de myopathie de Duchenne.
La dystrophine apparaît en vert fluorescent
sur les coupes.





-- 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 --



42 43 44 48 49 50 51 52 53 54 55 --



42 43 44 49 50 51 52 53 54 55



42 43 44 52 53 54 55

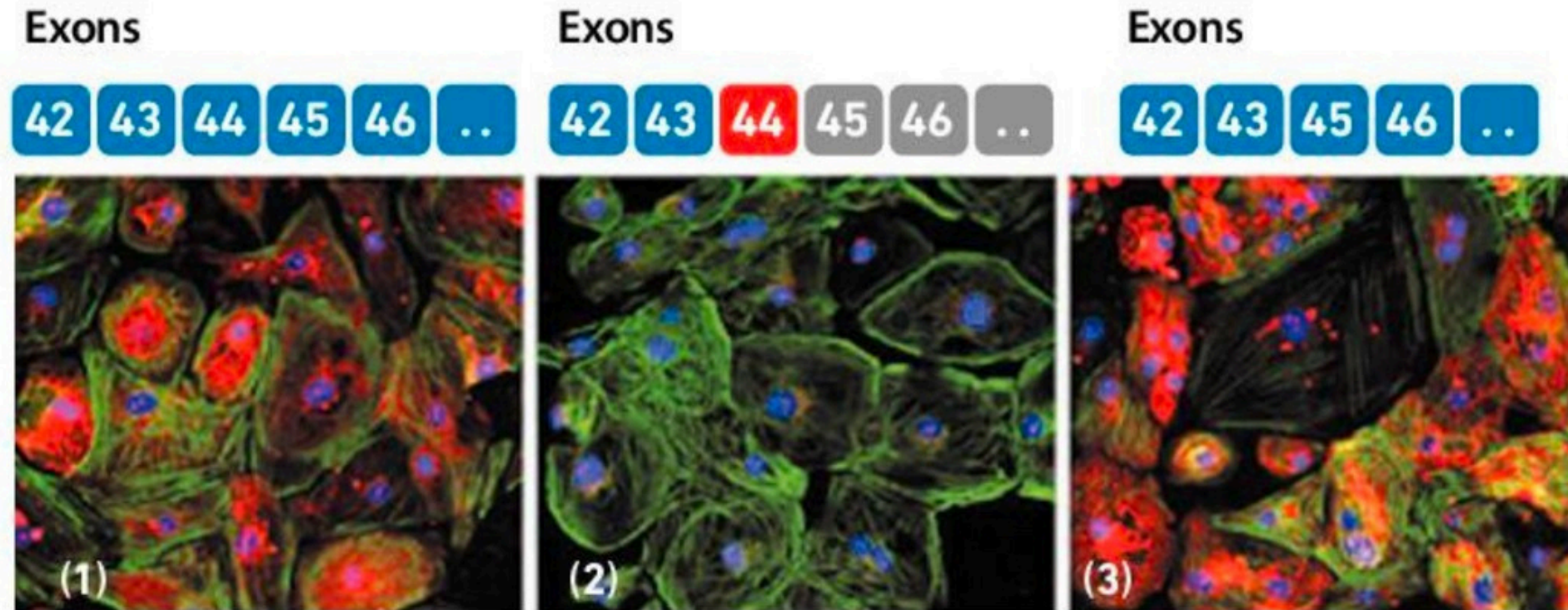


exons

protéine

malades

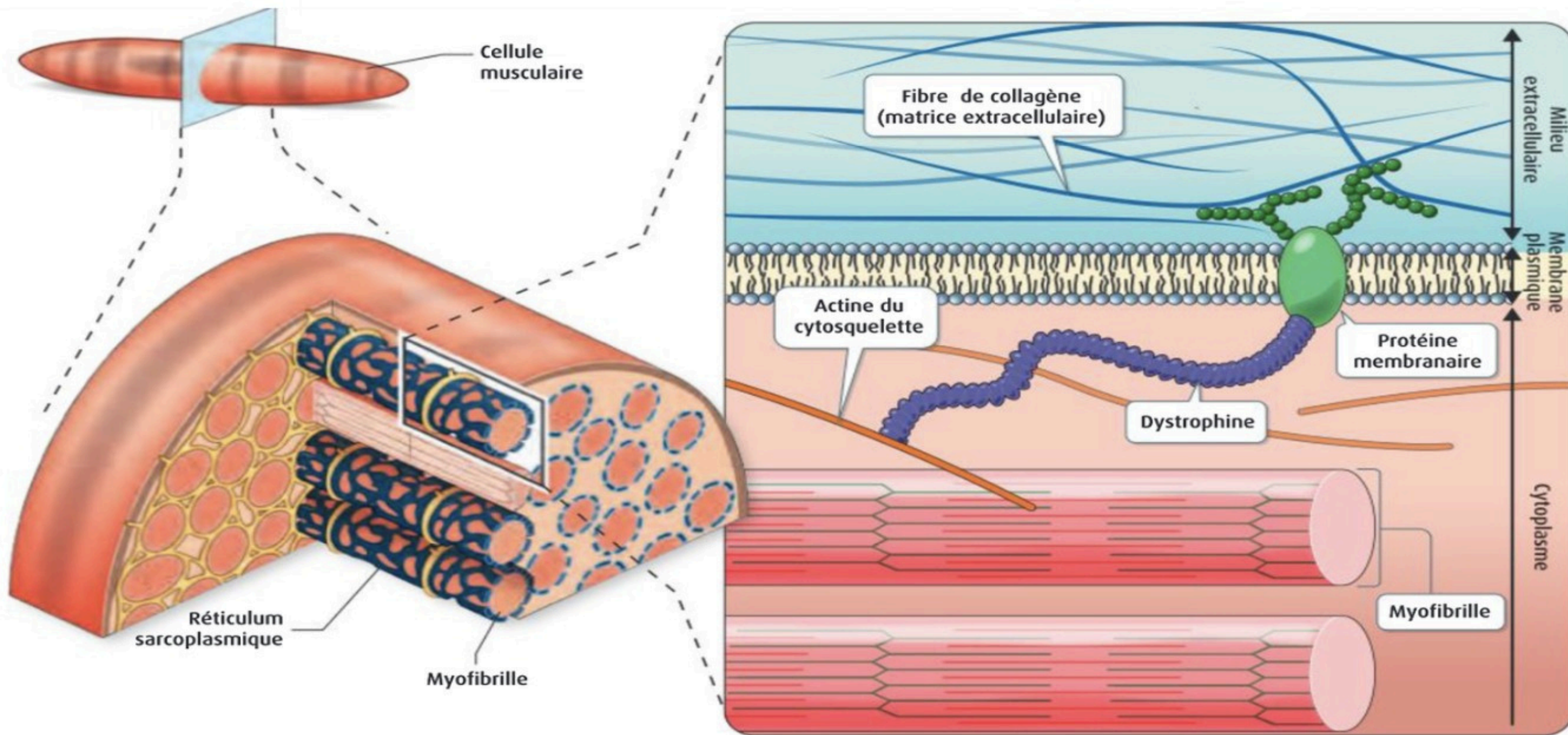
- L'une des formes graves de la DMD provient d'une mutation de l'exon 44 : un codon stop* arrête de façon très prématurée la synthèse de la dystrophine. Par **thérapie génique*** utilisant le « scalpel moléculaire CRISPR-Cas9* », des chercheurs parviennent à éliminer cet exon.
- Les photographies ci-contre montrent les fibres musculaires cardiaques d'un témoin non malade (1), d'un sujet avant le traitement (2) et d'un sujet après traitement (3). La dystrophine apparaît en rouge dès lors qu'elle est suffisamment longue.



C Un essai de thérapie génique prometteur.

100 μm

(d'après Yi-Li Min et al, CRISPR-Cas9 corrects Duchenne muscular dystrophy exon 44 deletion mutations in mice and human cells)



Document 4 : Le rôle de la dystrophine au sein des fibres musculaires.

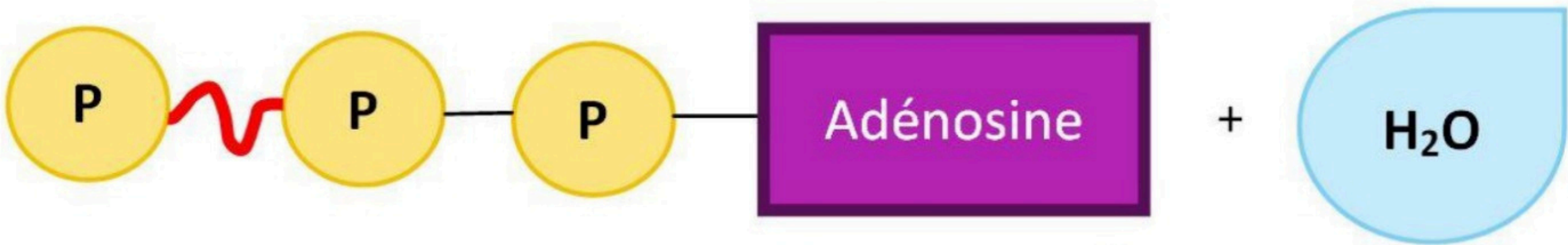


Bilan : Suite à la propagation du potentiel d'action de fibre musculaire, la libération d'ions calcium permet la fixation des têtes de myosine sur les filaments d'actine. L'énergie apportée par l'hydrolyse de l'ATP est indispensable au décrochage des têtes de myosine pour permettre leur fixation un peu plus loin sur le filament d'actine, ce qui provoque un mouvement de traction. Tant que des ions calcium et de l'ATP sont présents, cette succession d'événements se poursuit et la contraction musculaire aussi. Un nouveau cycle reprend, si la concentration en calcium dans la cellule reste suffisante. La dégénérescence des cellules musculaires chez un individu atteint de la myopathie de Duchenne est due à un défaut dans les interactions entre les protéines de la cellule musculaire et la matrice extracellulaire (MEC).

