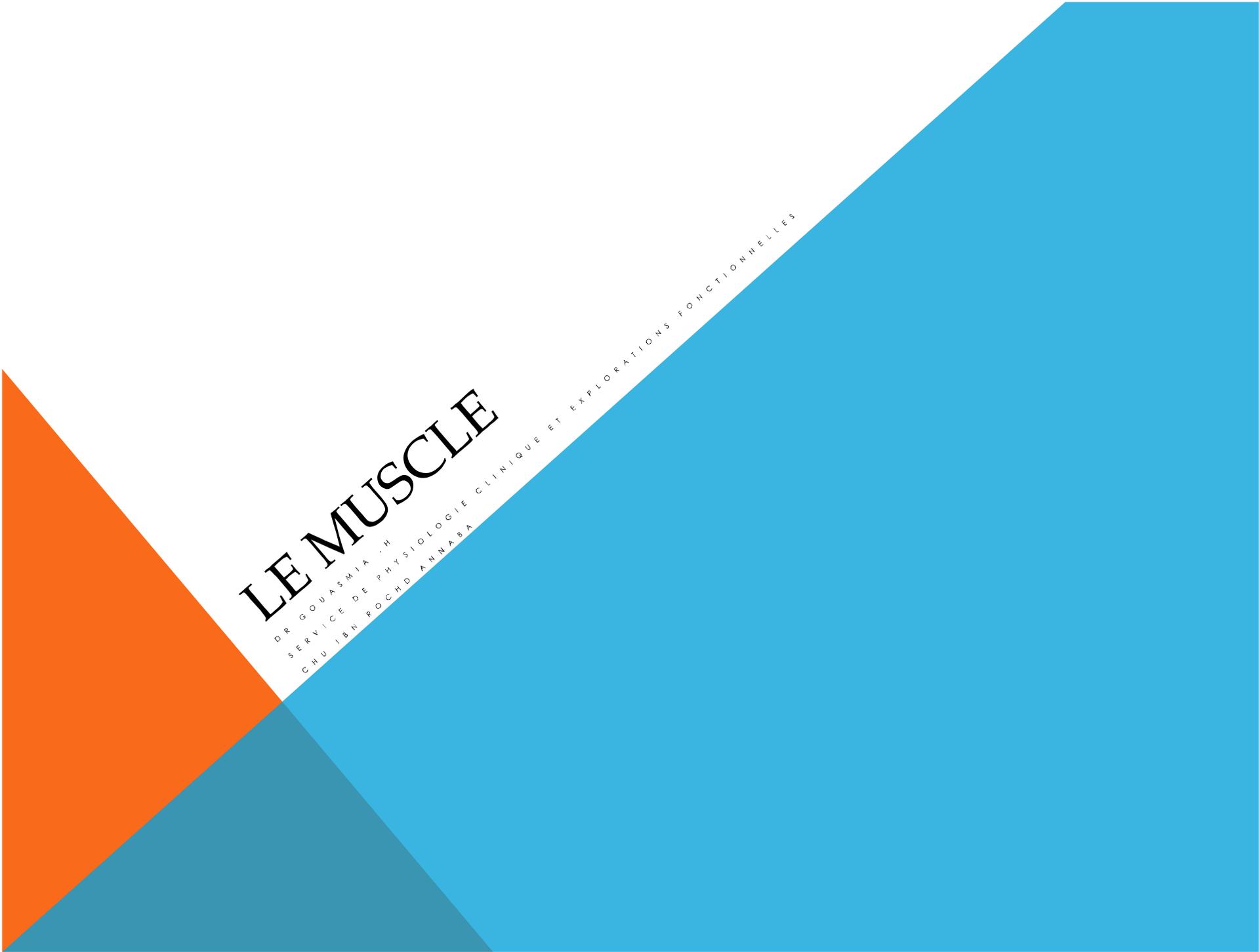


LE MUSCLE

DR GOUASMIA . H
SERVICE DE PHYSIOLOGIE CLINIQUE ET EXPLORATIONS FONCTIONNELLES
CHU IBN ROCHD ANNABA



PHYSIOLOGIE MUSCULAIRE

LE PLAN

1. INTRODUCTION
2. LES TYPES DES MUSCLES
3. LES FONCTIONS ESSENTIELLES DES MUSCLES
4. LA MOTRICITÉ SOMATIQUE
5. ANATOMIE MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE DU MUSCLE SQUELETTIQUE
6. LA FIBRE MUSCULAIRE
7. L'ANATOMIE FONCTIONNELLE DU MUSCLE SQUELETTIQUE
8. L'UNITÉ MOTRICE
9. MÉCANISMES GÉNÉRAL DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE
10. LES ASPECTS MÉCANIQUE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE
11. LES ASPECTS MÉTABOLIQUE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE
12. CONCLUSION

I) INTRODUCTION

le muscle est un organe composé de tissu musculaire et de tissu conjonctive (vaisseaux sanguin +nerfs)

40-50% de la masse corporelle totale.

10 % est occupé par les muscles lisse

25% de la dépense énergétique au repos ↑ à l'exercice

Pouvoir de transformer une énergie chimique en énergie mécanique

les muscles sont capables d'exercer une force. On peut considérer les muscles comme les moteurs de l'organisme.

TROIS TYPES DE MUSCLES

On distingue trois types de muscles dans le corps : le muscle cardiaque (myocarde), les muscles lisses, et les muscles squelettiques.

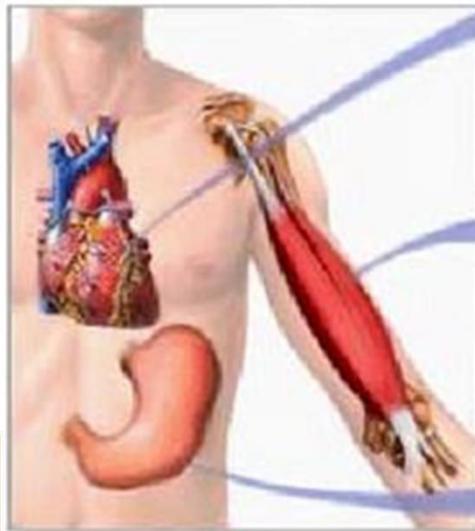
Le muscle cardiaque assure les fonctions vitales du cœur. Il se contracte de manière régulière, et est continuellement actif. Ils ont un caractère d'autorhythmicité. Et une régulation du système nerveux neurovégétatif

Les muscles lisses composent de structures viscérales absence de striations transversales contraction involontaire, contrôlée par le système nerveux autonome et certaines hormones

Les muscles squelettiques, assurent la motricité et le maintien du corps. Ils sont reliés au squelette via les tendons, et sont innervés par les neurones moteurs du système nerveux périphérique. Les muscles squelettiques, contrairement aux muscles lisses, peuvent être contractés de manière volontaire (plier le bras, lever la jambe...).

myocytes

fibres musculaires



Cellule musculaire
cardiaque



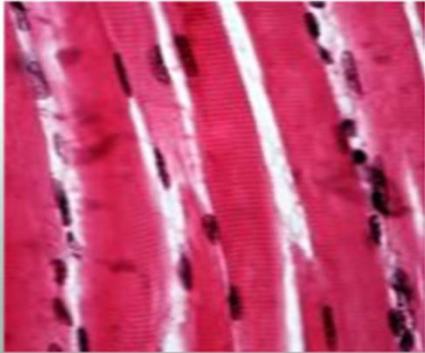
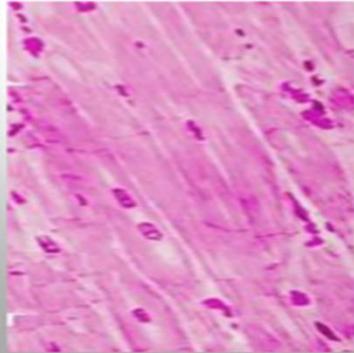
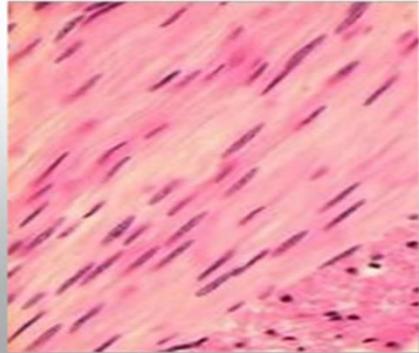
Cellule musculaire
squelettique



Cellule musculaire
lisse

1. Tissu musculaire
squelettique
2. Tissu musculaire
cardiaque
3. Tissu musculaire
lisse

TYPES DE TISSU MUSCULAIRE

	Squelettique	Cardiaque	Lisse
Apparence			
Strié	Oui	Oui	Non
Localisation	Recouvre le squelette osseux et s'y attache	Coeur	Dans les parois des organes viscéraux (estomac, vessie) et les organes des voies respiratoires
Volontaire ou involontaire ?	Volontaire	Involontaire	Involontaire
Contraction ...	Peut se contracter rapidement mais se fatigue facilement	Se contracte à un rythme relativement constant	Contractions lentes et continues (ne se fatigue pas)

III) FONCTIONS ESSENTIELLES DES MUSCLES

1. Production du mouvement
 2. Maintien de la posture
 3. Stabilisation de l'articulation
 4. Dégagement de chaleur
- 

VI) LA MOTRICITÉ SOMATIQUE

- C'est l'ensemble des contractions des muscles striés ,orchestrées par le système nerveux ,qui permettent l'élaboration du comportement
- Motricité somatique ≠ motricité viscérale

La force de contraction exercée par les muscles qui fait pivoter les os autour de leurs articulations.

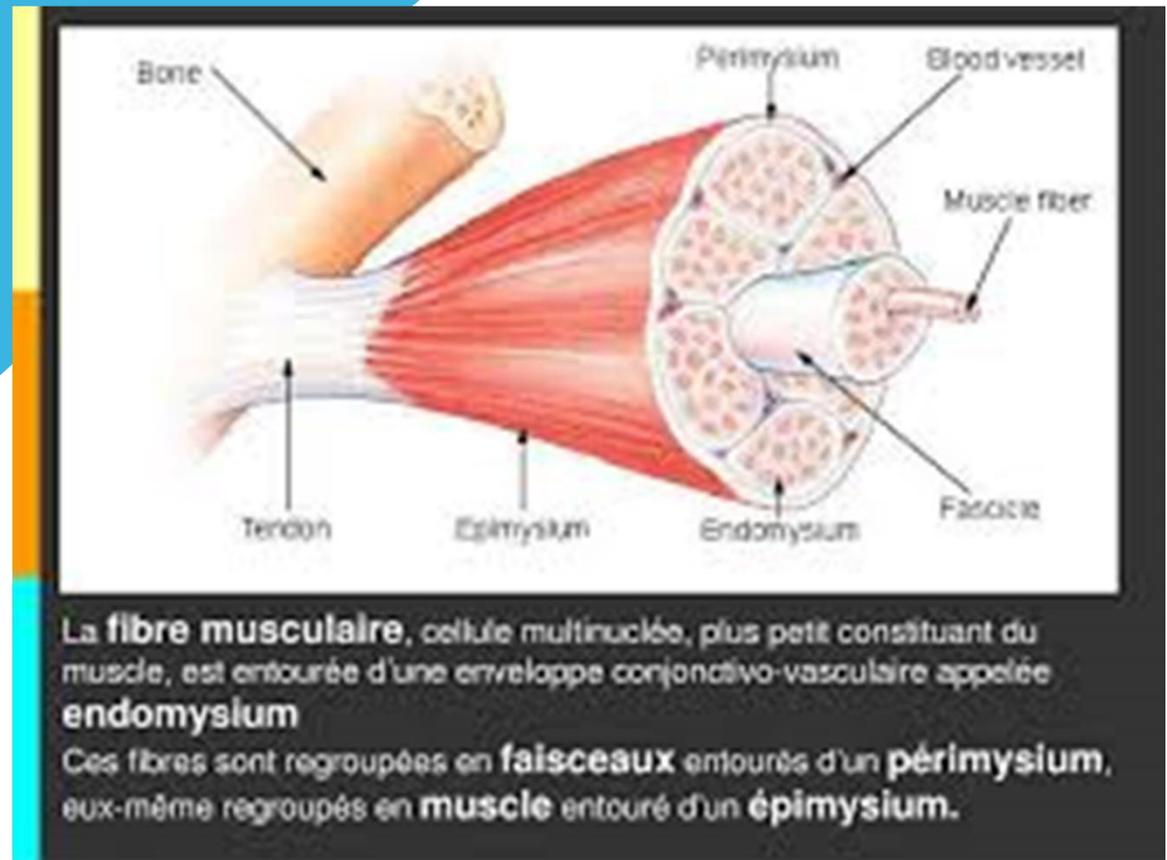
Les muscles peuvent être fléchisseurs ou extenseurs

