



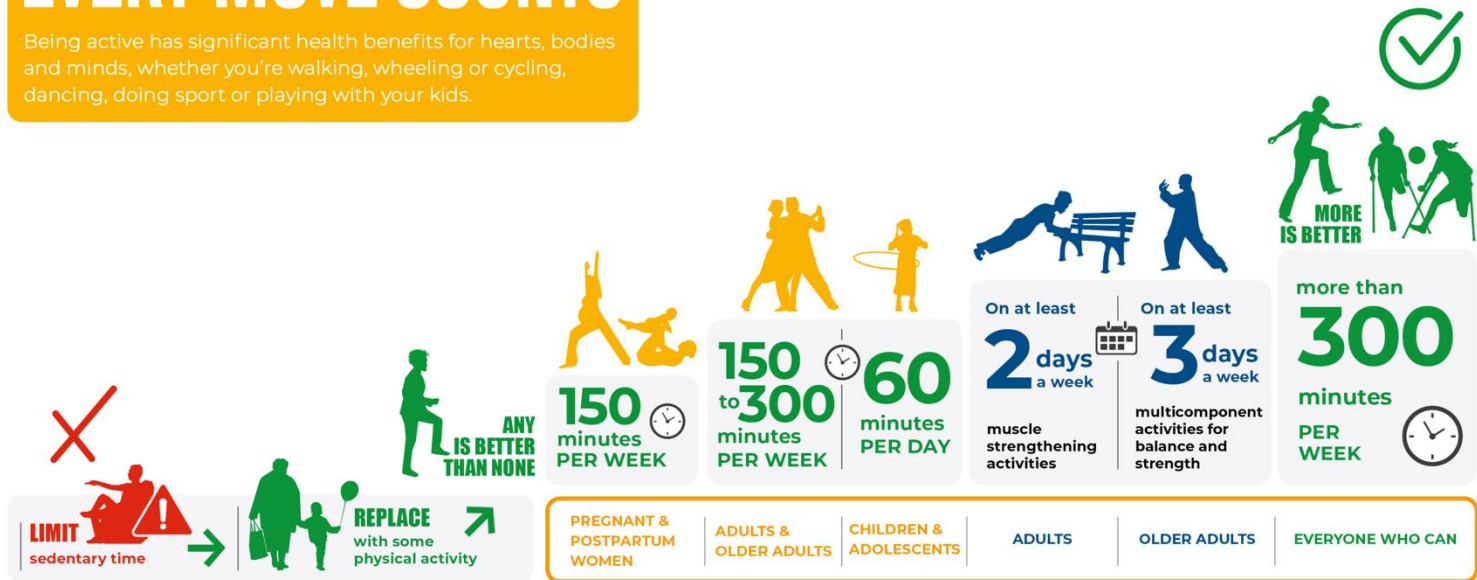
**Bases moléculaires de la
contraction musculaire**

- Pourquoi étudier les muscles?

Bougez!

EVERY MOVE COUNTS

Being active has significant health benefits for hearts, bodies and minds, whether you're walking, wheeling or cycling, dancing, doing sport or playing with your kids.