III. L'origine de l'ATP lors de la contraction musculaire

→ A) La respiration cellulaire (voie aérobie)





Hydrolyse de l'ATP :
réaction exergonique

ÉNERGIE



Formation de l'ATP :
réaction endergonique

ÉNERGIE



Quelques valeurs moyennes

Besoins énergétiques moyens quotidiens pour un individu : **4180 kJ**

Apport énergétique par hydrolyse d'une mole d'ATP : **50 kJ**

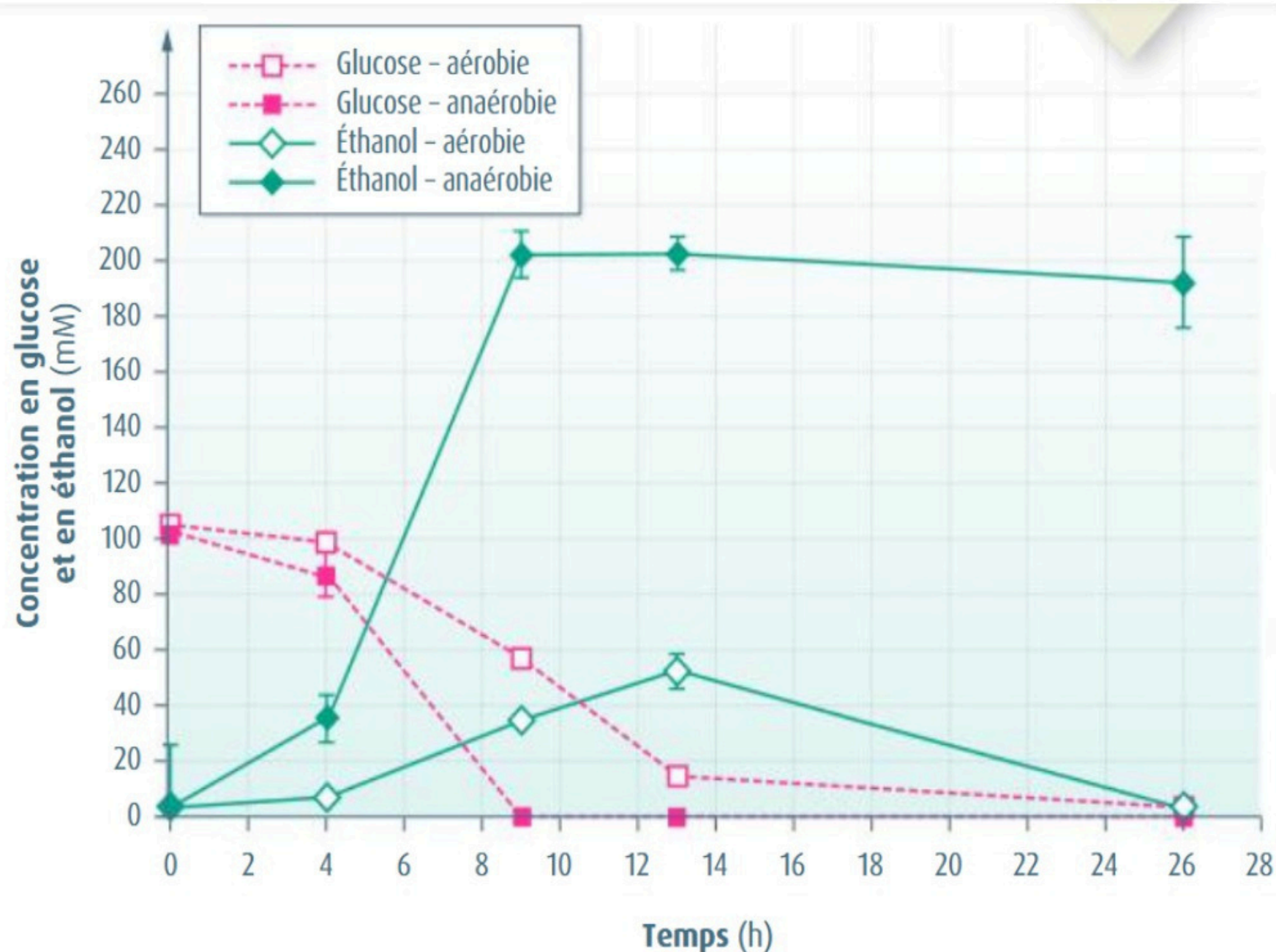
Besoins quotidiens en ATP : **83,6 moles d'ATP** (soit environ 46 kg)

Stock d'ATP d'un organisme : **environ 0,1 mole** (soit environ 50 g)

**donc renouvellement du stock environ 920 fois / jour
toutes les 1,5 minutes**

Source : <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/cellules-et-molecules/les-roles-de-l-atp>

Production d'ATP se réalise au cours de réactions qui consomment du **glucose**. A l'échelle cellulaire, on va considérer que la consommation du glucose est indicatrice d'une production d'ATP. Donc les conditions de consommation du glucose nous renseignent sur les conditions de production et donc de renouvellement de l'ATP dans les cellules.



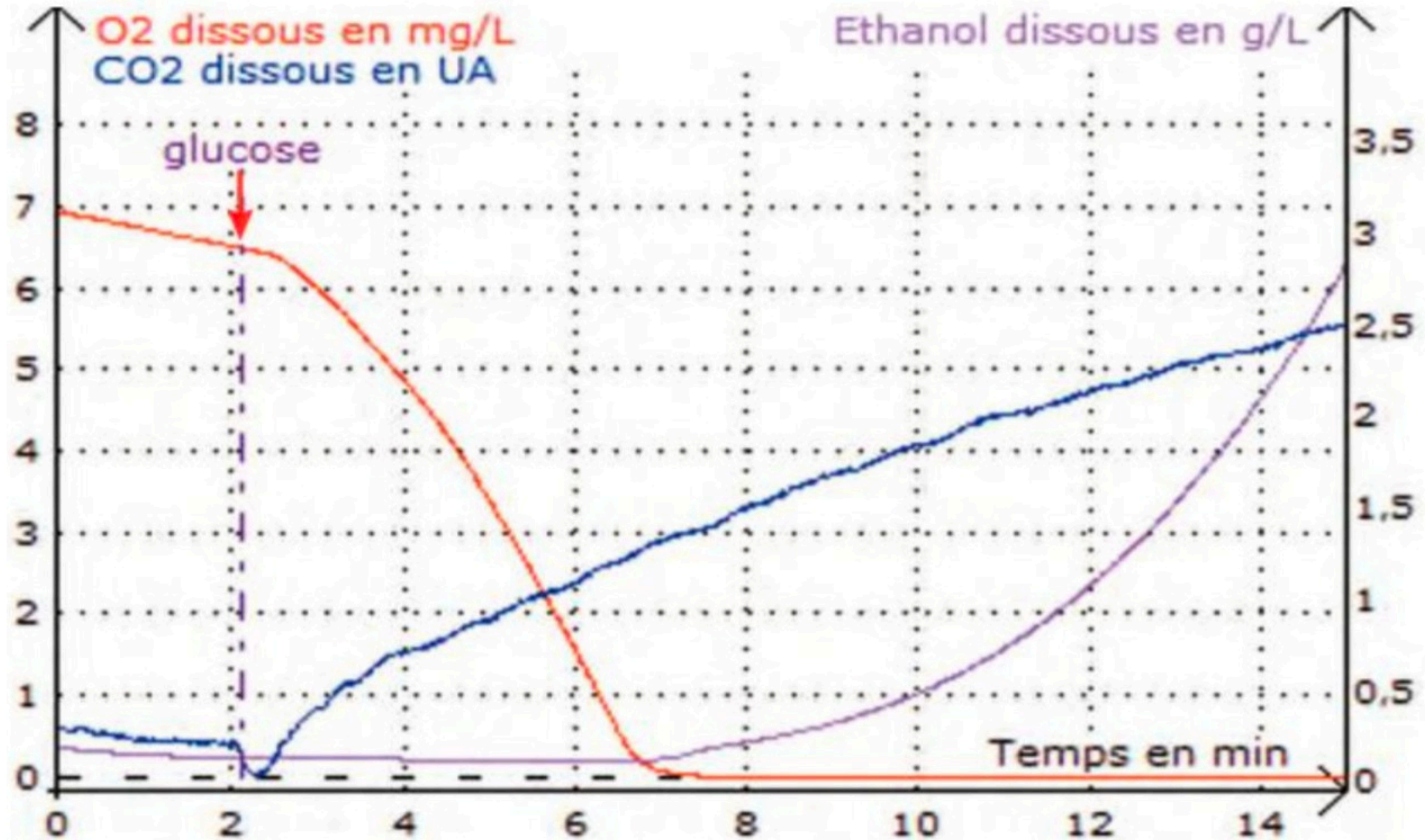
Conditions aérobies (avec O₂) :
consommation de glucose associée
à une faible production d'éthanol
respiration

Conditions anaérobies (sans O₂) :
consommation de glucose associée
à une forte production d'éthanol
fermentation

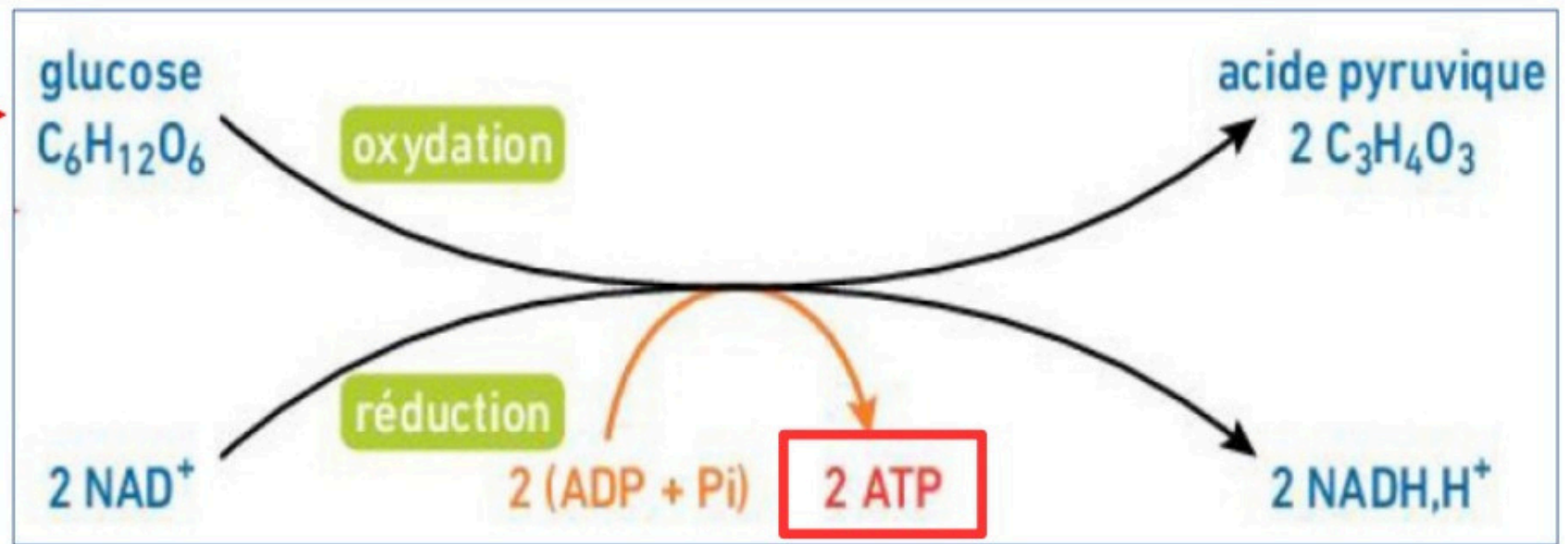
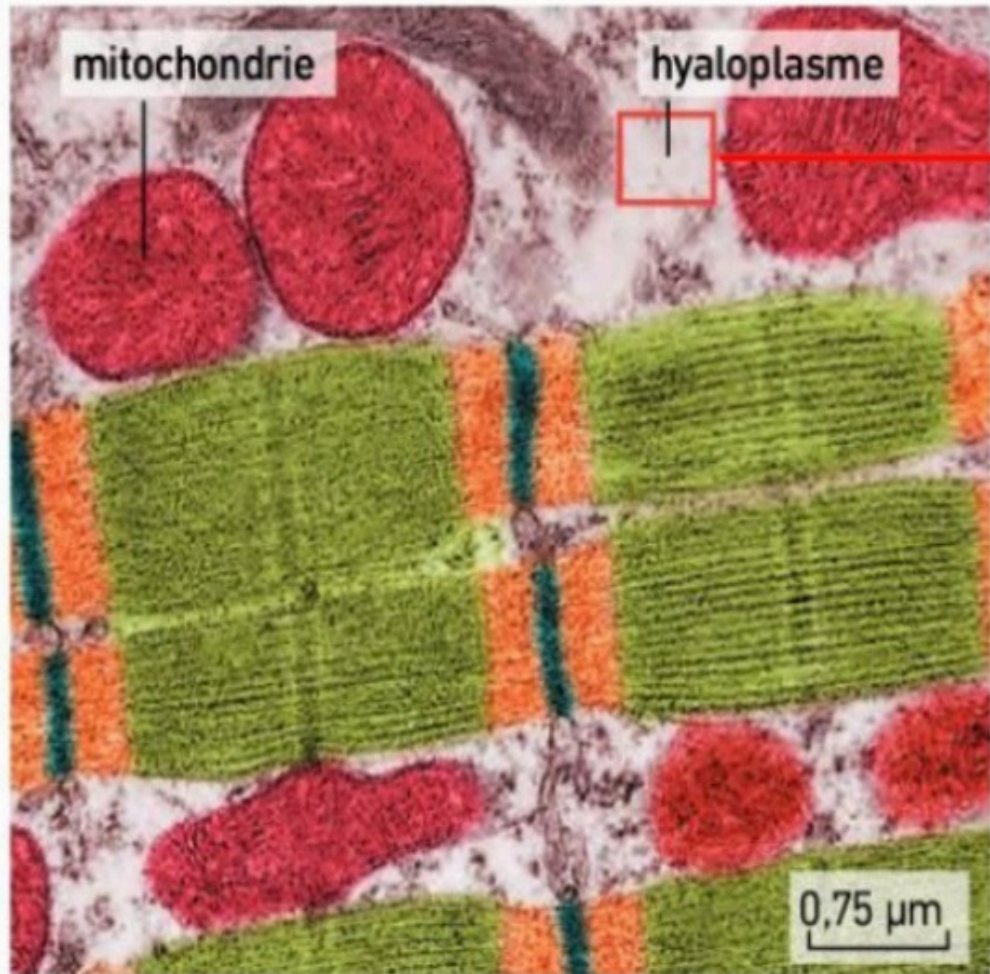
**Donc existence de deux voies
métaboliques consommant du
glucose et produisant de l'ATP**