Antagonistes ou agonistes

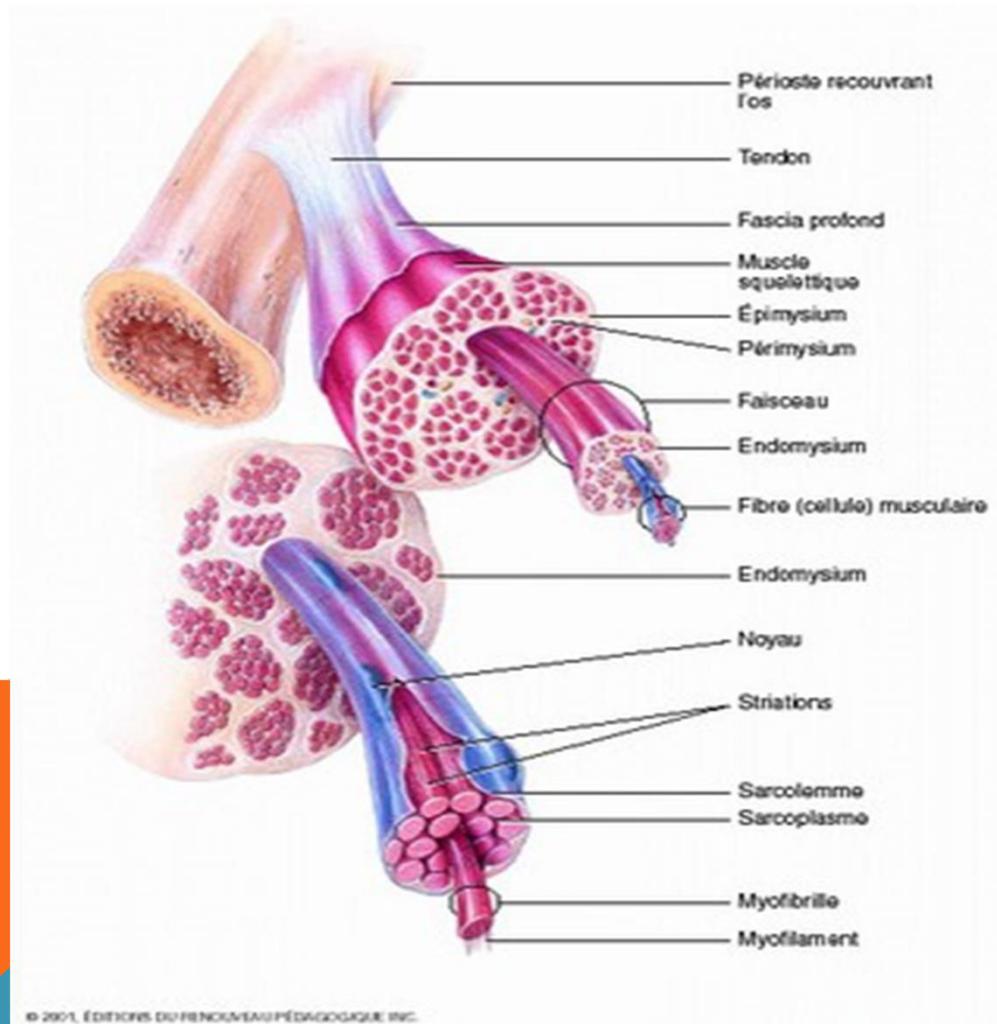


V) LE MUSCLE SQUELETTIQUE

Le tissu musculaire squelettique se présente sous forme de muscles qui recouvrent le squelette osseux et s'y attachent grâce des tendons qui sont constitués essentiellement de tissu conjonctif fibreux, élastique et solide



V. ANATOMIE MACROSCOPIQUE



Tissu conjonctif constitué par

:

Fascia superficiel ou hypoderme, sépare le

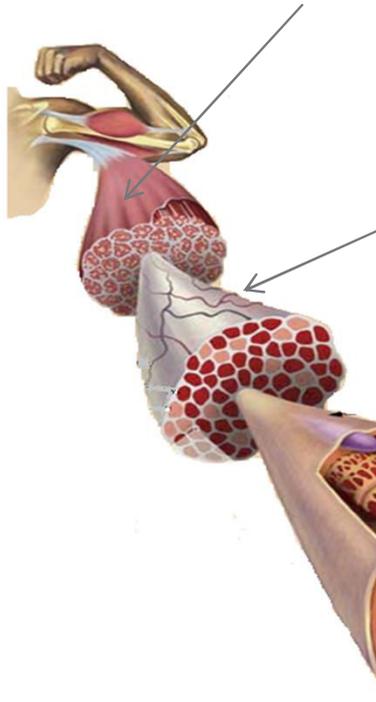
muscle de la peau, offre un passage aux nerfs ainsi qu'aux vaisseaux sanguins et lymphatiques qui entrent dans le muscle et en sortent

Fascia profond: protège et renforce le muscle

squelettique constitué de 3 couches: épimysium, le pérимыsium et d'endomysium

V) STRUCTURE DU MUSCLE SQUELETTIQUE

**MUSCLE SQUELETTIQUE INSÉRÉ SUR L'OS
GRÂCE AU TENDON, RECOUVERT PAR
L'ÉPIMYSIUM**

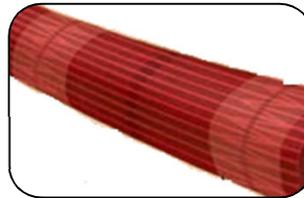


**FAISCEAU ASSEMBLAGE DE CELLULES
MUSCULAIRES, RECOUVERT PAR LE PERIMYSIUM**

**FIBRE (CELLULE) MUSCULAIRE
RECOUVERTE PAR L'ENDOMYSIUM**

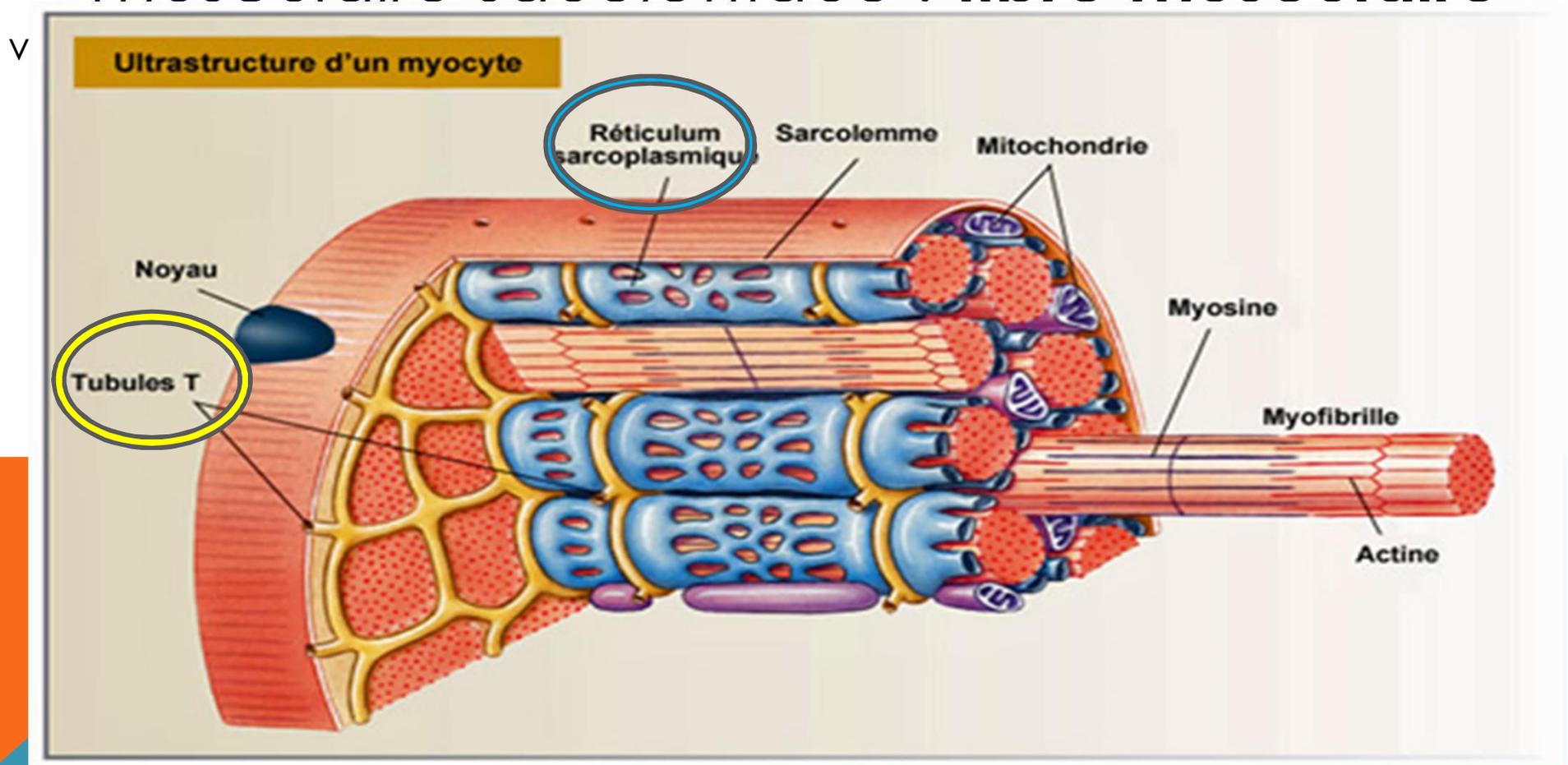
**MYOFIBRILLE
(ÉLÉMENT CONTRACTILE
CYLINDRIQUE)**

**UNE MYOFIBRILLE EST
UNE RÉPÉTITION D'UNITÉS
SARCOMÉRIQUES**



III. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES MUSCLES SQUELETTIQUES

*Anatomie microscopique d'une fibre musculaire sauelettique : **fibre musculaire***



La fibre musculaire

La fibre est entourée par une membrane plasmique :