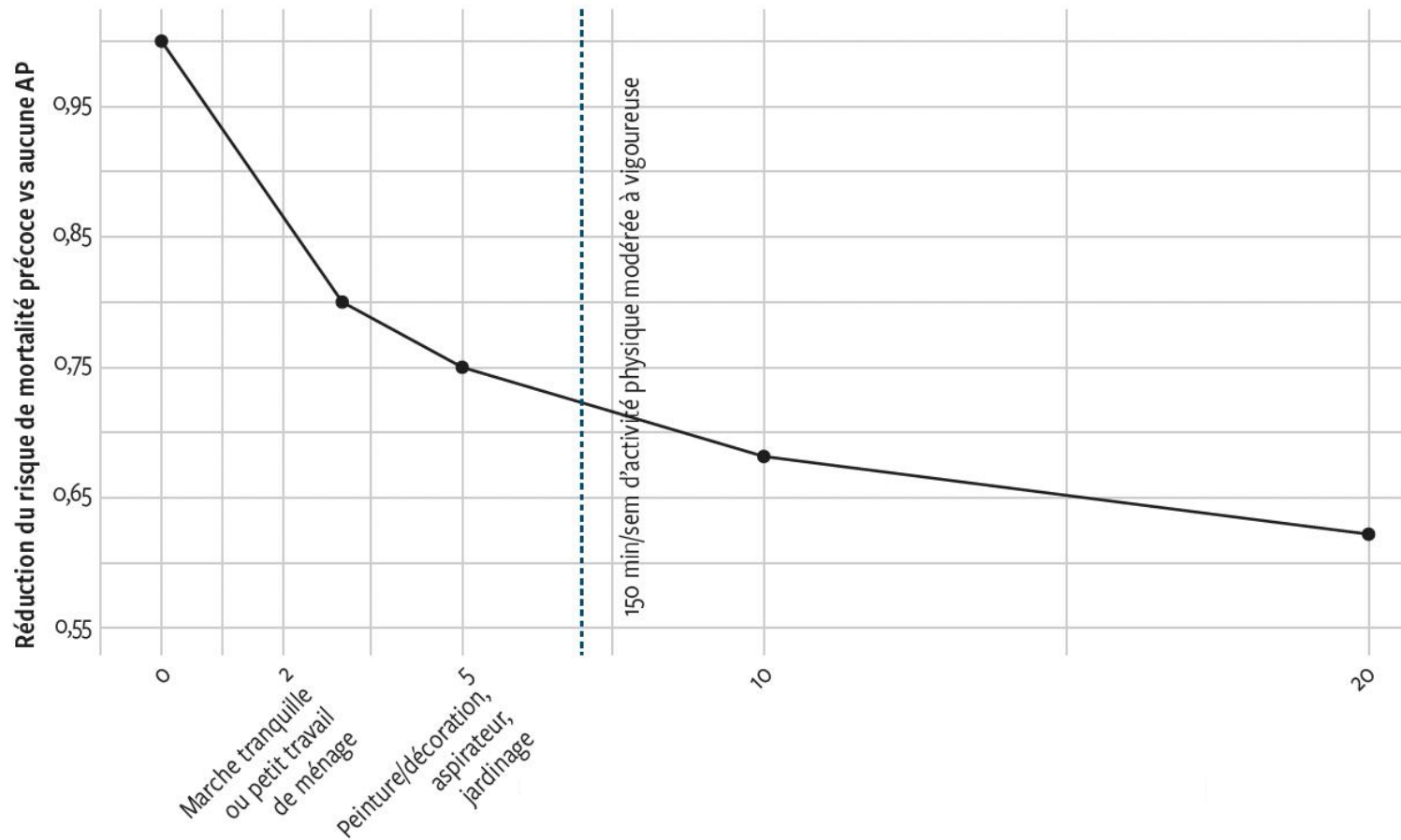


WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour (2020).

For more information, visit: www.who.int/health-topics/physical-activity



Relation entre activité physique et bénéfice pour la santé



Promotion de l'activité physique chez les aînés: enjeux et stratégies spécifiques