ARGUMENT : Graphique illustrant le suivi de la concentration extracellulaire de glucose, de CO₂ et de dioxygène dans des suspensions de levures placées dans les conditions aérobie et anaérobie, avec et sans glucose.



1) La glycolyse, une 1ère étape dans le hyaloplasme



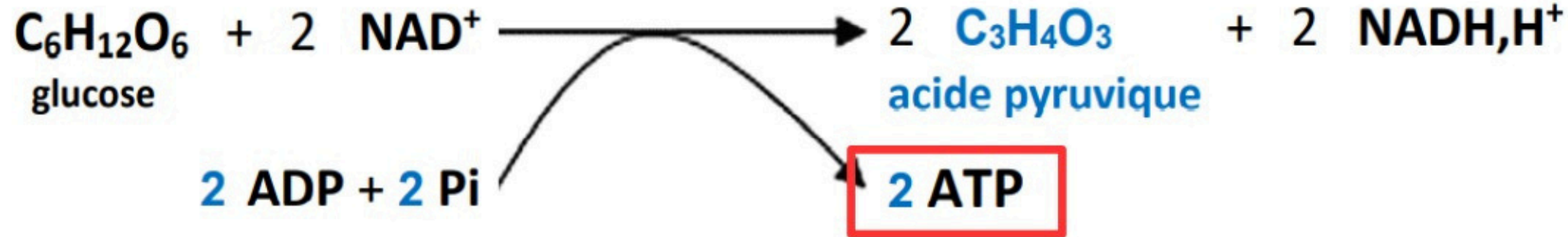
Oxydo-réduction entre le glucose et le NAD^+ :

- le glucose est oxydé en 2 molécules d'acide pyruvique
- les 2 molécules de NAD^+ sont réduites en 2 molécules de $NADH, H^+$

A Première étape : la glycolyse, dans le hyaloplasme (cellule musculaire observée au MET).

1e étape : **GLYCOLYSE**

Oxydation du glucose en **acide pyruvique**

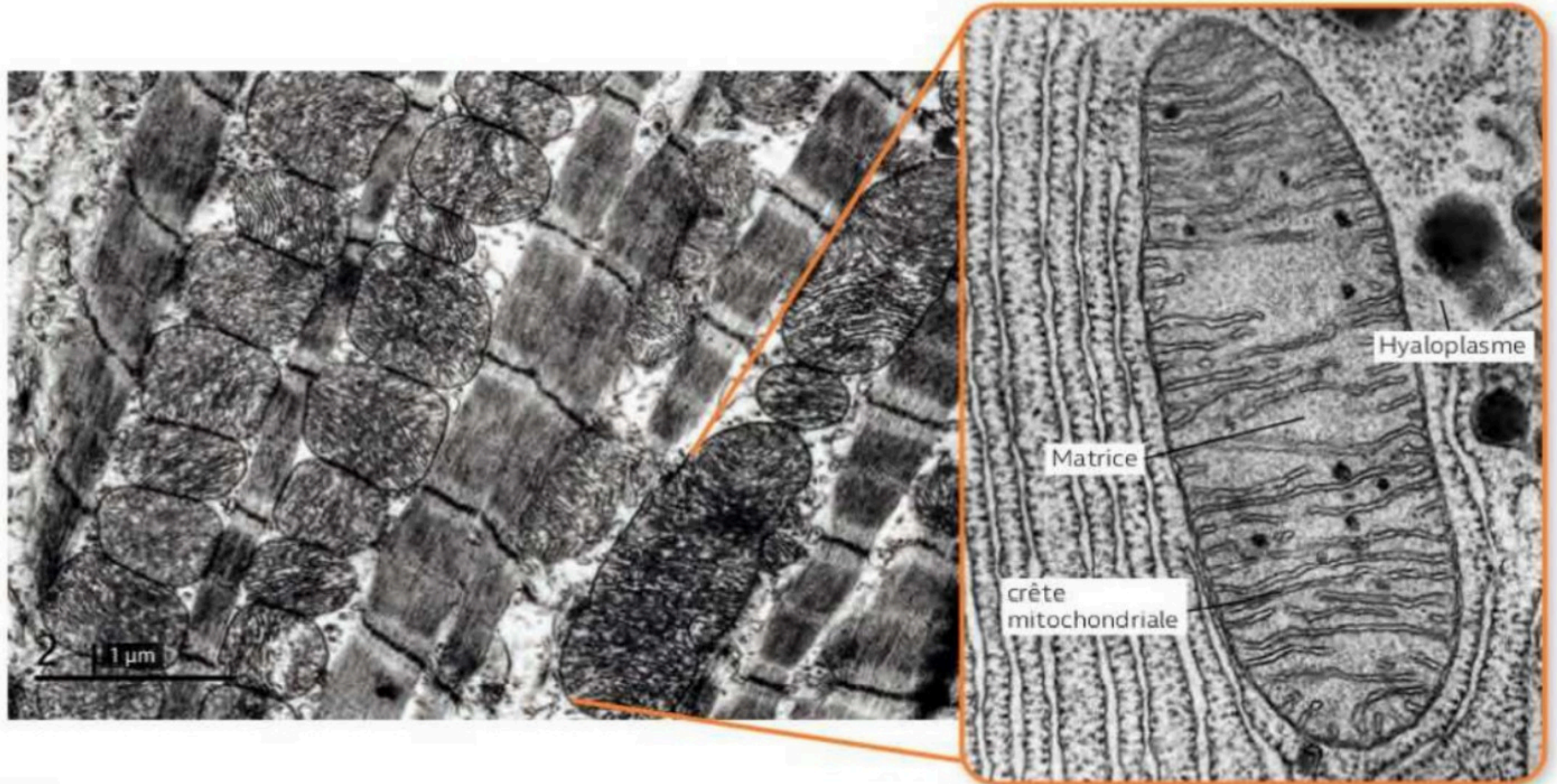


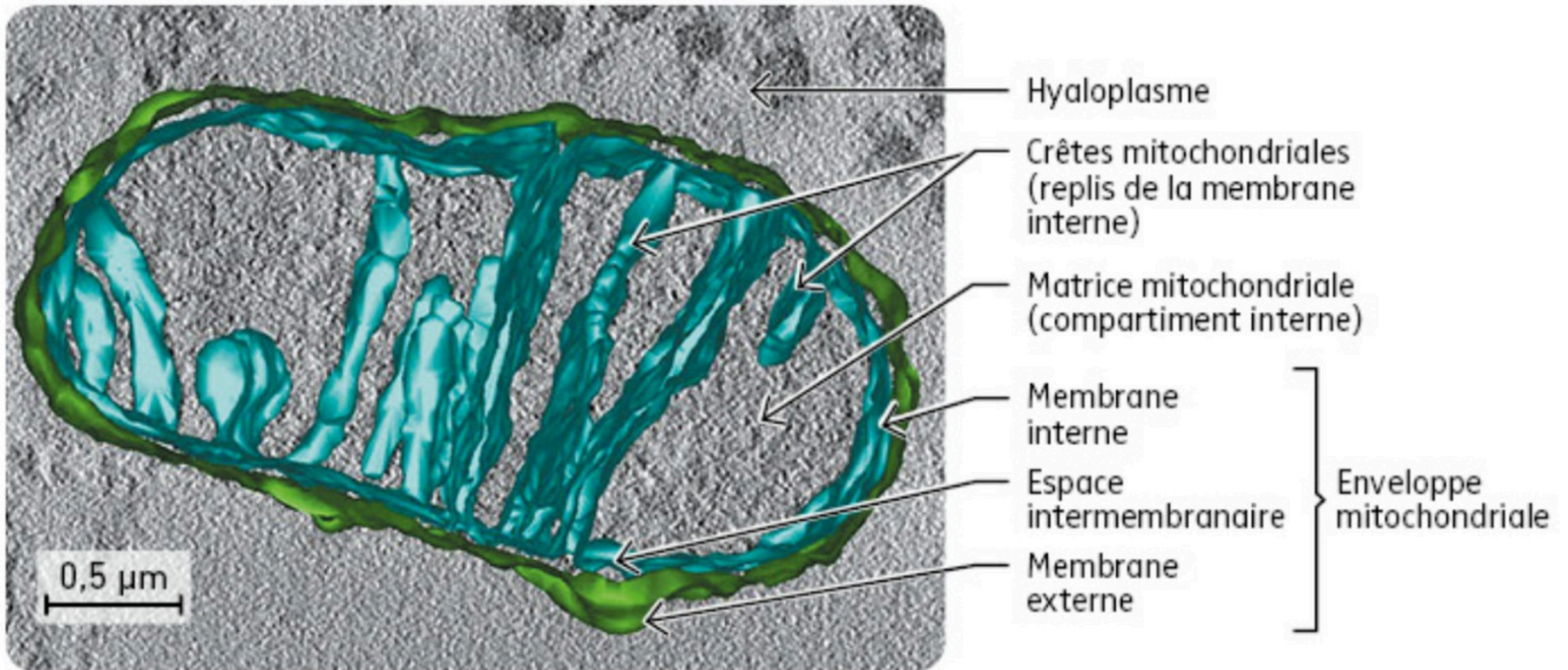
Localisation :