le sarcolemme

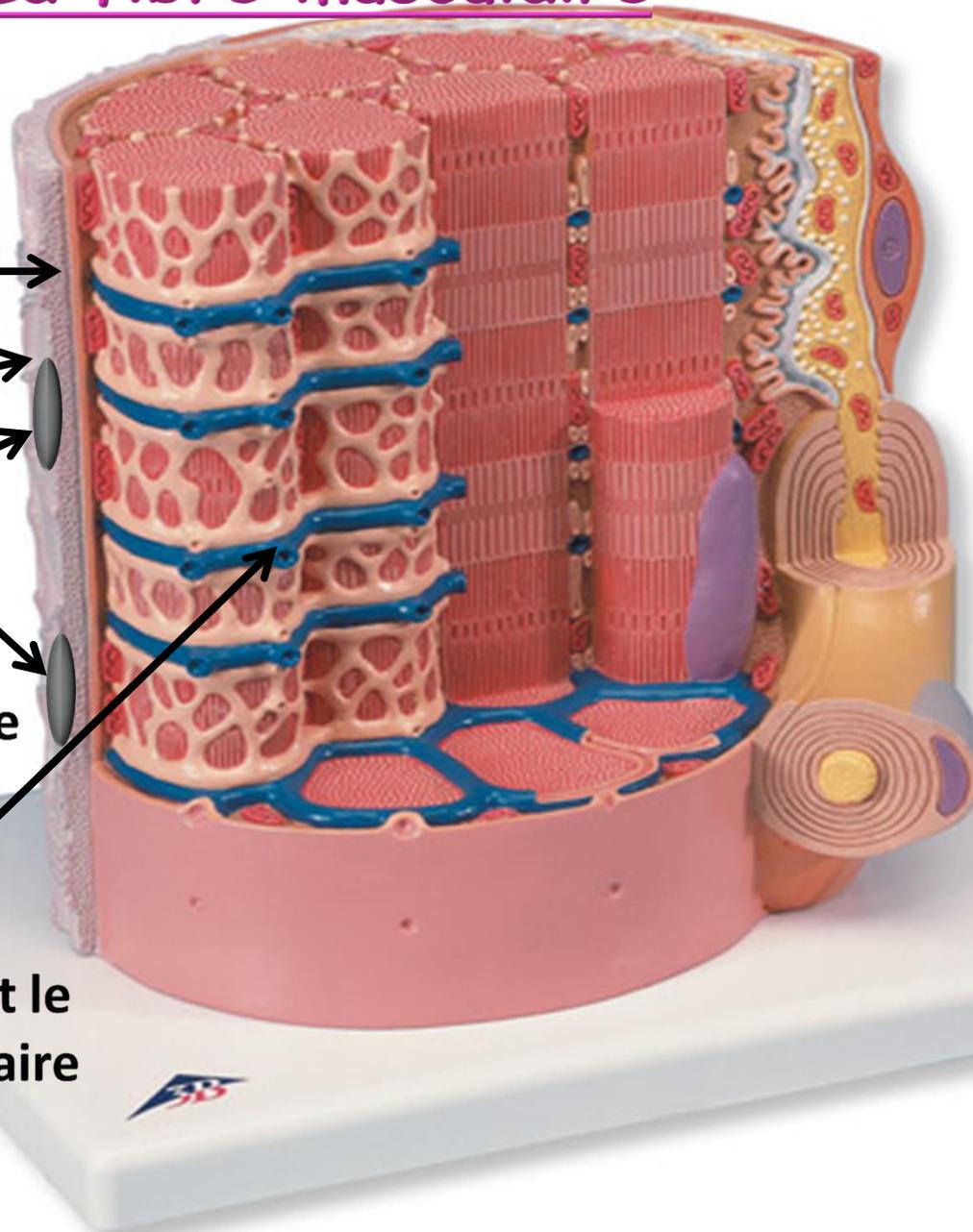
entouré lui-même

par une lame

basale et des

cellules satellites

le sarcolemme présente des fines invaginations tubulaires : tubules transverses (tubules T) réparties régulièrement le long de la fibre musculaire et y pénétrant profondément.

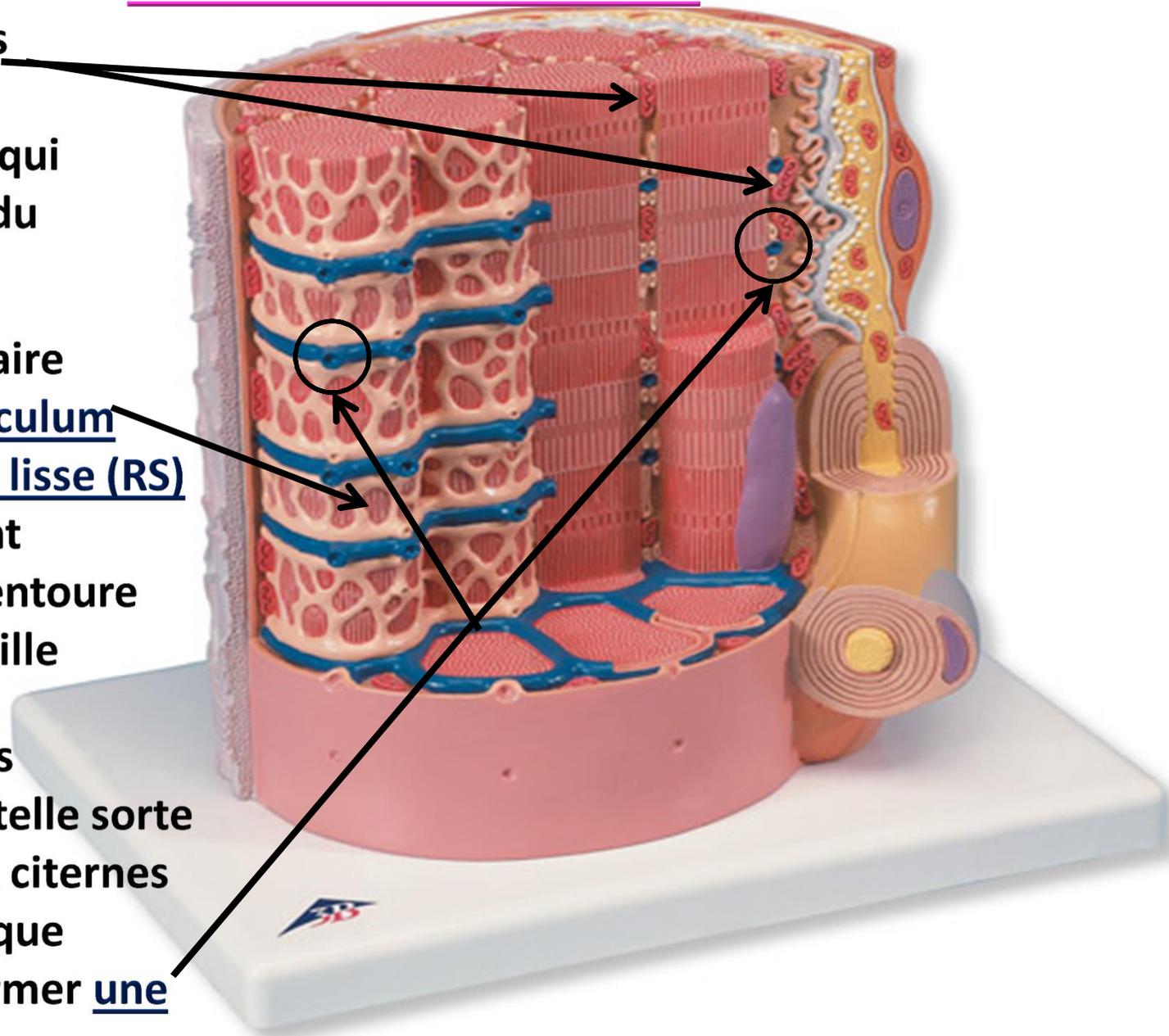


La fibre musculaire

Les myofibrilles entourées de mitochondries qui occupent 80% du sarcoplasme.

La fibre musculaire possède un réticulum sarcoplasmique lisse (RS) particulièrement développé qui entoure chaque myofibrille

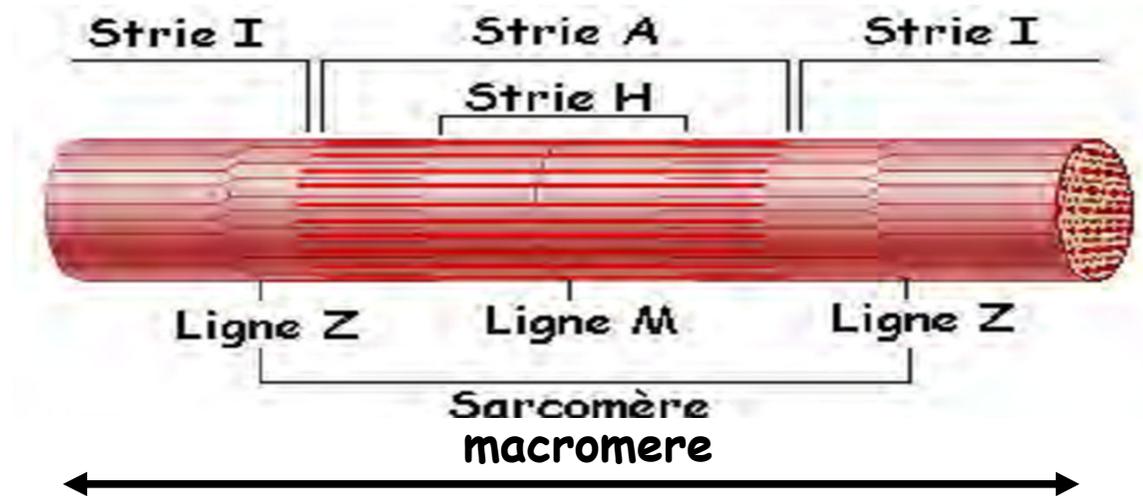
Le RS forme des expansions de telle sorte que 2 sacs ou 2 citernes entourent chaque tubule pour former une triade.



Structure contractile

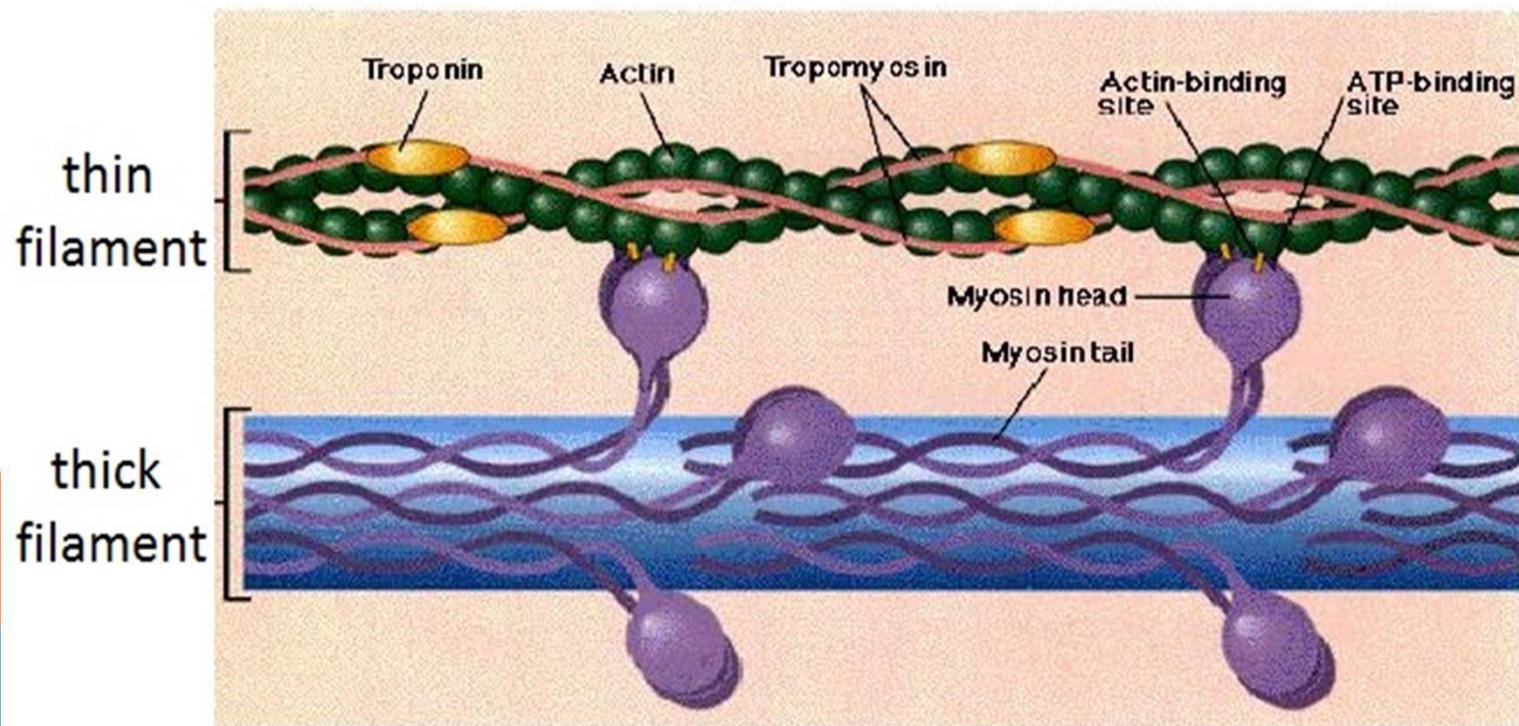
Les myofibrilles sont les éléments contractiles des cellules de muscle squelettique.