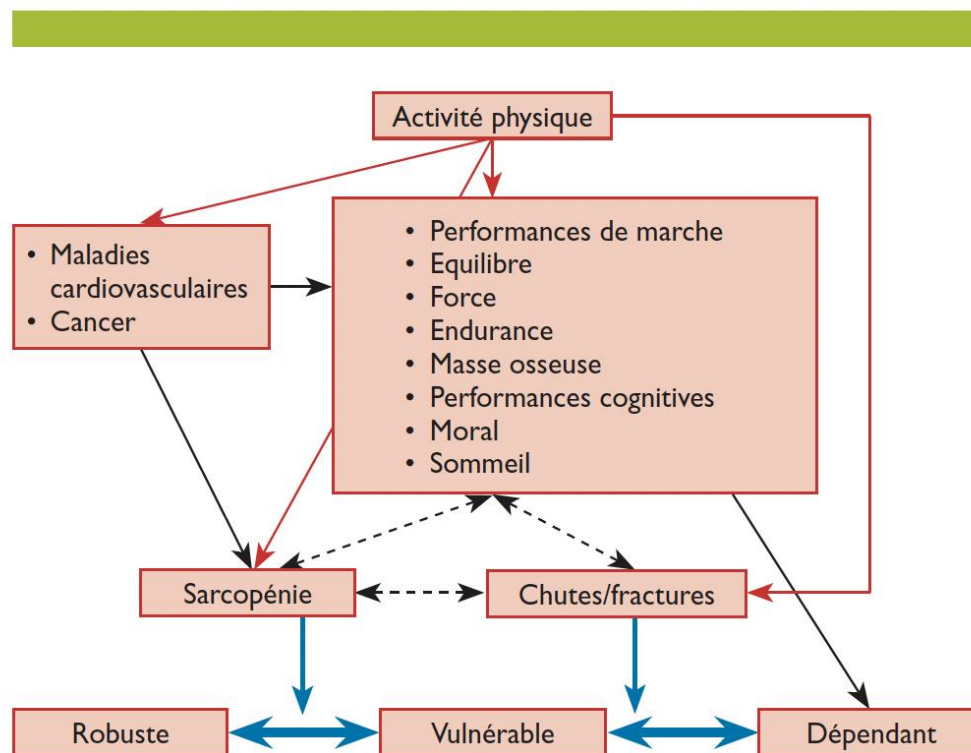


Figure 1. Bénéfices de l'activité physique sur l'état de santé et fonctionnel

Promotion de l'activité physique au quotidien: rôle des professionnels de la santé

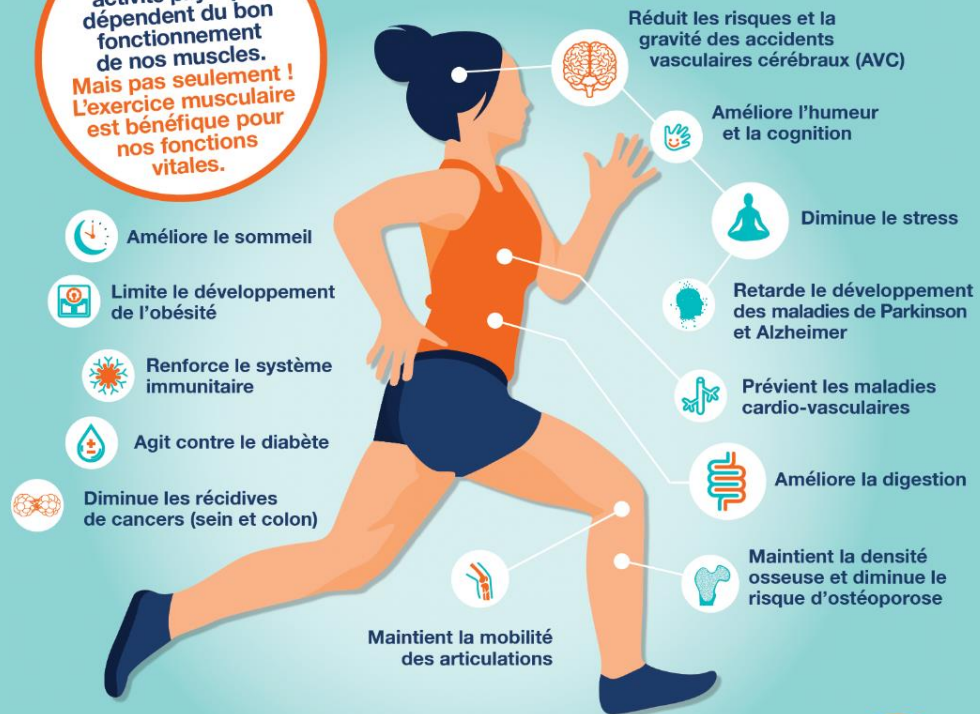
Dre CLAIRE SEYDOUX^a, Dr JEAN REGINA^a, Dre ROXANE DE LA HARPE^a, Dre MARINE DÉVAUD^a, SIMON OESTREICHER^a,
CLÉMENTINE GRAND^b, Pr VINCENT GREMEAUX-BADER^{c,d}, Dre VANESSA KRAEGE^{e,d} et Dr DENIS COMTE^{a,d}

Rev Med Suisse 2024; 20: 2181-5 | DOI : 10.53738/REVMED.2024.20.896.2181



les bienfaits du Muscle...