HYALOPLASME

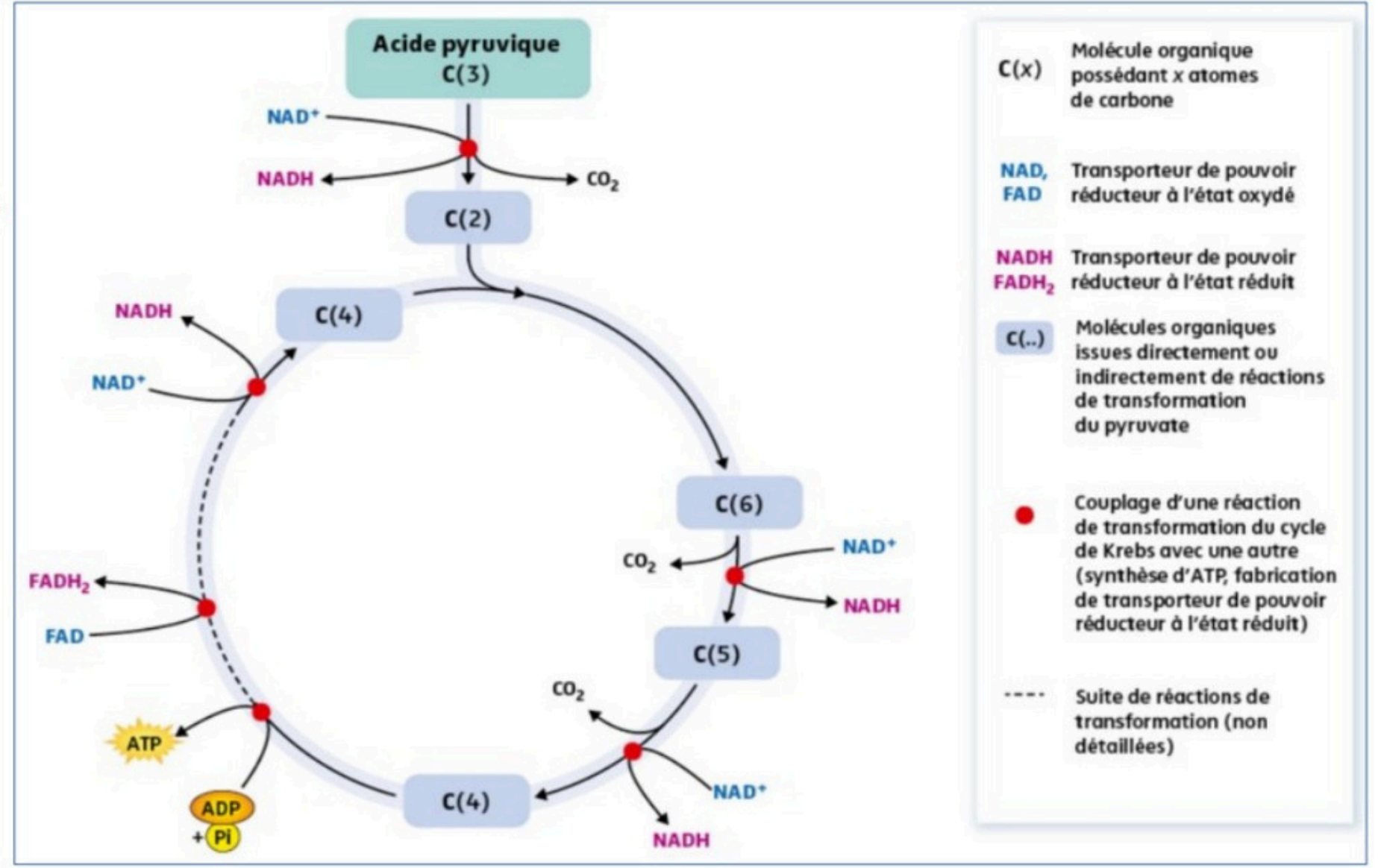
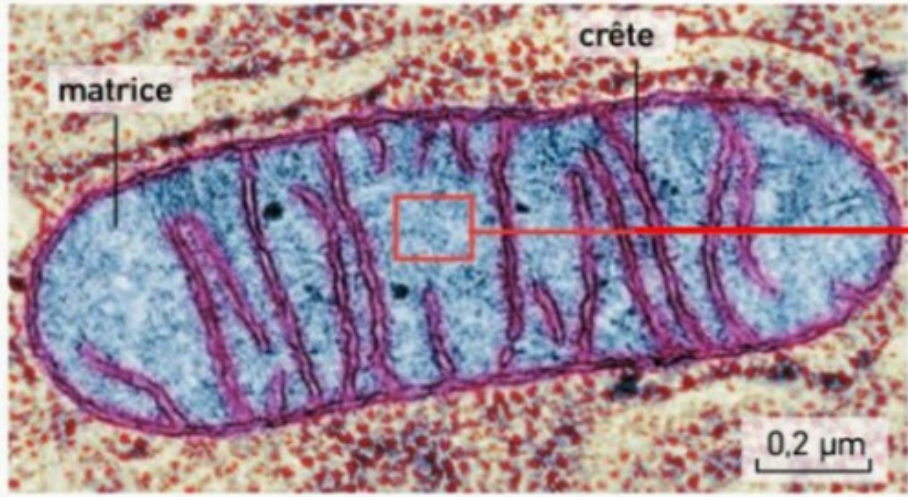
Le **NAD** est une petite molécule qui intervient dans le métabolisme comme **transporteur d'électrons dans les réactions d'oxydoréduction**, le **NAD⁺** comme **oxydant** (= qui capte les électrons) et le **NADH** comme **réducteur** (= qui cède les électrons).

2) Le cycle de Krebs, une 2ème étape dans la matrice mitochondriale





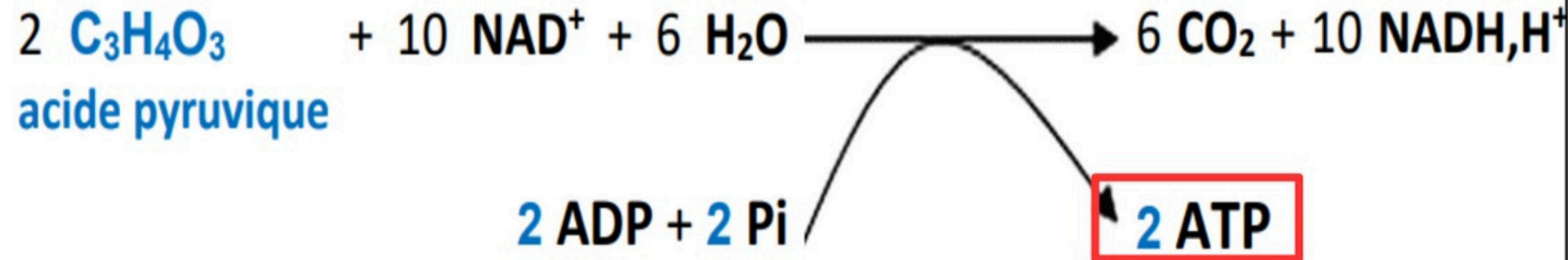
Document 5 : Ultrastructure d'une mitochondrie observée en tomographie électronique.



2e étape : **CYCLE DE KREBS**

Série de décarboxylations oxydatives avec production de composés réduits et d'ATP

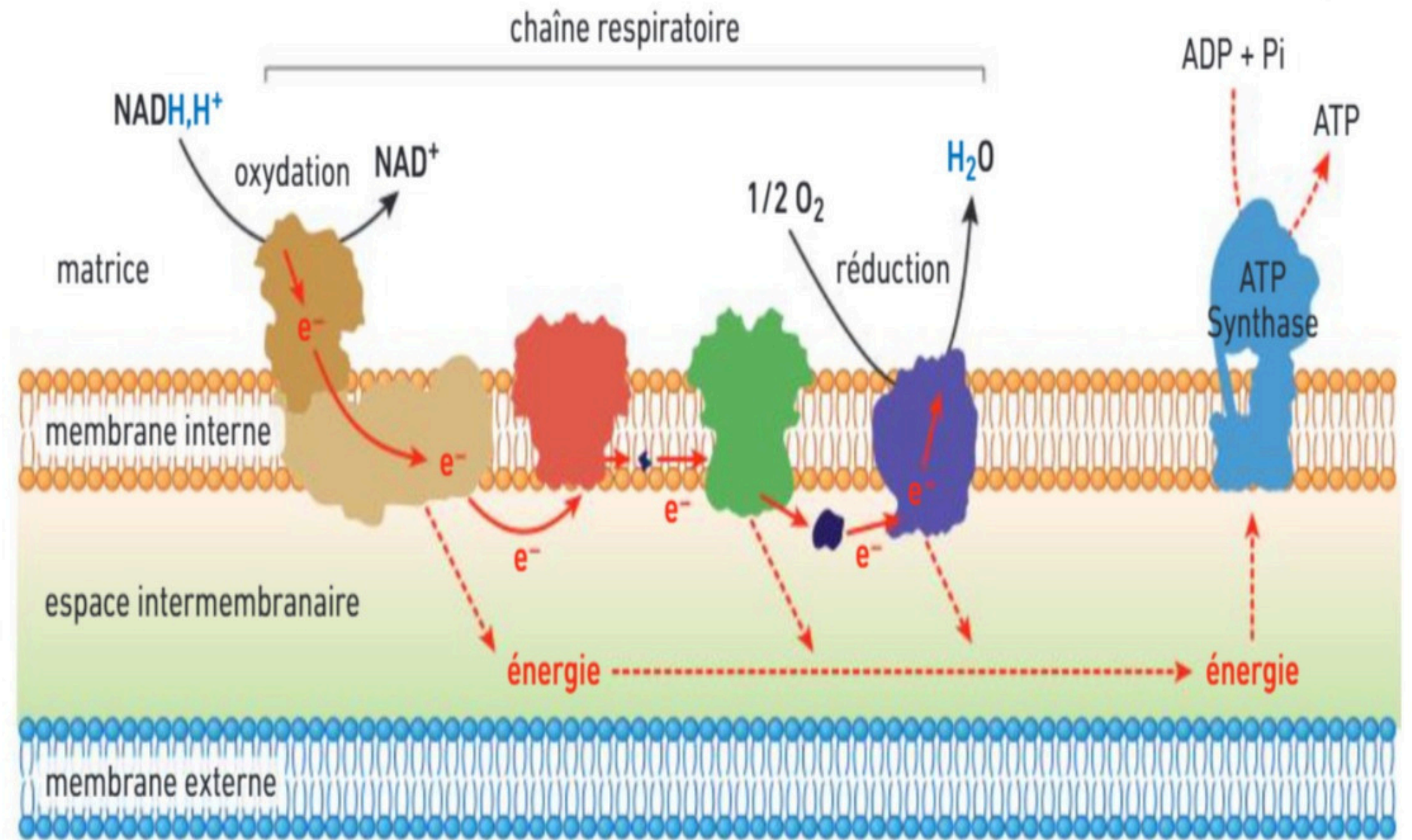
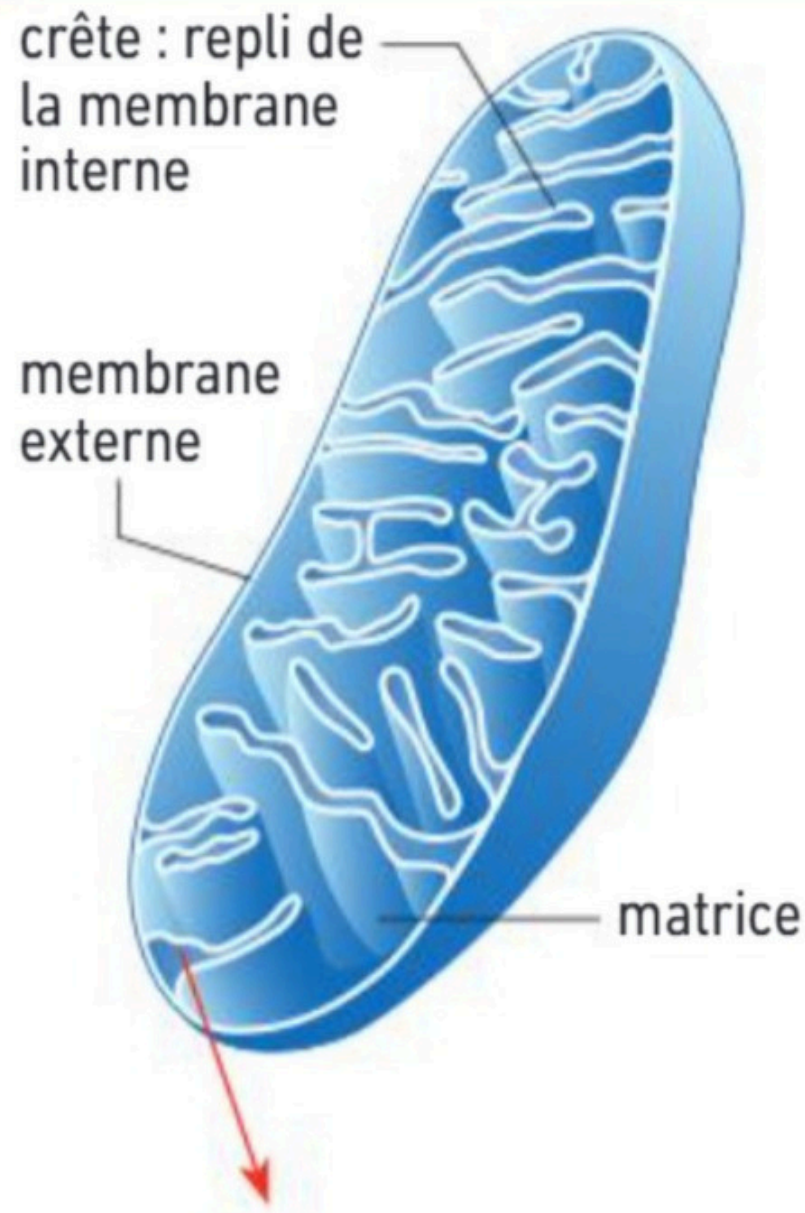
Décarboxylation totale : production d'un déchet, le CO_2 et formation de composés réduits (NADH, H^+).