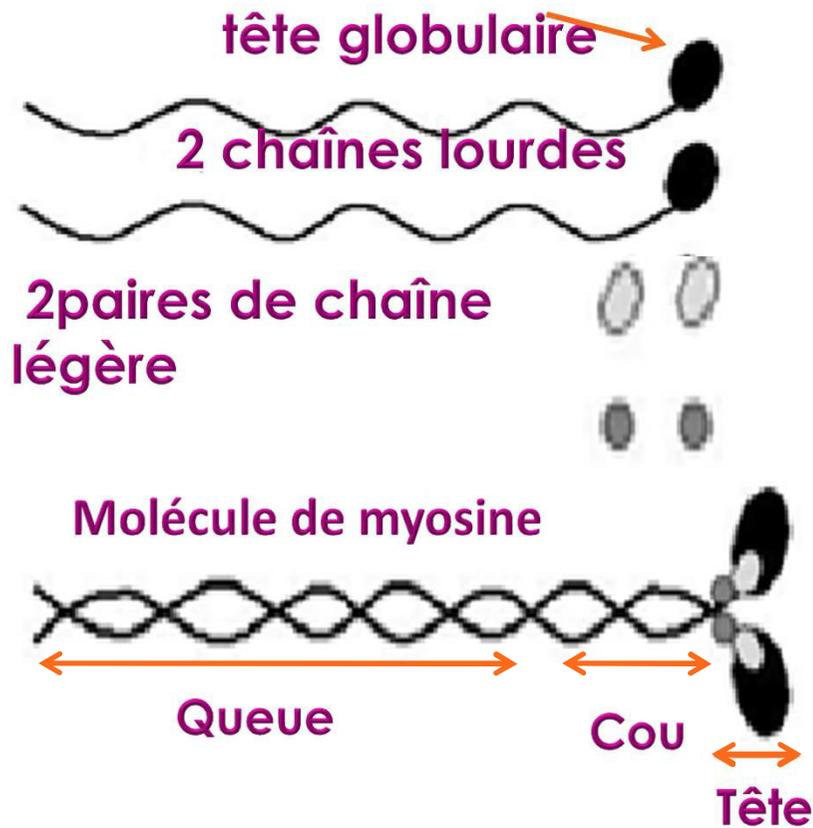
Chaque myofibrille est composée d'une chaîne d'unités contractiles répétitives, le sarcomère.



Le sarcomère est la plus petite unité contractile de la fibre musculaire

*Anatomie microscopique d'une fibre musculaire squelettique: **Myofilament***



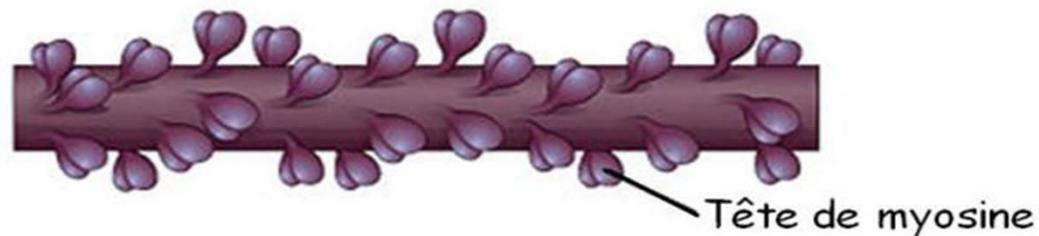


La myosine est constituée de 2 chaînes lourdes et de 2 paires de chaîne légère aux extrémités, chaque chaîne lourde forme une tête globulaire

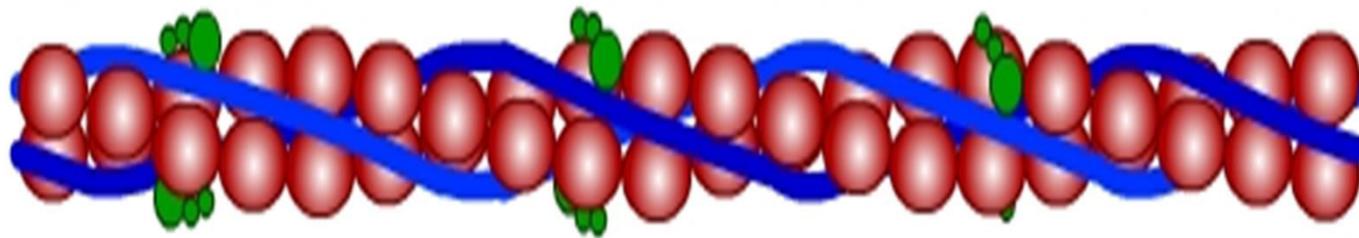
2 chaînes légères différentes se fixent sur chaque tête : chaîne légère essentielle et une chaîne légère régulatrice.

Les têtes globulaires possèdent :
un site de fixation à l'actine
un site de liaison à l'ATP
un site de liaison à la chaîne légère

Anatomie microscopique d'une fibre musculaire squelettique **Les filaments épais**



*Anatomie microscopique d'une fibre musculaire squelettique : **Les filaments fins***

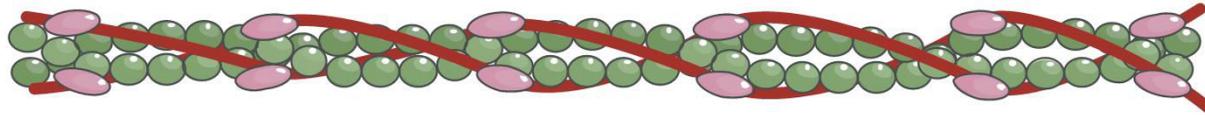


 Actine G

 Tropomyosine

 Troponine

Les filaments fins sont formés d'actine, ils sont de part et d'autre de la strie Z, sur toute la longueur de la bande I.



Actine F: double brins torsadés, se compose de monomères globulaires (actine G) se fixent les uns sur les autres en donnant une polarité aux filaments, avec des extrémités (+) et (-); l'extrémité (+) s'insère sur le disque Z.



Troponine: complexe de 3 sous-unités:
TN-T attache le complexe à la tropomyosine
TN-I inhibe la fixation de la myosine à l'actine
TN-C fixe le calcium et n'existe que dans le muscle strié



Tropomyosine: protéine filamenteuse qui s'enroule autour de l'actine F

TUBULES TRANSVERSES T ET RÉTICULUM SARCOPLASMIQUE

:

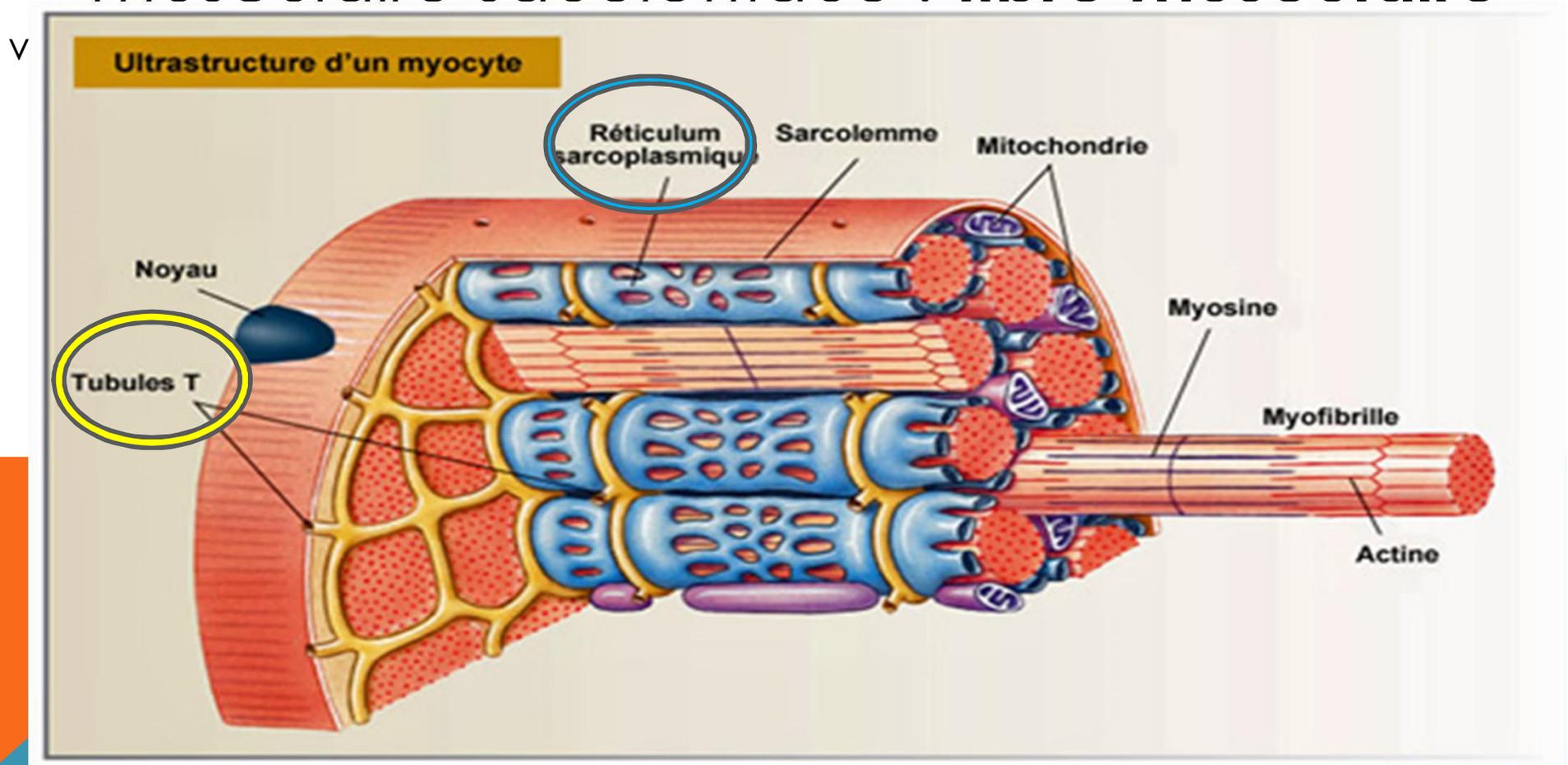
- **Tubules transverses T** : à la jonction des stries A et I, le sarcolemme présente des invaginations qui pénètrent à l'intérieur de la fibre musculaire et forment les Tubules Transverses (tubule T).

- **Le réticulum sarcoplasmique (RS)** : est un réticulum endoplasmique particulier, qui forme un réseau de fins tubules entourant de ses mailles chaque

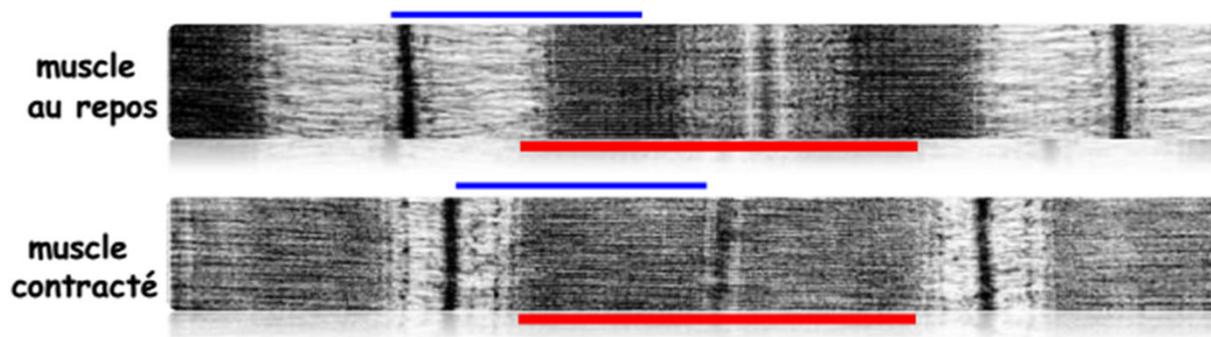
myofibrille sur toute sa longueur. Il Comporte des citernes terminales qui établissent des contacts intimes avec les tubules T. Le tubule T et les citernes latérales situées de chaque côté forment : **La triade**

III. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES MUSCLES SQUELETTIQUES

*Anatomie microscopique d'une fibre musculaire sauelettique : **fibre musculaire***



Anatomie microscopique d'une fibre musculaire squelettique :



- Quand le muscle se contracte :
 - la longueur des filaments fins (en bleu) ne change pas
 - la longueur des filaments épais (en rouge) ne change pas
- la contraction s'explique par un glissement des filaments fins entre les filaments épais

CARACTÉRISTIQUES FONCTIONNELLES DES MUSCLES SQUELETTIQUES

L'excitabilité: la capacité de percevoir un stimulus et d'y répondre;
exemple : cellule nerveuse qui libère un neurotransmetteur en créant un signal électrique tout au long du sarcomère responsable de sa contraction

la contractilité : est la capacité de se contracter avec force en présence de la stimulation appropriée.