Notre mobilité, notre activité physique dépendent du bon fonctionnement de nos muscles. **Mais pas seulement ! L'exercice musculaire est bénéfique pour nos fonctions vitales.**



LE SAVEZ-VOUS

Lors de l'exercice musculaire, le muscle sécrète et diffuse dans l'organisme de petites molécules, appelées myokines. Bénéfiques à tout notre corps, elles ont notamment des effets sur le cerveau, et expliquent les liens observés entre l'activité musculaire et la cognition. Le muscle, via la libération des myokines, est donc un véritable allié de notre santé.

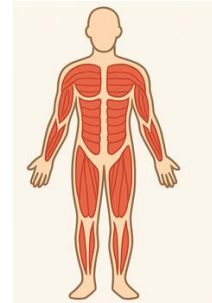




Oui, mais quels muscles?

Pour bouger!

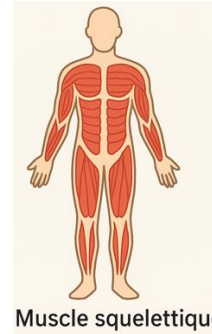
- Les muscles squelettiques :
 - les mouvements volontaires et la respiration
 - Sans eux, ni mouvement ni respiration efficaces.



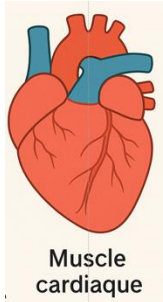
Muscle squelettique

Pour bouger!

- Les muscles squelettiques :
 - les mouvements volontaires et la respiration
 - Sans eux, ni mouvement ni respiration efficaces.

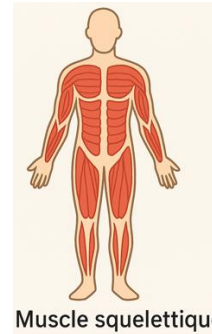


- Le muscle cardiaque :
 - faire circuler le sang et l'oxygène
 - Sans lui, les muscles ne recevraient ni l'oxygène ni les nutriments.

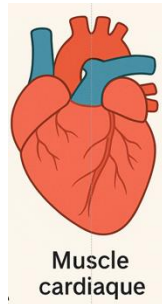


Pour bouger!

- Les muscles squelettiques :
 - les mouvements volontaires et la respiration
 - Sans eux, ni mouvement ni respiration efficaces.



- Le muscle cardiaque :
 - faire circuler le sang et l'oxygène
 - Sans lui, les muscles ne recevraient ni l'oxygène ni les nutriments.

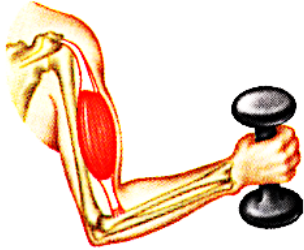
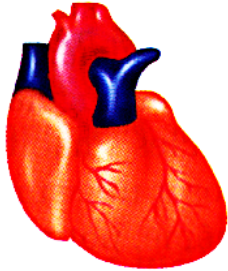



- Les muscles lisses
 - la respiration et les fonctions internes
 - Sans eux, l'air et le sang ne circuleraient pas correctement dans le corps

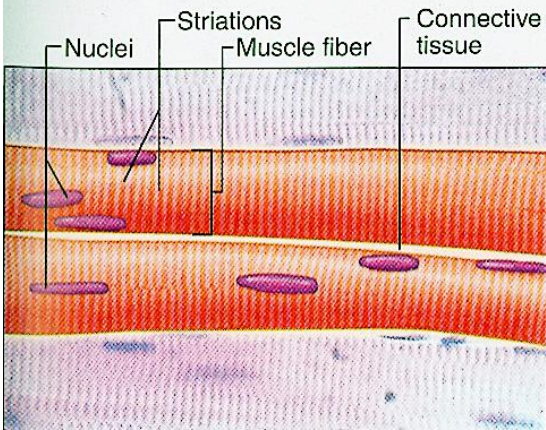
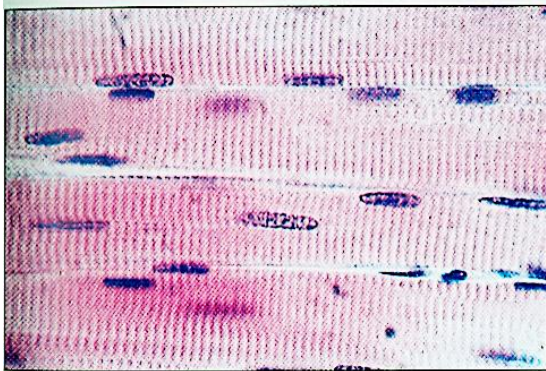