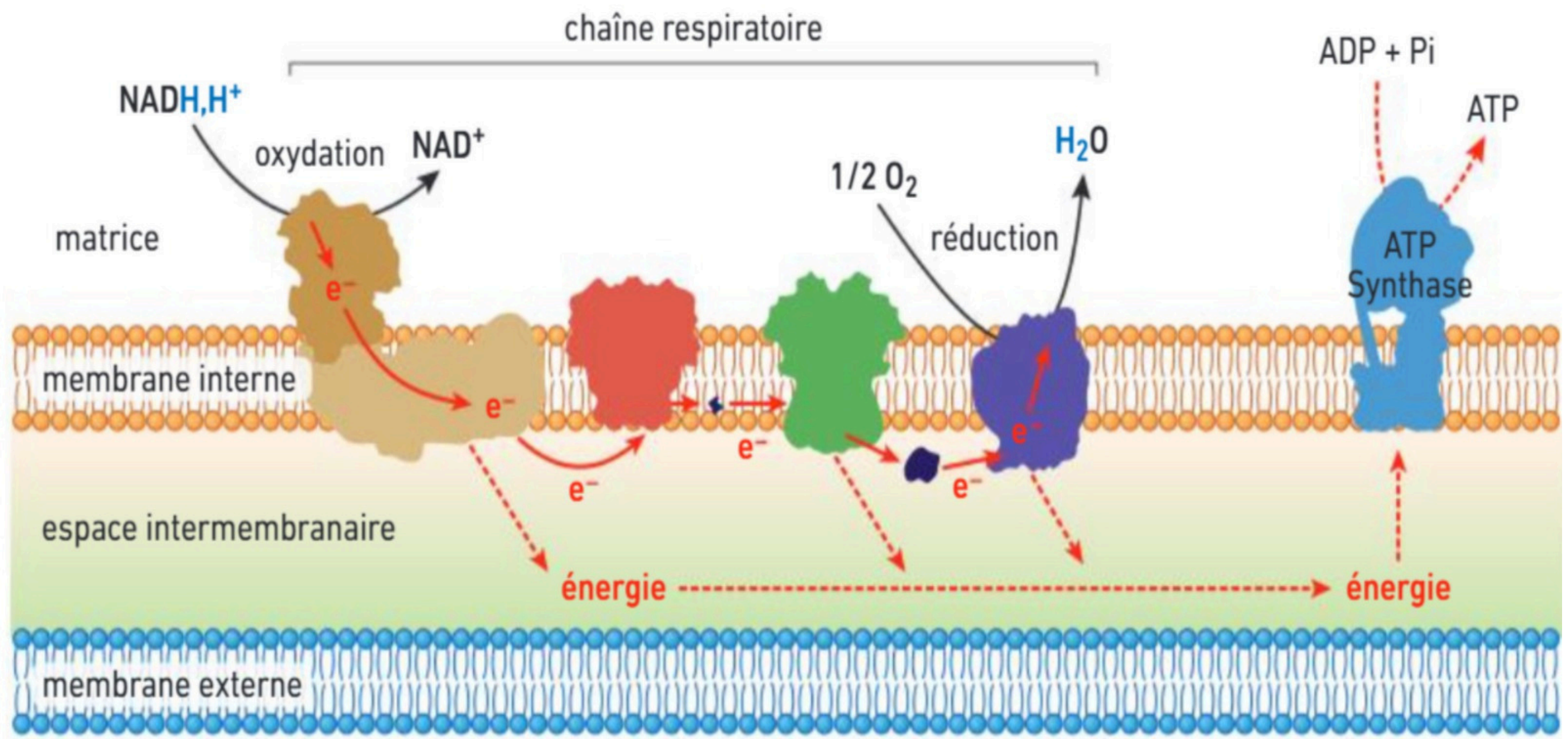


Localisation :

**MATRICE DE LA
MITOCHONDRIE**

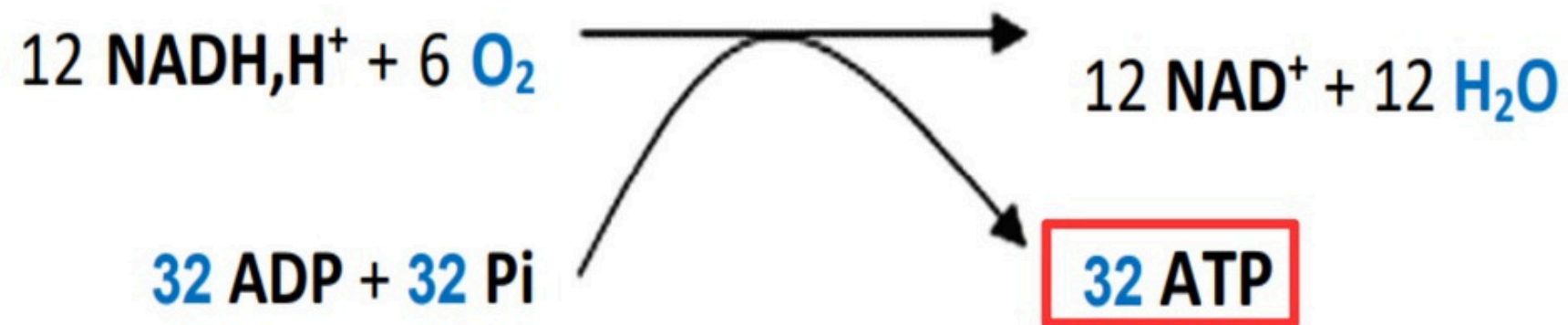
3) La chaîne respiratoire, une 3ème étape au niveau des crêtes de la membrane interne de la mitochondrie





3e étape : **OXYDATIONS AU NIVEAU DE LA CHAINE RESPIRATOIRE**

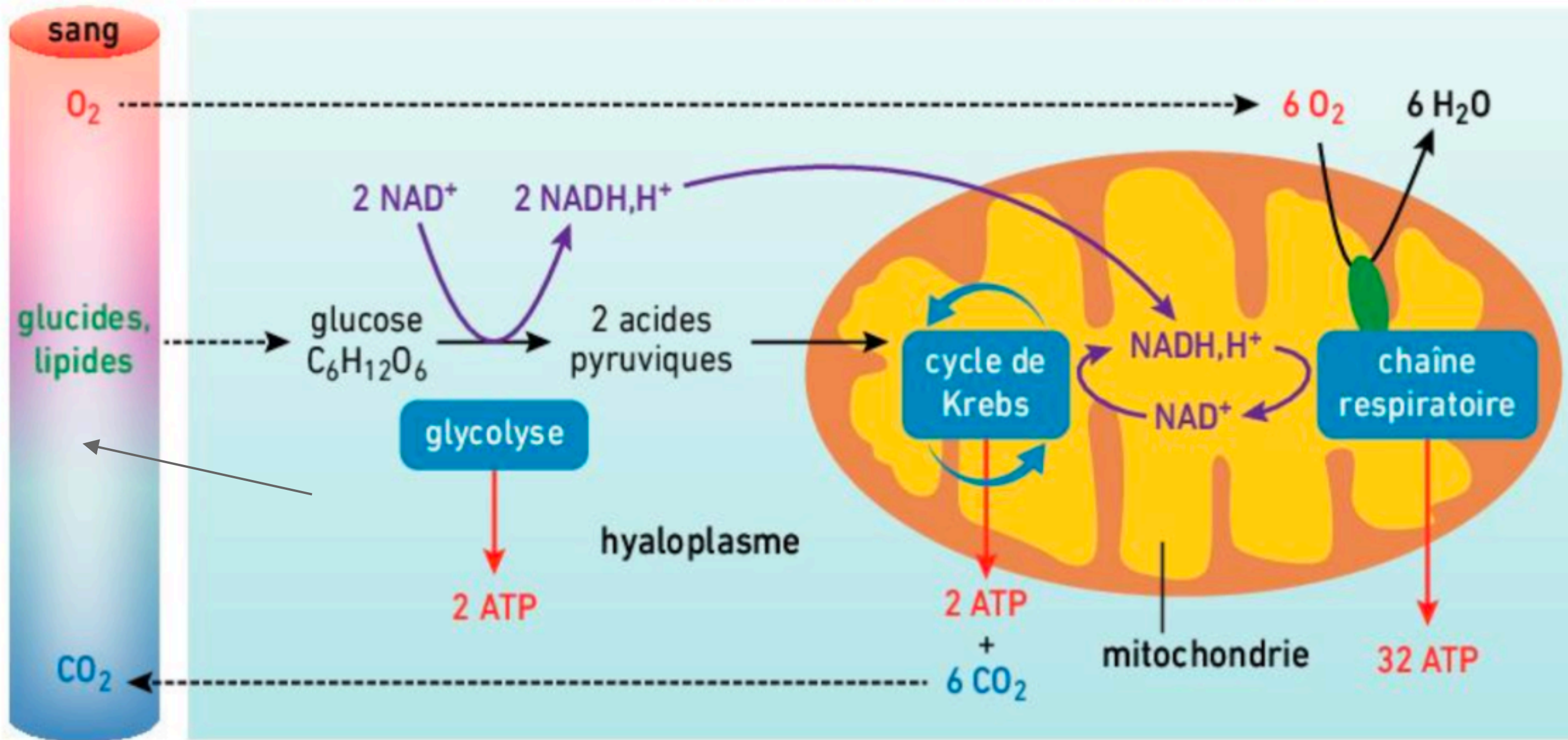
Oxydation par le dioxygène des composés réduits couplée à une importante production d'ATP



Localisation :

**CRETES
MITOCHONDRIALES
(MEMBRANE INTERNE
DE LA MITOCHONDRIE)**

Toutes ces réactions chimiques sont catalysées par des enzymes.