L'extensibilité : faculté de s'étirer en présence d'une force de traction

L'élasticité : c'est la possibilité de reprendre la longueur de repos lorsque les muscles se relâchent.

+ propriété thermogénique + réserve énergétique (ATP, CP, Glycogène, O₂)

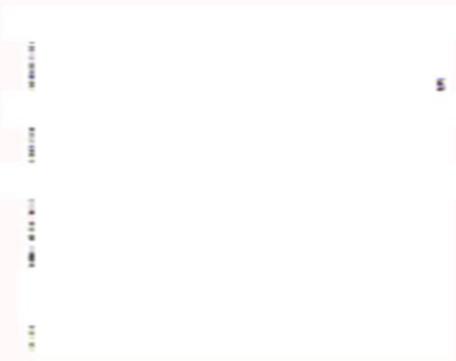
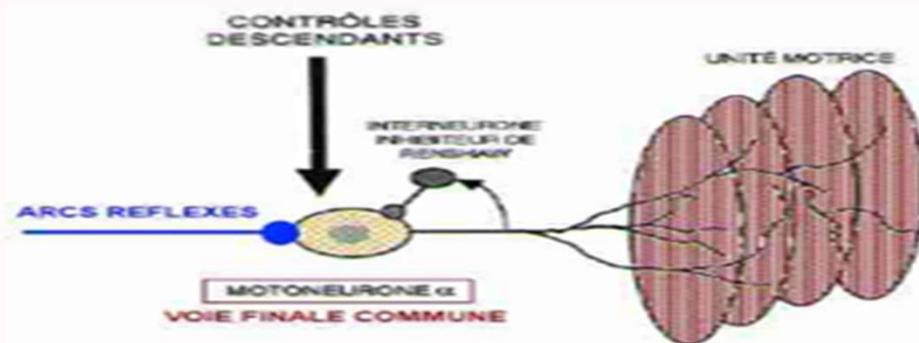


LA JONCTION NEUROMUSCULAIRE L'UNITÉ MOTRICE

Unité motrice: unité fonctionnelle du mouvement

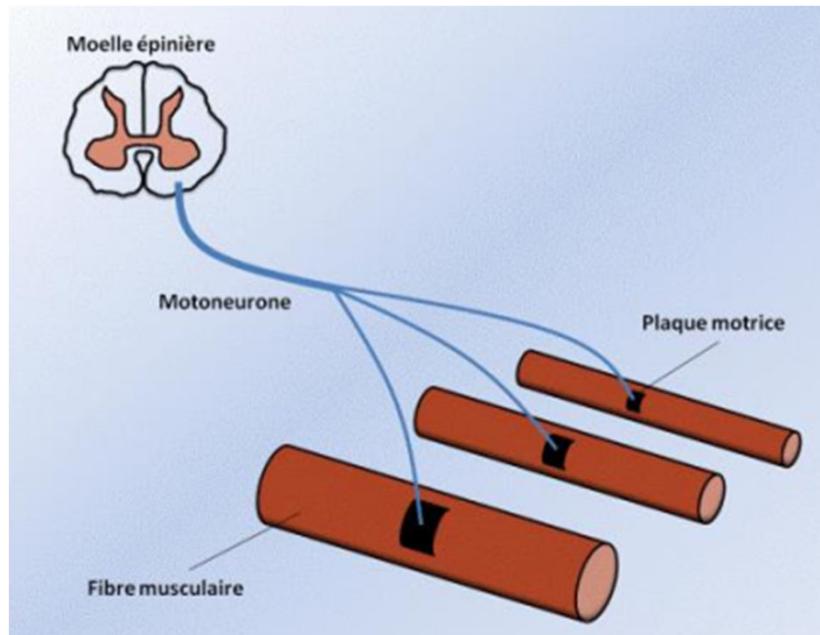
- Ensemble constitué par le motoneurone dont le corps cellulaire est situé dans la corne antérieure de la moelle épinière et l'ensemble des fibres musculaires que ce motoneurone innerve.
- Le motoneurone établit un contact avec la fibre musculaire au niveau de la plaque motrice
- Toutes les fibres d'une même unité motrice sont simultanément au repos ou en activité

L'UNITÉ MOTRICE : LE PLUS PETIT ÉLÉMENT CONTRACTILE MIS EN JEU PAR LE SYSTÈME NERVEUX



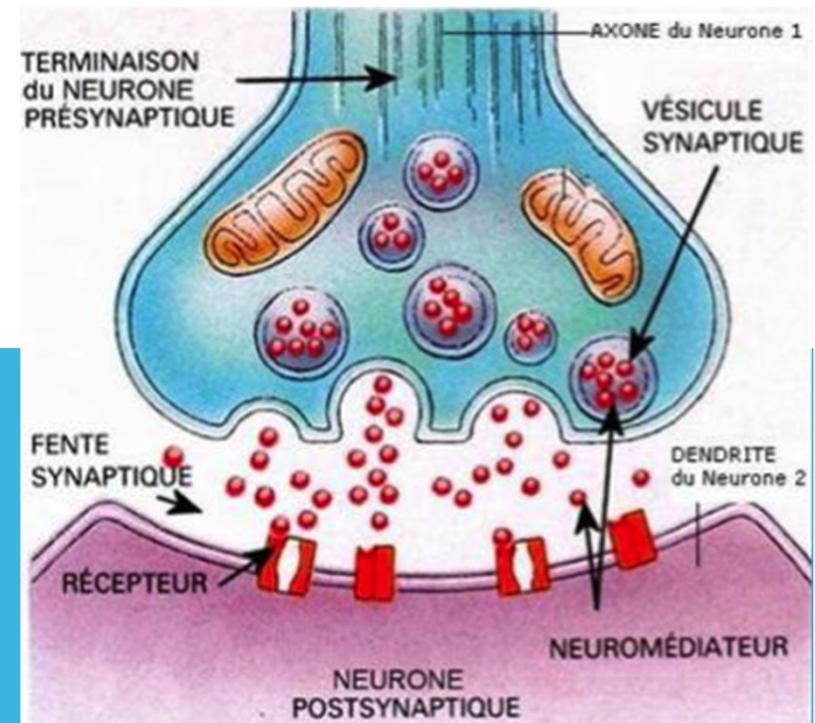
IV. COUPLAGES EXCITATION CONTRACTION

Jonction neuromusculaire



Une unité motrice.

La plaque motrice



JONCTION NEUROMUSCULAIRE

un motoneurone α + la fibre musculaire qu'il innerve = une unité motrice

l'unité fonctionnelle de la contraction

**Les motoneurones α (la corne ventrale de la moelle épinière (ME))
Leurs axones sortent de la moelle épinière en passant par la racine ventrale puis empruntent successivement les nerfs rachidiens et périphériques qui vont former de nombreuses ramifications allant innerver de multiples fibres musculaires (fm)**

Un seul motoneurone α peut innerver 35 à 2000 fm, Chaque fm est innervée par un seul motoneurone α

La zone de contact entre la terminaison nerveuse et le sarcolemme constitue la plaque motrice. Chaque plaque motrice est constituée par :

- une région présynaptique** au niveau de la terminaison axonale (mitochondries, vésicules synaptiques d'acétylcholine, membrane pré synaptique)
- une fente synaptique** de 60 nm.
- une région post-synaptique** où le sarcolemme présente un plissement régulier appelé appareil sous-neural.

PHÉNOMÈNES PRÉ SYNAPTIQUES

- 1. SYNTHÈSE** : L'acétylcholine est synthétisée à partir de l'acétyl-Coenzyme A et de la choline. Cette réaction est catalysée par une enzyme ; la choline acétyltransférase
- 2. STOCKAGE** Une fois synthétisée, l'acétylcholine est concentrée et stockée dans des vésicules.
- 3. EXOCYTOSE**: Commandé par le calcium qui joue un rôle très important la sécrétion acétylcholine, L'arrivée d'un potentiel d'action à l'extrémité du motoneurone dépolairise la membrane plasmique présynaptique, entraînant l'ouverture des canaux Ca^{++} voltage dépendants ceci provoque l'entrée Ca^{++} selon son gradient électrochimique. Cet influx de Ca^{++} provoque le relargage et la fusion des vésicules synaptiques, puis l'exocytose du neurotransmetteur dans la fente synaptique.
- 4. DÉGRADATION** : Une fois utilisée, l'acétylcholine libérée dans la fente synaptique est hydrolysée par l'acétylcholinestérase en acétate et choline, la choline libérée sera réabsorbée par la terminaison nerveuse.

MÉCANISMES POST SYNAPTIQUES

Les molécules de neurotransmetteur (Ach)se fixent sur la membrane post synaptique au niveau des recepteurs qui lui sont spécifique(recepteur canal nicotinique contient 2 sous unités a)

Cette fixation entraine un passage d'ions à travers la membrane poste synaptique(Na^+ et k^+)

Ce courant entrant de Na^+ dépoliarise la cellule avec création d'un potentiel de la plaque motrice miniature(PPMM) qui reste locale et excite la partie voisine du sarcolemme

Les PPMM s'additionnent pour produire **un PPM complet**

Le PPM n'est pas un potentiel d'action mais une dépoliarisation de la plaque motrice terminale spécialisée

Une fois la région de la plaque terminale dépoliarisée.des courants locaux provoquent la dépoliarisation et des potentiels d'action dans le muscle adjacent .la contraction a lieu

VII. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUE DU MUSCLE SQUELETTIQUE

- **1. Mécanisme de la contraction d'une fibre unique**

La force exercée sur un objet par un muscle en contraction est appelée tension musculaire. La force exercée par un objet sur un muscle est appelée charge.

Tension et charge sont des forces opposées.

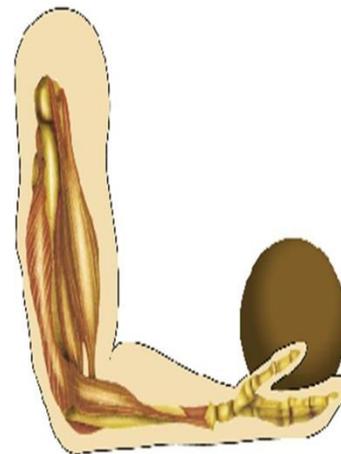
Pour que les fibres musculaires se raccourcissent et déplacent donc une charge, la tension doit dépasser la charge opposée.



MÉCANIQUE DU MUSCLE

SQUELETTIQUE

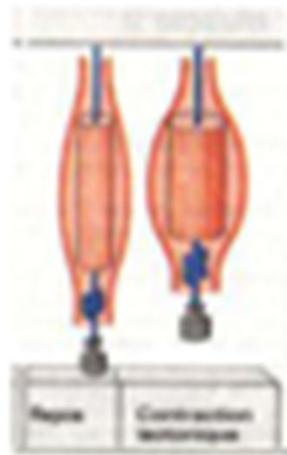
Quand un muscle développe une tension mais ne se raccourcit pas (ou ne s'allonge pas), la contraction est dite **isométrique** (longueur constante). On note de telles contractions quand le muscle maintient une charge en position constante ou tente de déplacer une charge quand elle dépasse la tension exercée par le muscle



PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU MUSCLE SQUELETTIQUE

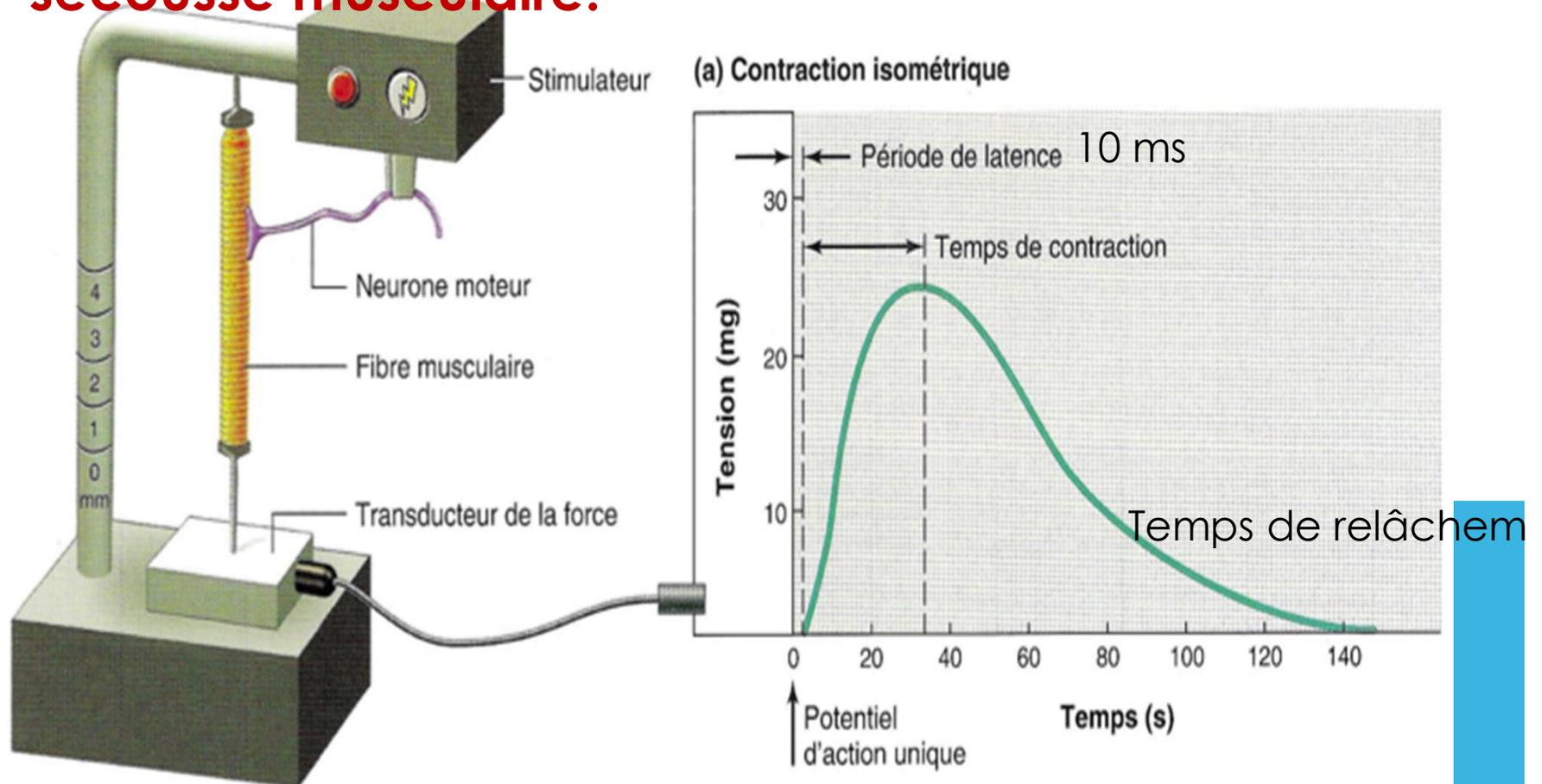
Une contraction dans laquelle le muscle se raccourcit et où la charge sur le muscle est constante, est dite **isotonique** (tension constante).

La contraction isotonique :



2. Secousse musculaire

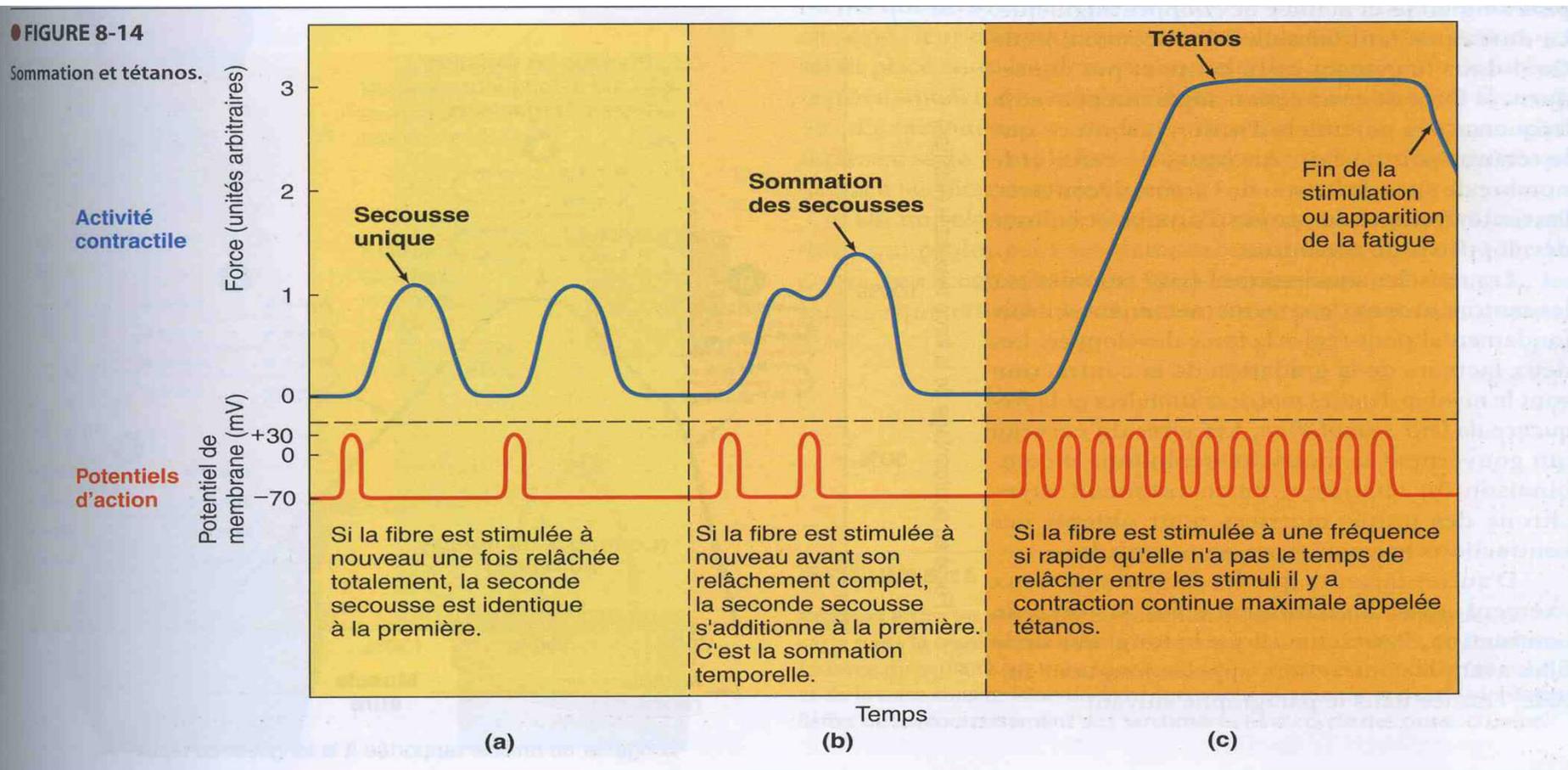
La réponse mécanique d'une fibre musculaire à un seul potentiel d'action est appelée **secousse musculaire**.



SOMMATION TEMPORELLE ET TÉTANOS

Si 2 stimulations identiques sont appliqués à un muscle dans un court intervalle ; la seconde contraction sera plus ample que la première
sommation temporelle.

↑ la fréquence de stimulation → la période de relaxation entre les contractions devient de plus en plus courte → la sommation de plus en plus importante → les contractions fusionnent en une longue contraction régulière **tétanos**



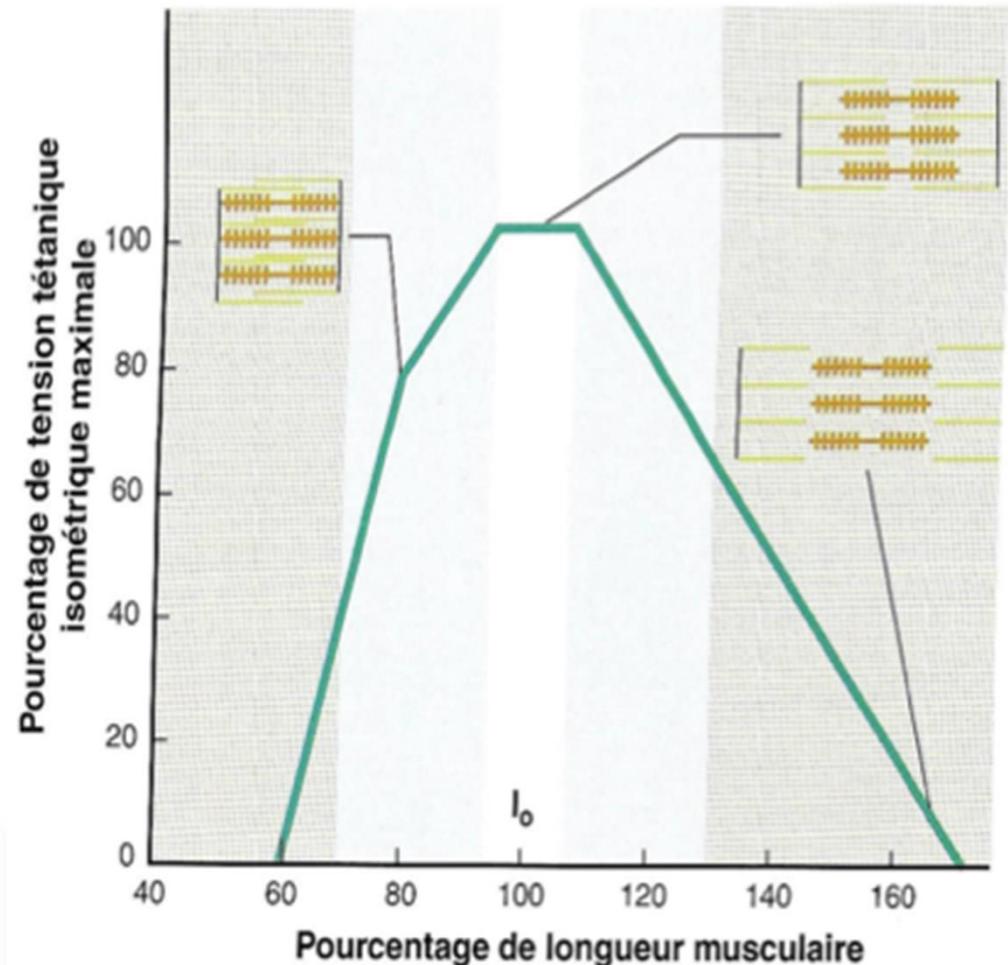
2. RELATION TENSION-LONGUEUR

Durant une contraction, la tension maximale se produit lorsque la longueur du sarcomère au repos est de 2,0 à 2,4 μm (longueur optimale).

Le rapport longueur-tension idéal correspond à un léger étirement du muscle, lorsque les filaments d'actine et de myosine se chevauchent à peine .

Donc un myocyte atteint sa tension la plus élevée lorsqu'il y'a une zone optimale de chevauchement entre les myofilaments fins et les myofilaments épais.