Le tissu musculaire

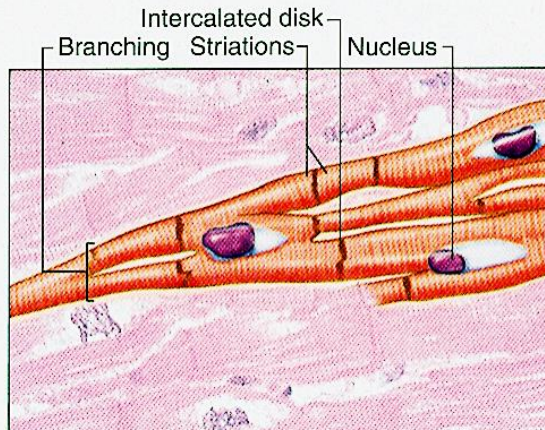
La fonction **principale** des muscles est de générer une force ou un mouvement en réponse à un stimulus.

<i>Squelettiques</i>	<i>Cardiaque</i>	<i>Lisses</i>
Attachés aux os ou à la peau (pour certains muscles faciaux)	Parois du cœur	Muscles unitaires situés dans les parois des organes viscéraux creux (autres que le cœur); muscles multiunitaires situés dans les yeux (muscles ciliaire et sphincter de la pupille)
		
Cellules autonomes, très longues, cylindriques, multinucléées et portant des stries transversales évidentes	Chaînes ramifiées de cellules; à un ou deux noyaux; striées	Cellules autonomes, fusiformes, mononucléées et non striées

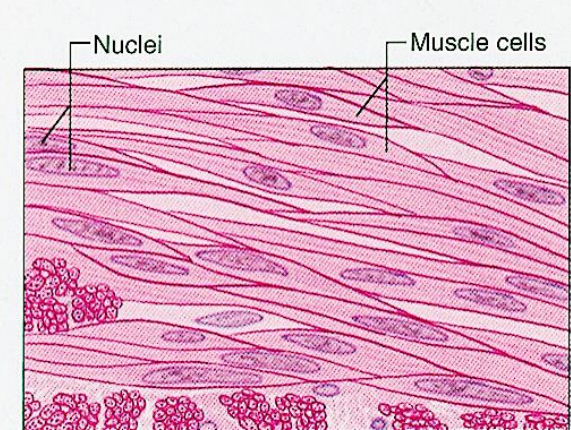
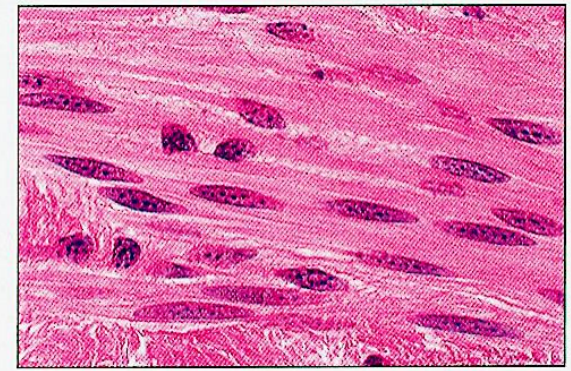
Le tissu musculaire



Muscle squelettique



Muscle cardiaque



Muscle lisse

Muscles striés

Enseignement « Muscle Squelettique »

1 BA

3 BA

Mon cours:
Bases moléculaires de la contraction

Enseignement « Muscle Squelettique »

1 BA

3 BA

Cours P. Soulié:
Histologie



Mon cours:
Bases moléculaires de la contraction

Enseignement « Muscle Squelettique »