Document 6 : Schéma des différentes étapes de la respiration cellulaire.

Hyaloplasme d'une cellule musculaire

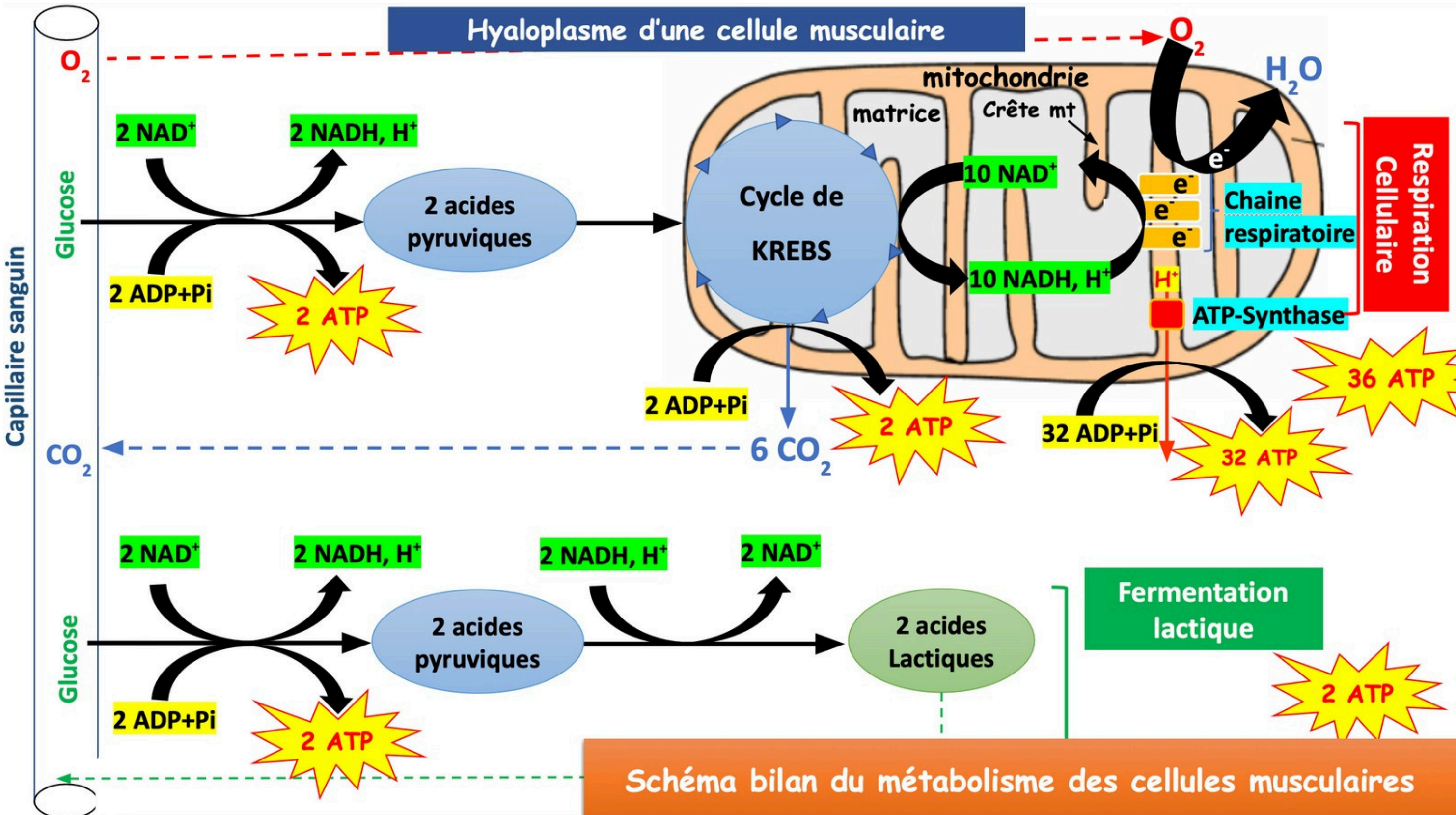


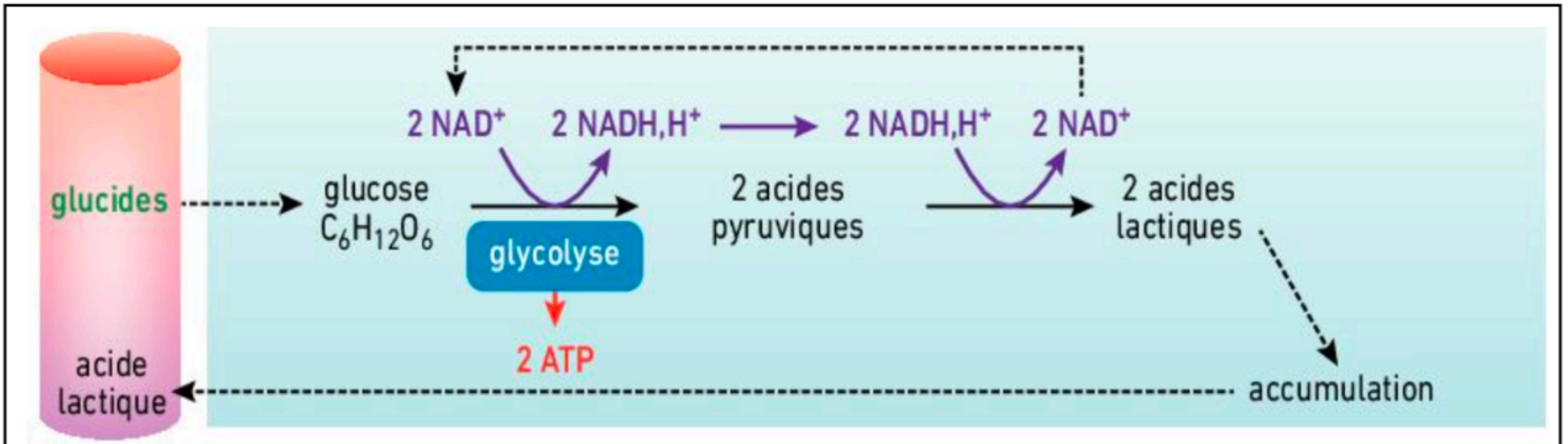
Schéma bilan du métabolisme des cellules musculaires

III. L'origine de l'ATP lors de la contraction musculaire

A) La respiration cellulaire (voie aérobie)

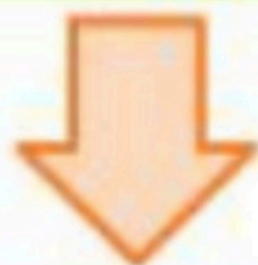
→ B) La fermentation lactique (voie anaérobie)





Document 7 : Schéma des étapes de la fermentation lactique.

glucose ($C_6H_{12}O_6$)
énergie potentielle
2 860 kJ par mole



6 CO₂ + 6 H₂O
énergie potentielle
0 kJ par mole

RESPIRATION

glucose ($C_6H_{12}O_6$)
énergie potentielle
2 860 kJ par mole



acide lactique ($C_3H_6O_3$)
énergie potentielle
1 330 kJ par mole

FERMENTATION

III. L'origine de l'ATP lors de la contraction musculaire

A) La respiration cellulaire (voie aérobie)

B) La fermentation lactique (voie anaérobie)