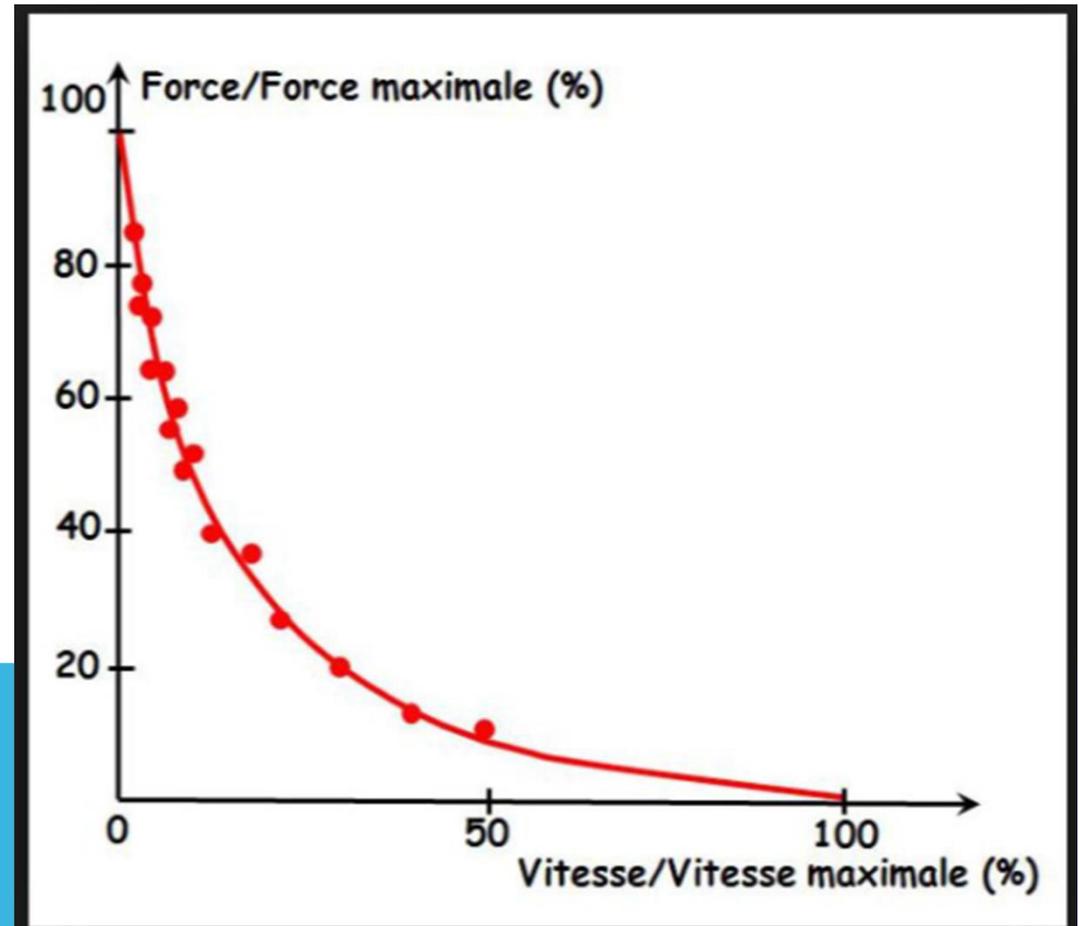
Dans une fibre musculaire ,la tension maximum est atteinte pour une position moyenne des filaments épais par rapport au filaments fins



Relation longueur-tension

RELATION FORCE -VITESSE

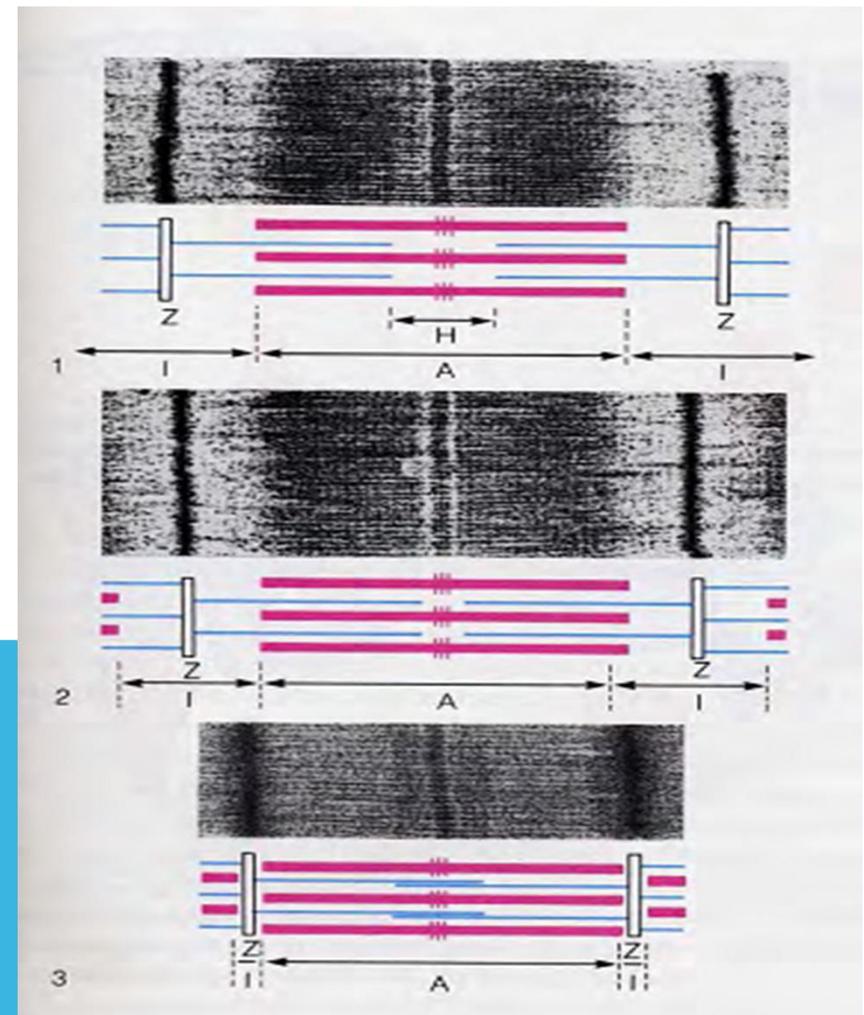
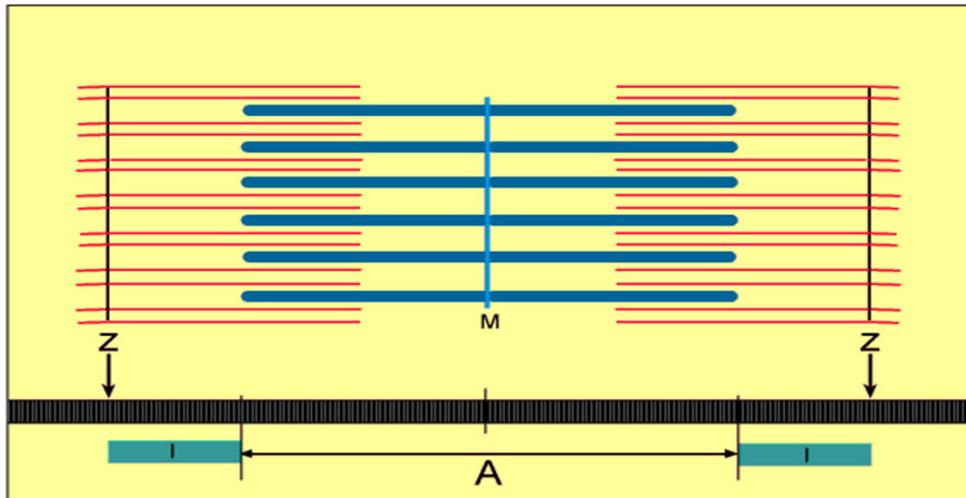
- Les objets légers peuvent être déplacés plus rapidement que les objets lourds.
- La vitesse de raccourcissement est maximale quand il n'y a pas de charge et nulle quand la charge est égale à la tension isométrique maximale.
- Pour des charges dépassant la tension isométrique maximale, la fibre s'allonge à une vitesse qui augmente avec la charge



V. MECANISME MOLECULAIRE DE LA CONTRACTION

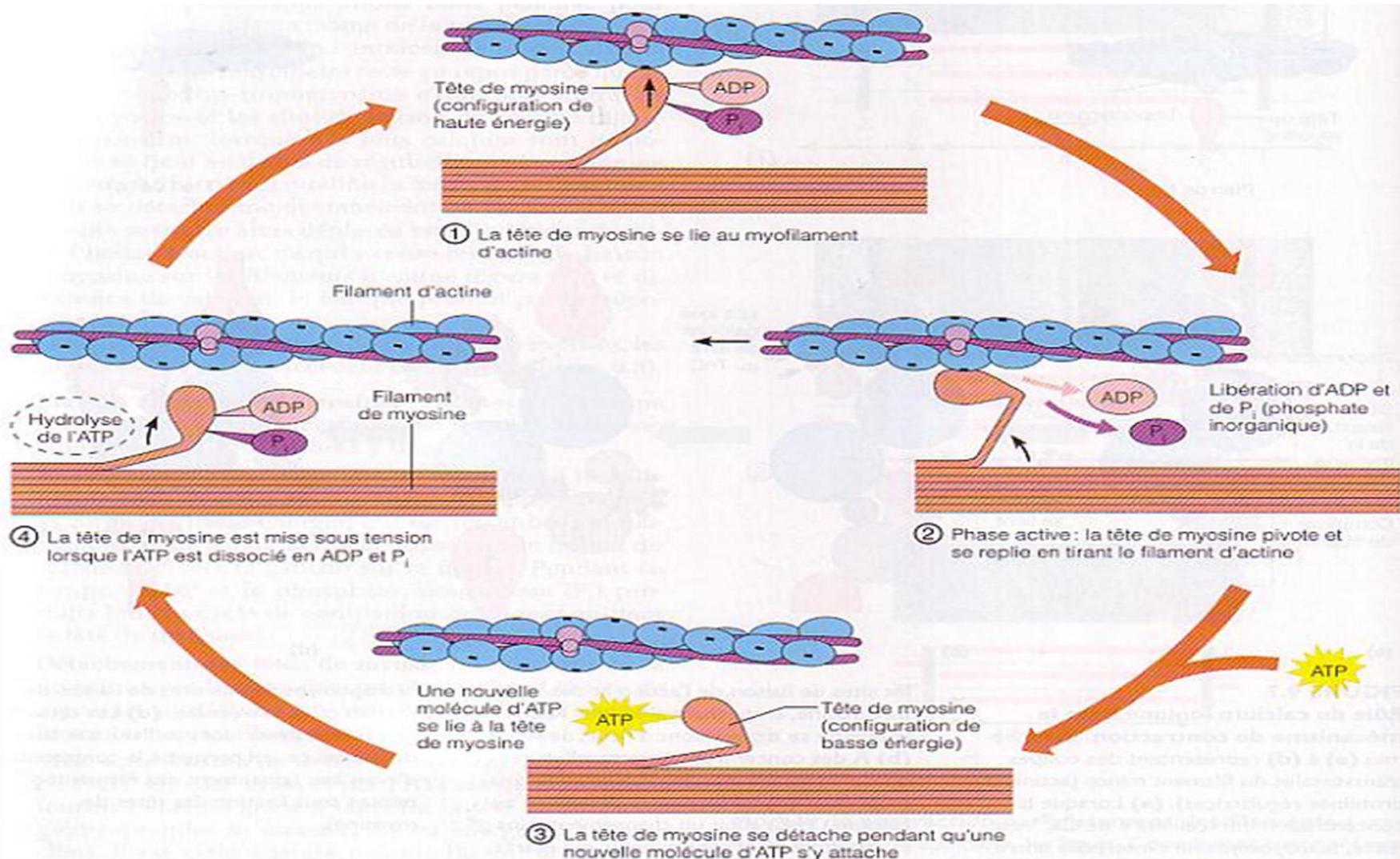
A. Théorie de glissement des filaments

Durant la contraction, les filaments minces glissent sur les filaments épais de sorte que l'actine et la myosine se chevauchent davantage