1 BA

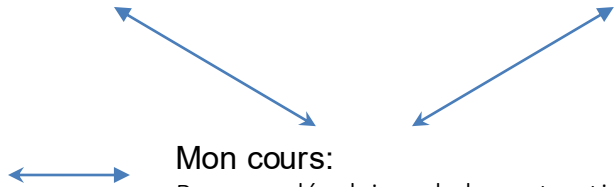
3 BA

Cours C. Quairiaux:
Système Autonome

Cours. Montessuit:
Fonction cardiaque
Couplage coeur-vaisseaux

Cours P. Soulié:
Histologie

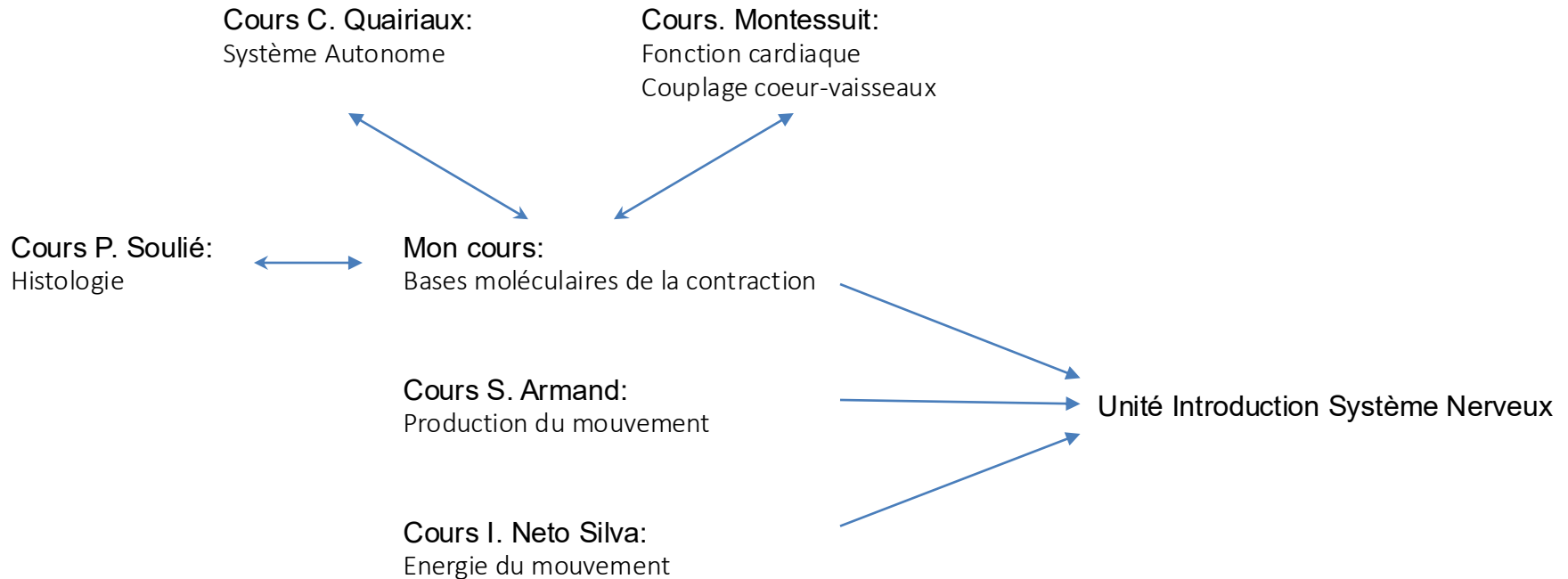
Mon cours:
Bases moléculaires de la contraction



Enseignement « Muscle Squelettique »

1 BA

3 BA



Plan

- **Muscle squelettique:**
 - Structure / fonction
 - Bases moléculaires de la contraction
 - Couplage excitation-contraction
 - Unité motrice
 - Fibres lentes / rapides
 - Comprendre le reflexe myotatique
- **Muscle cardiaque:**
 - Bases moléculaires de la contraction
- **Muscle lisse:**
 - Bases moléculaires de la contraction
 - Contrôle de la contraction
 - Contrôle de la relaxation