→ C) L'adaptabilité du muscle squelettique aux pratiques sportives





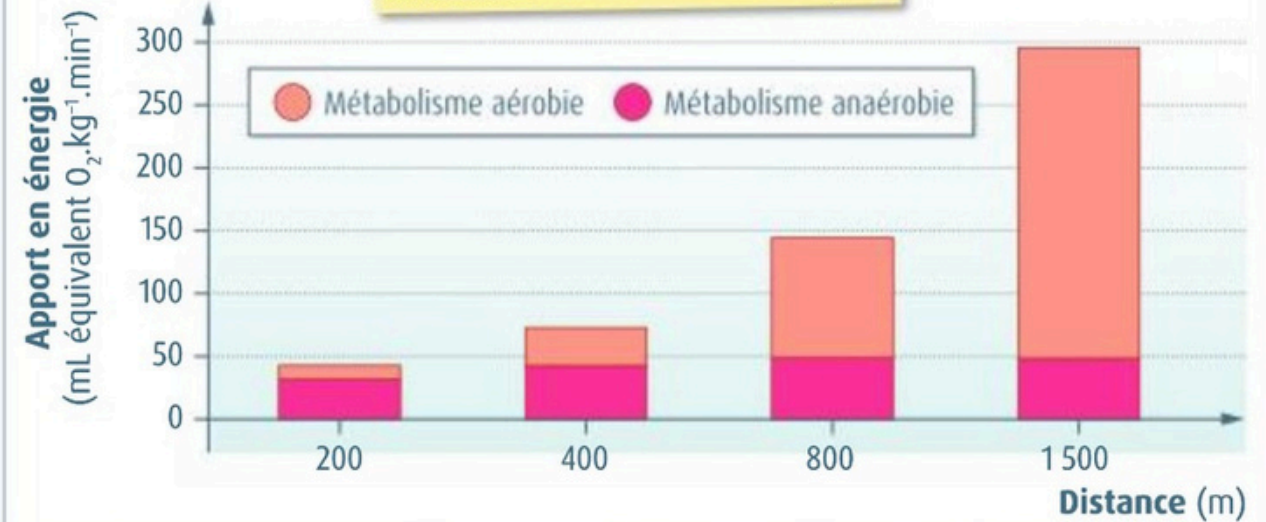
20 km de marche
en 1 h 15: **5625 kJ**



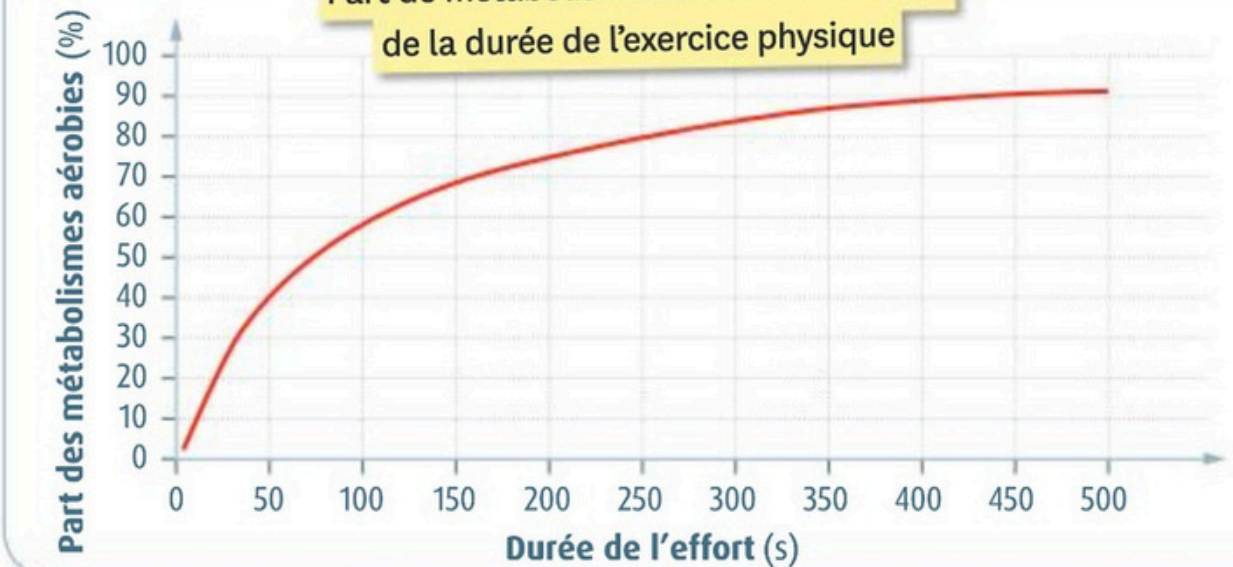
Course de 100 m
en 10 s: **130 kJ**

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

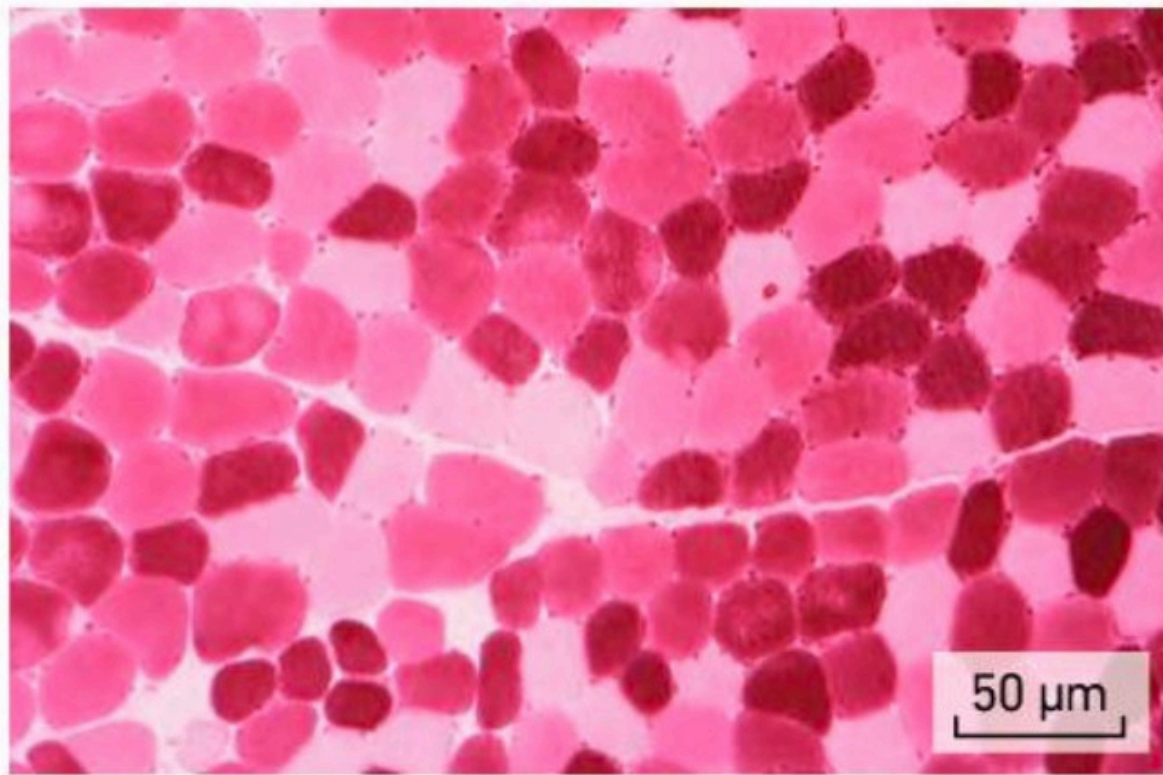
Type de métabolisme en fonction
de la distance d'une course à pied



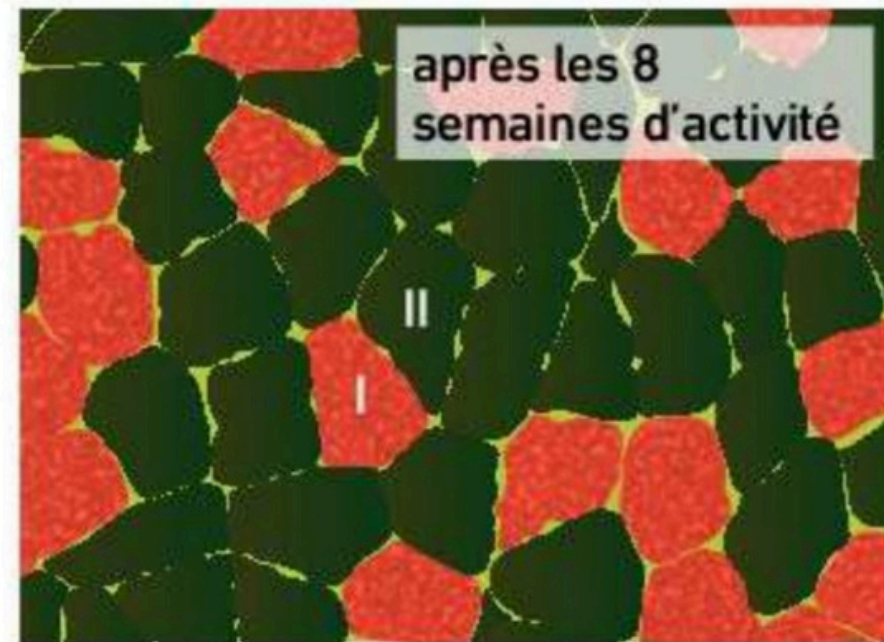
Part de métabolisme aérobie en fonction
de la durée de l'exercice physique



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

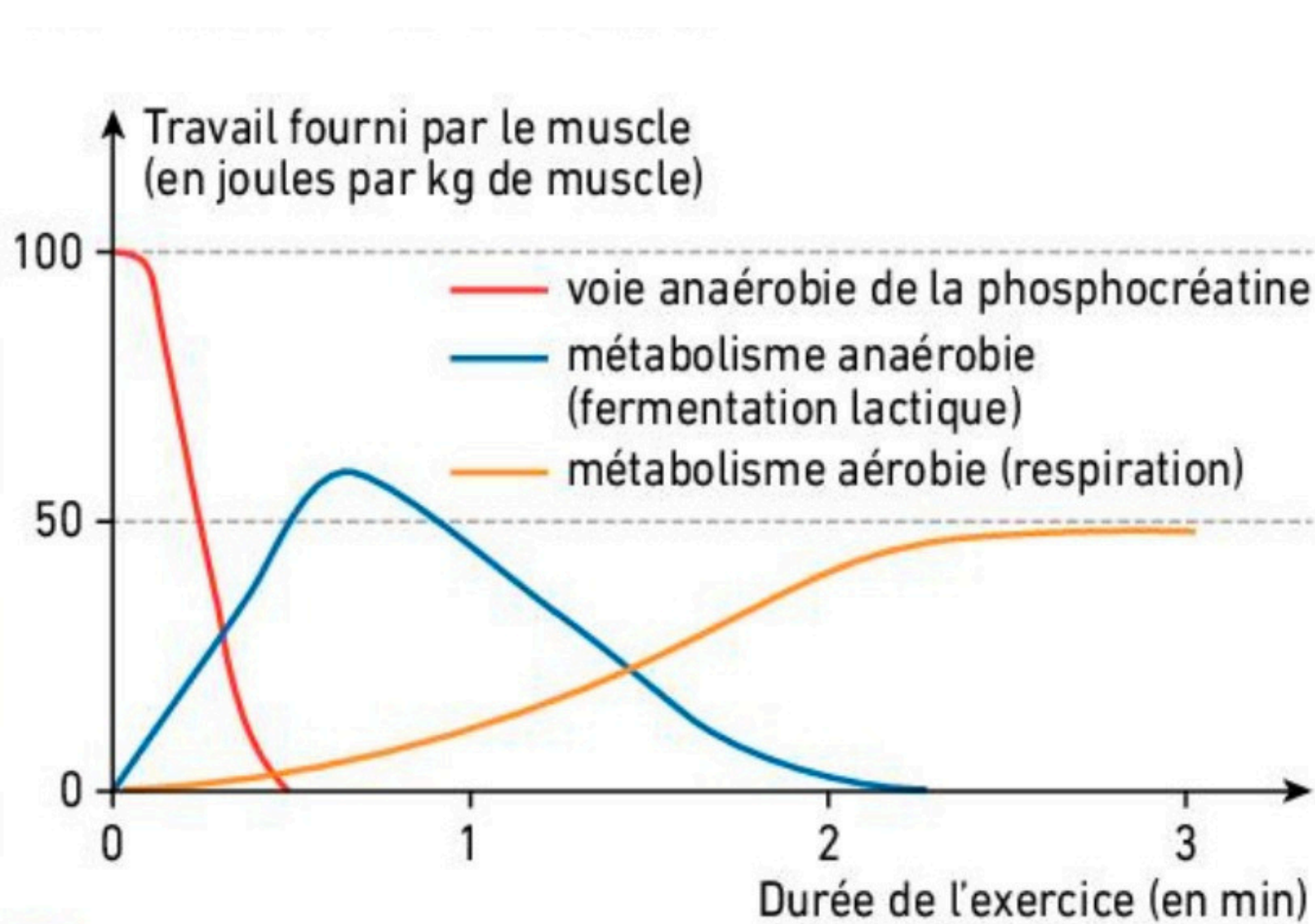


	Fibre de type I	Fibre de type II
Résistance à la fatigue	forte	faible
Vitesse de contraction	lente	rapide
Richesse en mitochondries	élevée	faible
Teneur en enzymes de la fermentation lactique	faible	moyenne à élevée
Irrigation sanguine	forte	faible
Teneur en glycogène*	faible	élevée