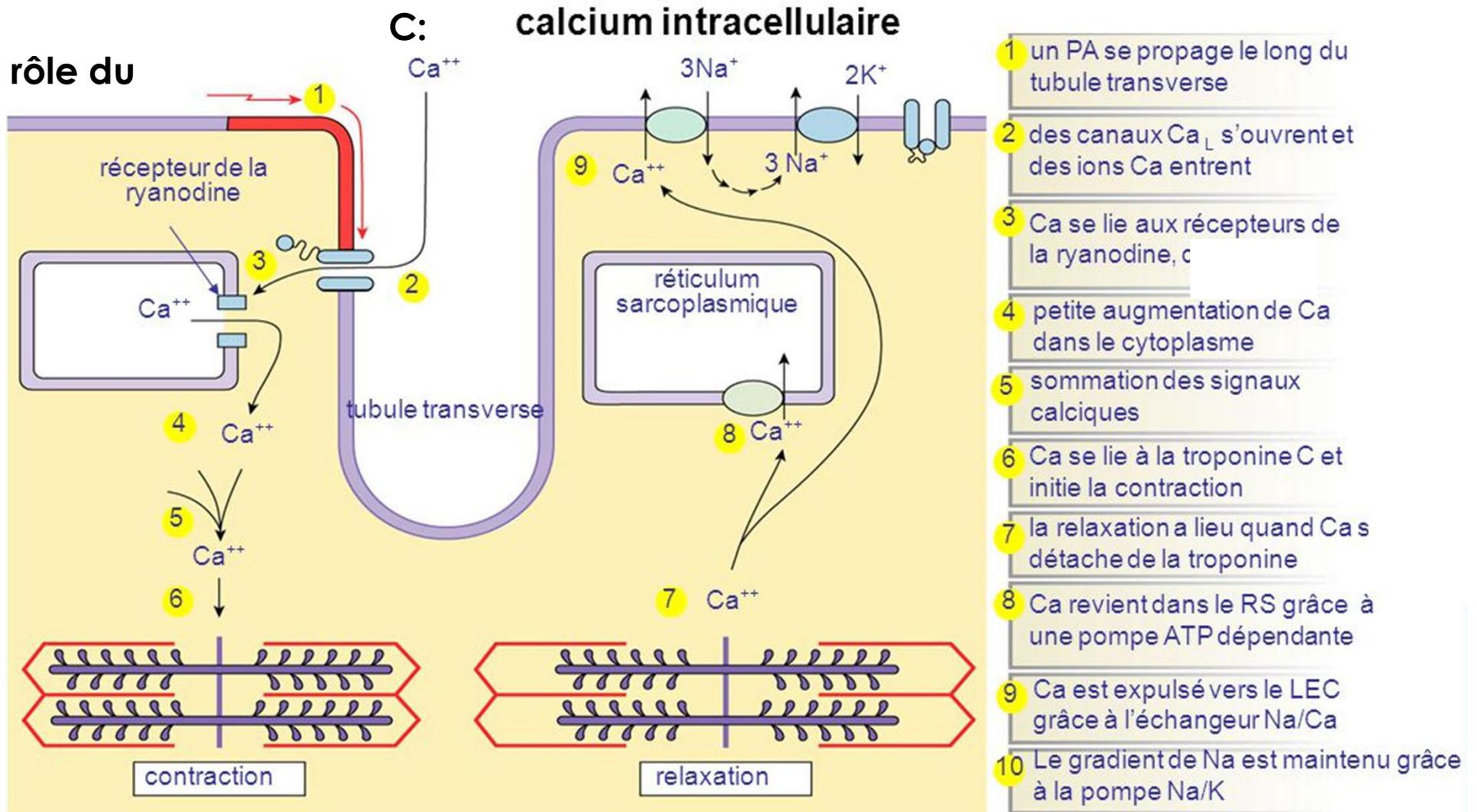


B. SÉQUENCE DES ÉVÉNEMENTS

Quand la cellule musculaire est stimulée, la tête de myosine s'accroche au site de liaison de l'actine, situé sur les filaments minces et le glissement s'amorce



IV. COUPLAGES EXCITATION CONTRACTION



COUPLAGE EXCITATION- CONTRACTION

C'est la succession d'évènements par laquelle le potentiel d'action transmis le long du sarcolemme provoque le glissement des myofilaments.

Le couplage excitation – contraction passe par les étapes suivantes :

- 1- **Le potentiel d'action** se propage le long du sarcolemme et des tubules transverses.
- 2- **Lorsque le potentiel d'action** parvient aux triades, le DHPR agit comme un détecteur d'intensité du courant électrique ou du voltage et subit des changements conformationnels conduisant à une interaction moléculaire avec le RyR. Cela favorise son ouverture et la libération de calcium des stocks du réticulum sarcoplasmique



COUPLAGE EXCITATION- CONTRACTION

C'est la succession d'évènements par laquelle le potentiel d'action transmis le long du sarcolemme provoque le glissement des myofilaments.

Le couplage excitation – contraction passe par les étapes suivantes :

- 1- **Le potentiel d'action** se propage le long du sarcolemme et des tubules transverses.
- 2- **Lorsque le potentiel d'action** parvient aux triades, le DHPR agit comme un détecteur d'intensité du courant électrique ou du voltage et subit des changements conformationnels conduisant à une interaction moléculaire avec le RyR. Cela favorise son ouverture et la libération de calcium des stocks du réticulum sarcoplasmique



3- Une fois dans le milieu intracellulaire (sarcoplasme), le calcium se lie à la troponine C (TnC), quatre molécules de calcium se lient à une molécule de TnC.

4- La troponine change alors sa structure tridimensionnelle, provoquant le déplacement latéral de la tropomyosine et donc libération (démasquage) des sites de liaison de l'actine.

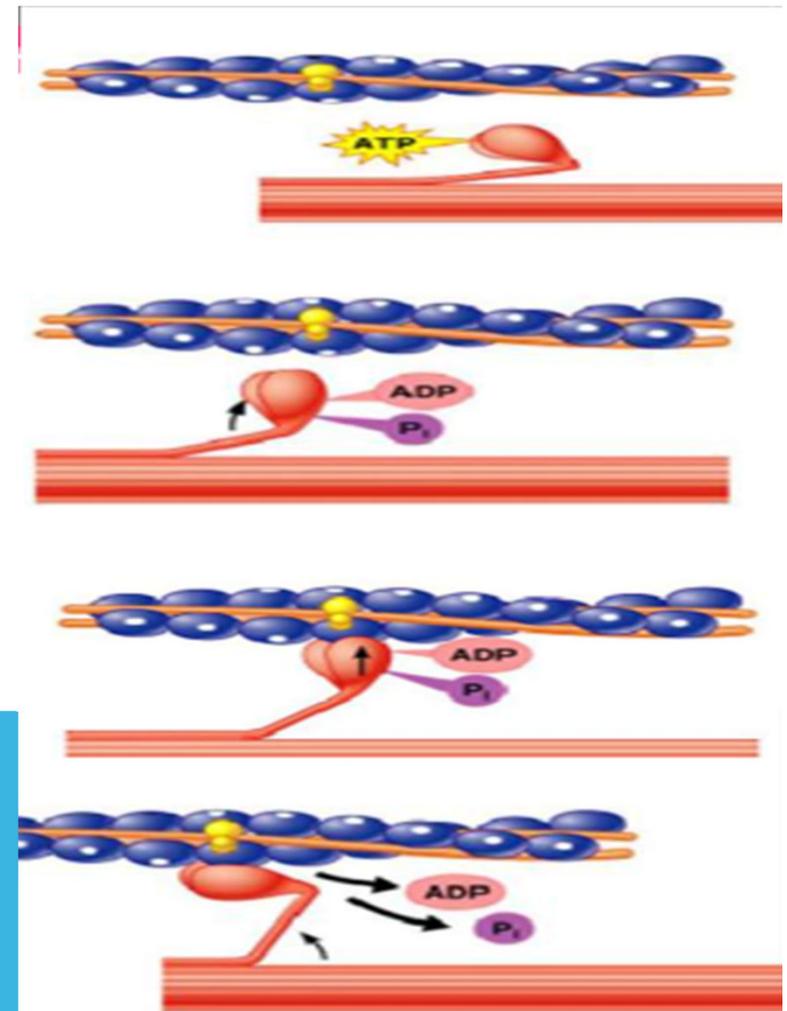
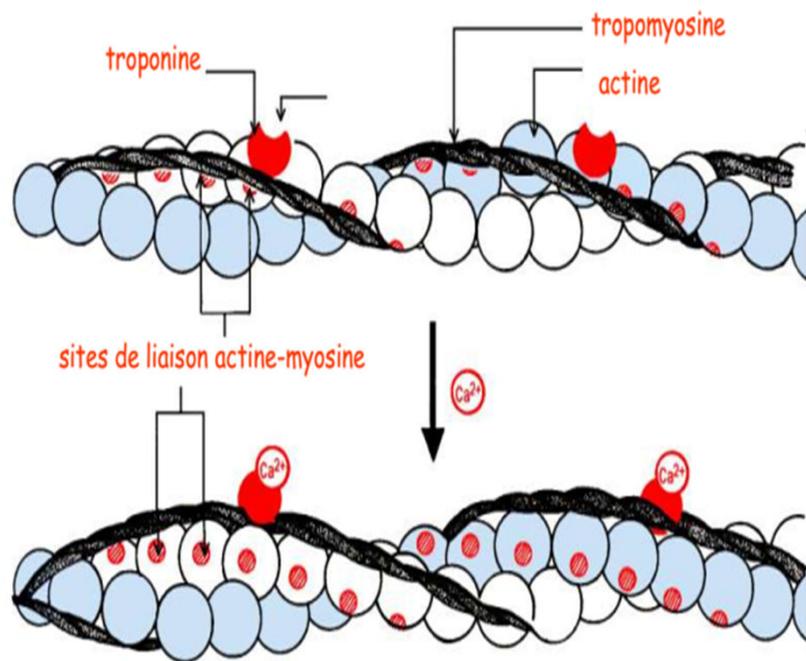
5- Dès que les sites de liaisons de l'actine sont exposés, les têtes de myosines se fixent immédiatement sur l'actine formant un complexe : l'actomyosine

6- Dans le même temps la fixation du calcium sur la TnC permet la levée de l'inhibition exercée par la troponine I sur l'activité ATPasique de la tête de myosine, cette activité ATPasique permet l'hydrolyse de l'ATP en ADP et Pi (cette réaction est Mg⁺ dépendante).

7- Le détachement du Pi et ADP des têtes de myosines, permet la flexion des têtes de myosines (modifications de l'angle formé par les têtes de myosine fixées à l'actine) = glissement des filaments d'actine sur les filaments de myosine)

IV. COUPLAGES EXCITATION CONTRACTION

Liaison du Ca^{2+} sur TnC



8- La liaison de l'actine avec la myosine reste stable et seule la présence d'une nouvelle molécule d'ATP (qui se fixe sur la tête de myosine), permet la rupture de la liaison entre actine et myosine.

9- La contraction se poursuit tant que le signal calcique et l'ATP sont présents.

10- En l'absence de potentiel d'action, le réticulum sarcoplasmique récupère le calcium du sarcoplasme, la troponine change de nouveau sa forme et la tropomyosine masque les sites de liaison des têtes de myosine à l'actine donc la contraction prend fin et les filaments reprennent leur position initiale = Relâchement musculaire

VIII. MÉTABOLISME DU MUSCLE SQUELETTIQUE

- La petite quantité d'ATP qui existe dans le muscle au commencement de l'activité contractile est consommé au bout de quelques secondes
- Énergie chimique ATP = 12Kcal/ATP → chaleur + énergie mécanique
- Il existe 3 voies permettant à la fibre musculaire de former de l'ATP au cours de l'activité contractile:

-Phosphorylation directe de l'ADP par la créatine phosphate

-La glycolyse anaérobie

-Phosphorylation oxydative

a- Interaction de l'ADP avec la créatine phosphate(CP)

- **Au début de la contraction**, une fois les faibles réserves d'ATP ont été consommées, de l'ATP supplémentaire est rapidement reconstitué à partir d'une molécule à haute énergie : la Créatine-phosphate (CP) :



→Créatine + ATP

- Cette réaction est catalysée par la Créatine Kinase.

- Une puissance musculaire maximale peut être maintenue pendant 10 à 15s

b- La Glycolyse anaérobie

Les réserves de glycogène du muscle sont transformées en acide lactique avec la production de deux (02) molécules d'ATP. Ensembles, les réserves d'ATP et de créatine phosphate et la glycolyse anaérobie peut entretenir une activité musculaire pendant une minute.



c- Respiration cellulaire =glycolyse aérobie : phosphorylation oxydative

Lors d'une activité musculaire légère mais prolongée, l'ATP utilisé par les muscles est fourni par la respiration cellulaire aérobie qui se déroule dans les mitochondries et nécessite la présence d'oxygène et fait intervenir une suite de réaction chimiques (cycle de krebs, chaine respiratoire et transport d'électrons). Pendant la respiration aérobie le glucose est entièrement dégradé ; l'oxydation complète d'une molécule de glucose fournit 36 molécules d'ATP.

VI. PROPRIETES ENERGETIQUE DU MUSCLE

Métabolisme des muscles

Dégagement de chaleur pendant l'activité musculaire

- Seule une proportion de 20 à 25% de l'énergie libérée par la contraction musculaire est convertie en travail utile.
- Le reste 75 - 80% sont transformés en chaleur.

Références bibliographiques

Atlas de poche physiologie

- Elaine N. Marieb : Anatomie et Physiologie Humaine

- H.Guenard : Physiologie Humaine

PCEM cours de physiologie