Le muscle strié squelettique

- + de 600 muscles, ~40 % du poids total
- Mouvement volontaire



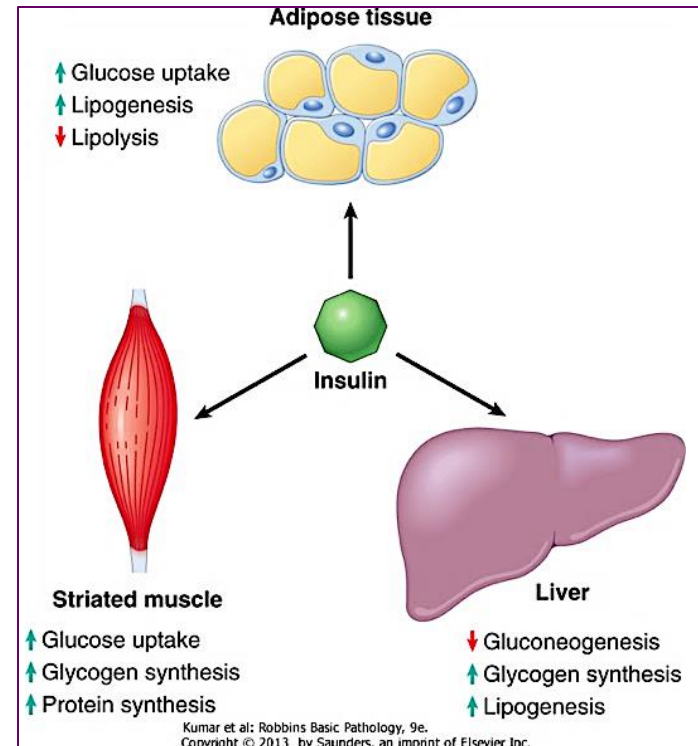
Fonctions des muscles

- **Production du mouvement**
 - Locomotion et manipulation
- Maintien de la posture
 - Ajustement permanent des muscles
- Stabilisation des articulations
 - Collaboration avec les ligaments et tendon
- Régulation de la température corporelle
 - Produisent de la chaleur et participent à la thermogénèse
- Protection des organes
- Respiration

Autres Fonctions des Muscles Squelettiques

•Fonctions des muscles:

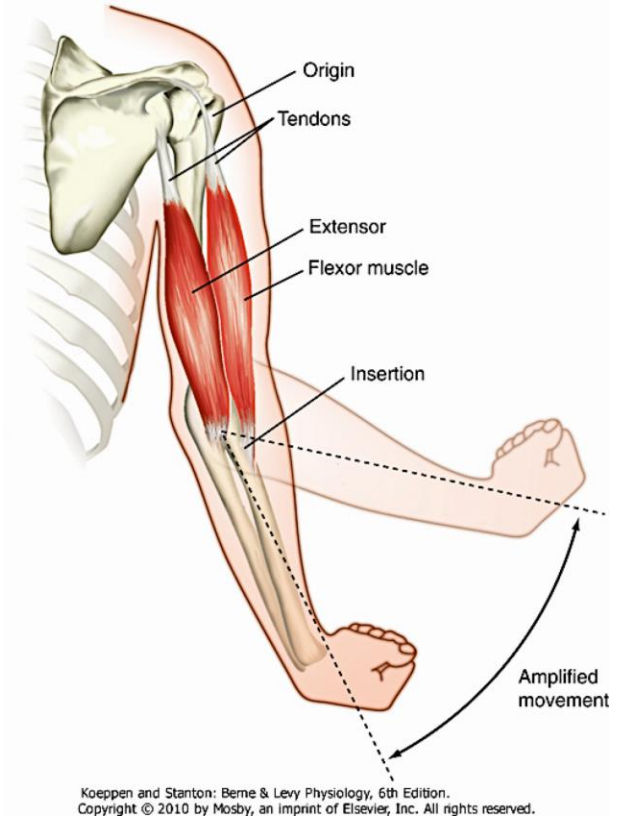
- Produire du mouvement
- Maintenir la posture
- Respirer
- Langue
- Stabiliser les articulations
- Produire de la chaleur
- Myokines
- ...