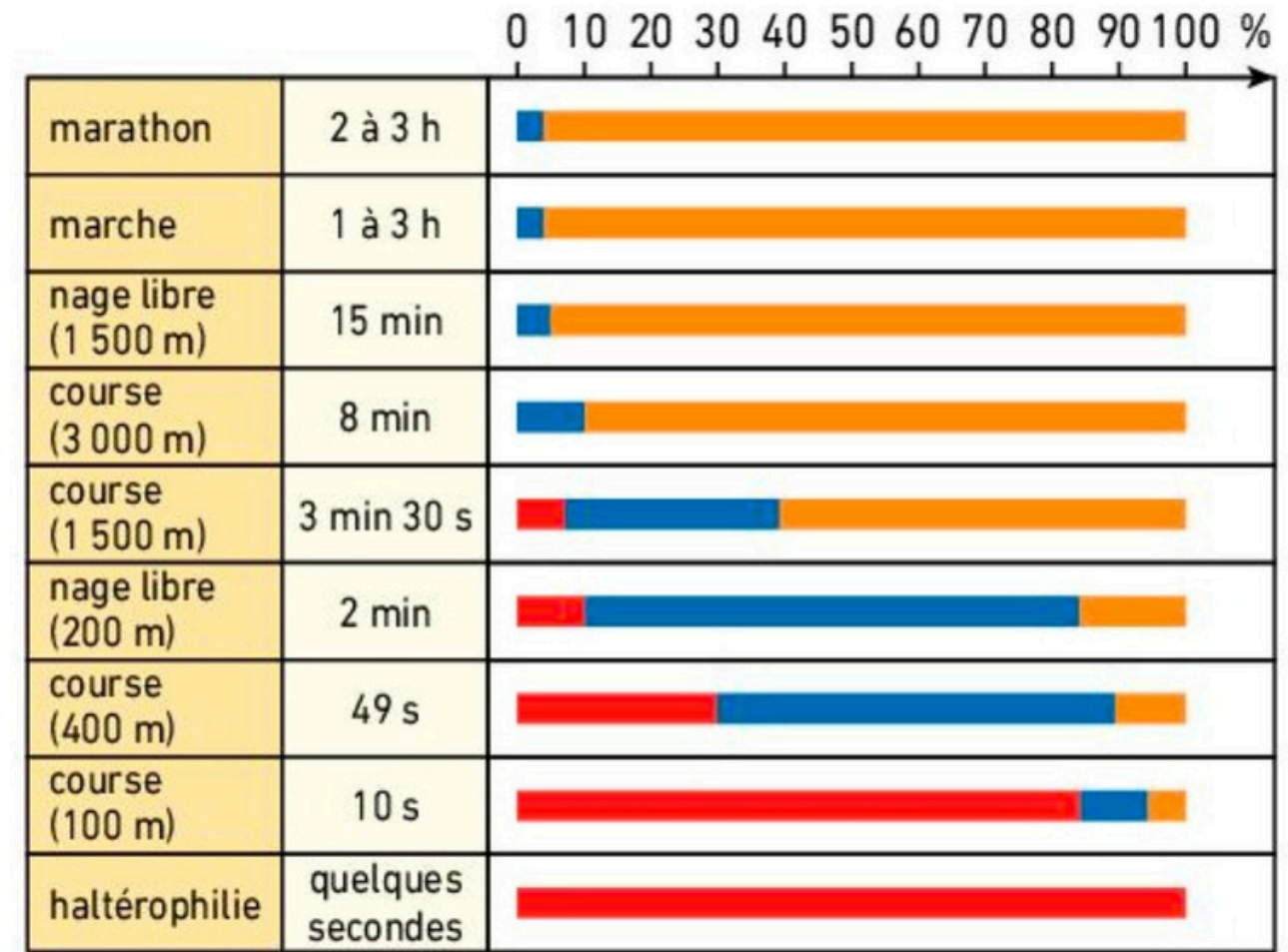


A Biopsies révélant les types de fibres (coupe transversale).

200 μm

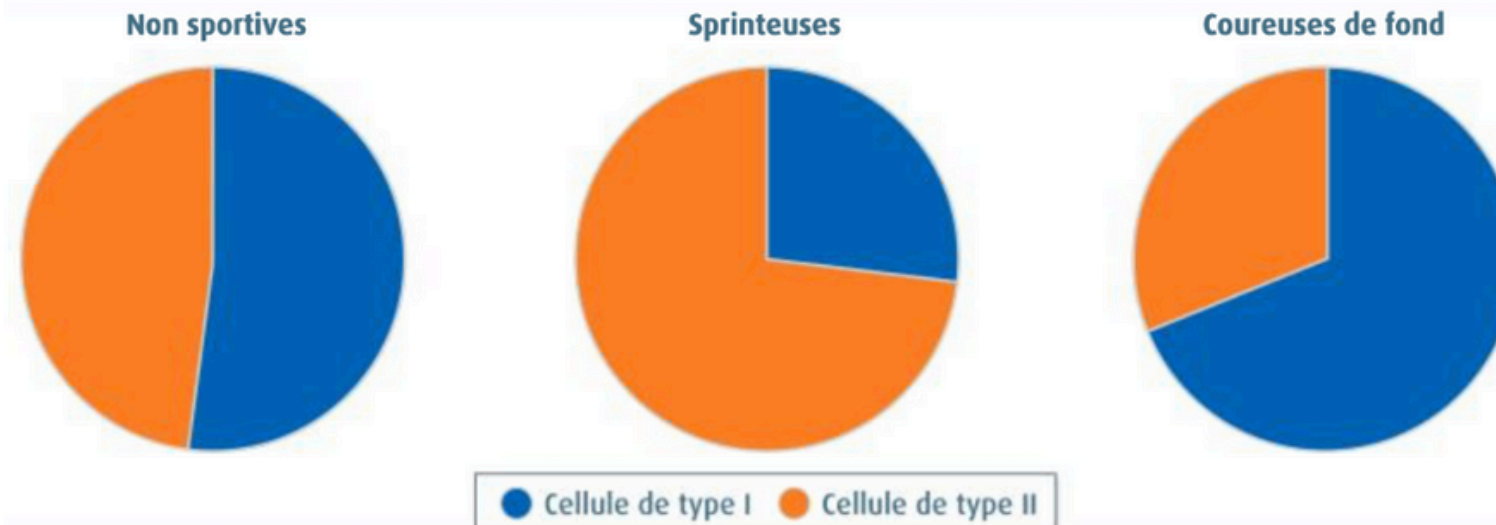


C Intervention des voies métaboliques au cours d'un effort musculaire.



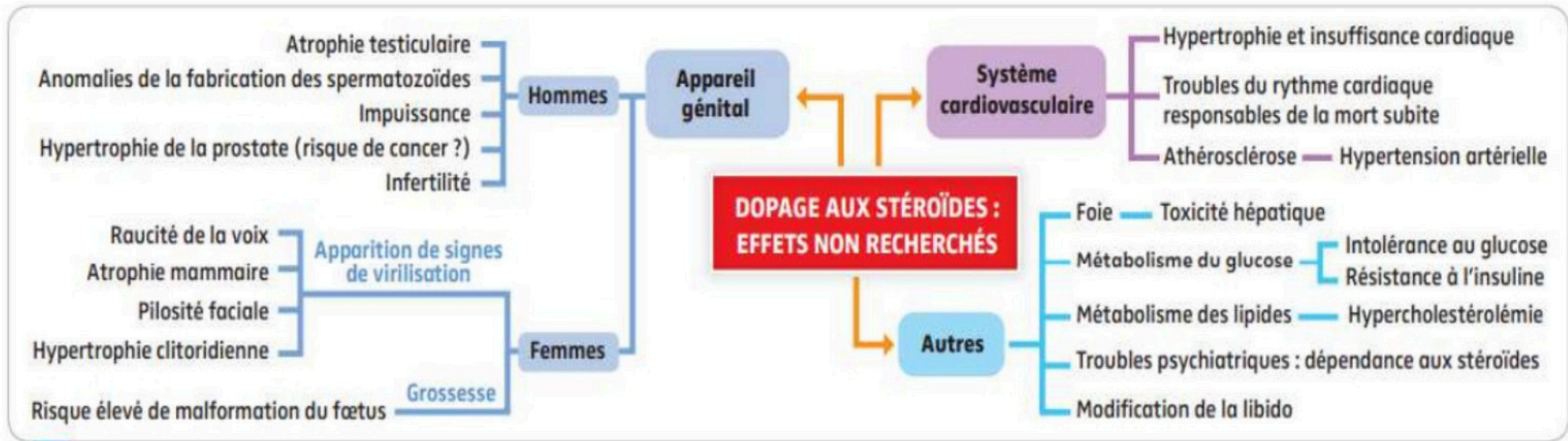
■ voie anaérobie de la phosphocréatine
 ■ métabolisme anaérobie (fermentation lactique) ■ métabolisme aérobie (respiration)

D Parts respectives des voies métaboliques en fonction du type d'effort.



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

Document 8 : Tableau comparatif des 2 types de fibres musculaires en fonction du type d'effort.



Effets non recherchés du dopage aux stéroïdes. Cette liste d'effets compile des résultats de recherches scientifiques.

Échantillon	Catégories de poids	Classements dans la discipline	Mortalité (en nombre d'individus et en %)	Causes (et nombre)
62 hommes (origine : Finlande)	82,5 kg – 125 kg	Rangs 1 à 5 lors des championnats de Finlande entre 1977 et 1982	8 (12,9 %)	Suicide (3) Infarctus du myocarde (3) Coma hépatique (1) Cancer du système lymphatique (1)

Étude sur des haltérophiles soupçonnés d'utilisation de stéroïdes. L'étude menée sur 12 ans a déterminé la cause des décès prématurés parmi un groupe de sujets fortement soupçonnés d'avoir utilisé des stéroïdes anabolisants pendant plusieurs années à des fins non médicales. La mortalité a été comparée au reste de la population finlandaise, qui était de 3,1 % à l'époque.



Bilan : Le déroulement de la respiration cellulaire La respiration débute dans le cytoplasme par la glycolyse et se poursuit dans la matrice des mitochondries par le cycle de Krebs : ces réactions produisent du CO_2 , des composés réduits NADH , H^+ et une petite quantité d'ATP. Au niveau des crêtes mitochondriales, les composés réduits sont oxydés par les molécules de la chaîne respiratoire. Le dioxygène intervient en bout de chaîne, en tant qu'accepteur final des électrons et de l'hydrogène pour former de l'eau.

Ces oxydoréductions successives permettent de produire de grandes quantités d'ATP. Les cellules musculaires peuvent produire de l'ATP par une autre voie métabolique, la fermentation lactique. Cette autre voie est plus rapide, ne nécessite pas de dioxygène mais produit beaucoup moins d'ATP.



Bilan : Les métabolismes anaérobie (fermentation lactique) ou aérobie (respiration) dépendent du type d'effort à fournir : la fermentation intervient surtout dans les exercices courts et puissants, al res- piration exige un apport suffisant en dioxygène durant l'effort physique et permet l'endurance. Des substances exogènes peuvent augmenter la masse musculaire, ou stimuler le métabolisme. Les produits dopants ont des effets parfois très graves sur la santé.

Saisir quelque chose