Muscles Squelettiques :Résumé

Les muscles squelettiques striés:

- Sont constitués de fibres musculaires striées
- Recouvrent le squelette osseux
- Constituent environ 40% de la masse corporelle
- Plus de 600 muscles
- Peuvent être maîtrisés volontairement

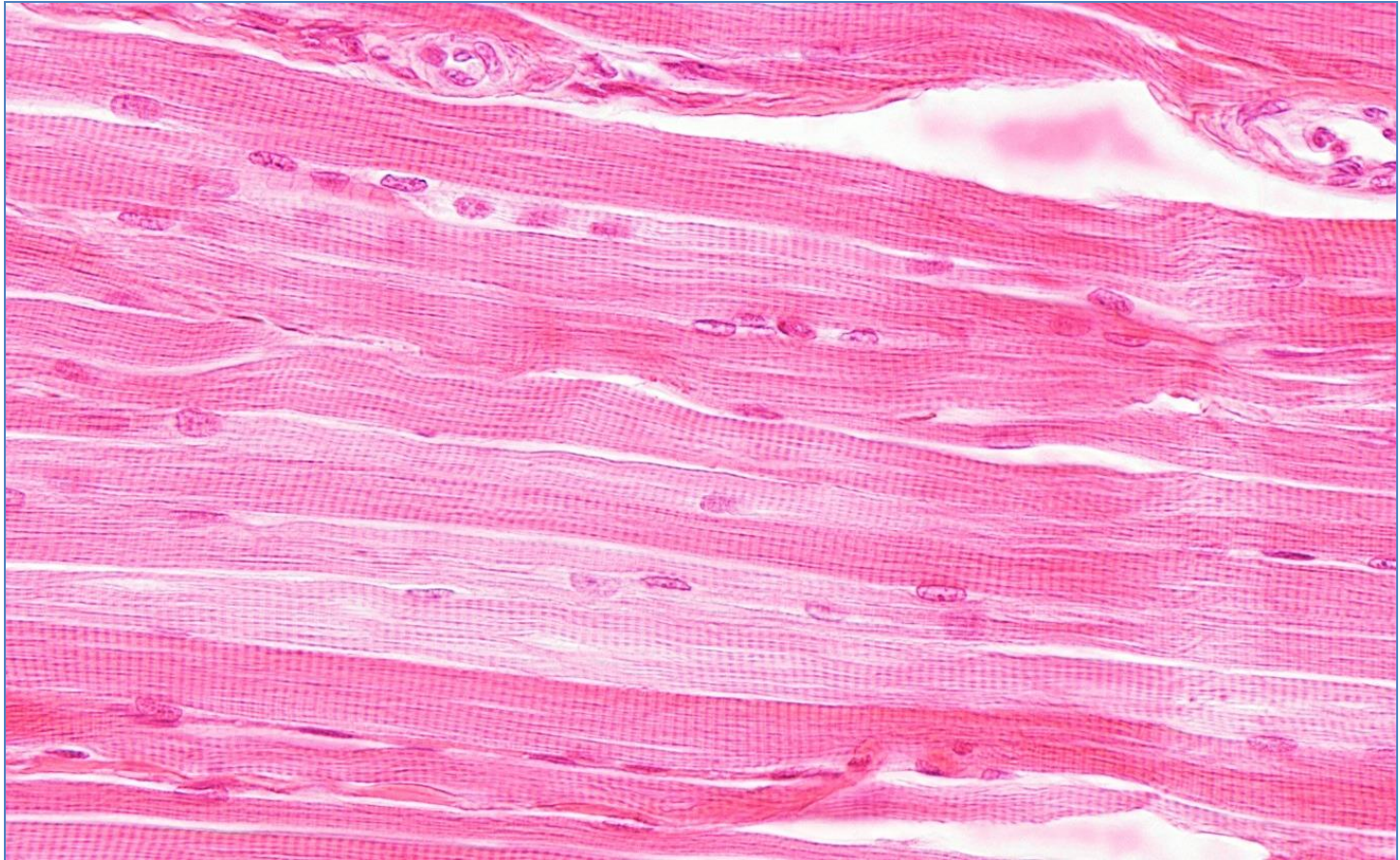


Muscles Squelettiques

- Caractéristiques fonctionnelles:
 - **Excitabilité:**
C'est la faculté de percevoir un stimulus (neurotransmetteur) et d'y répondre.
 - **Contractilité:**
C'est la capacité de se contracter en réaction à un stimulus adéquat.
 - **Elasticité:**
L'élasticité est une propriété physique du muscle. C'est la capacité qu'ont les muscles squelettiques de se contracter et de reprendre leur longueur de repos.
 - **Extensibilité:**
C'est la capacité de s'étirer au-delà de sa longueur de repos.
 - **Plasticité:**
Selon le type d'utilisation le muscle s'adapte au type d'effort.

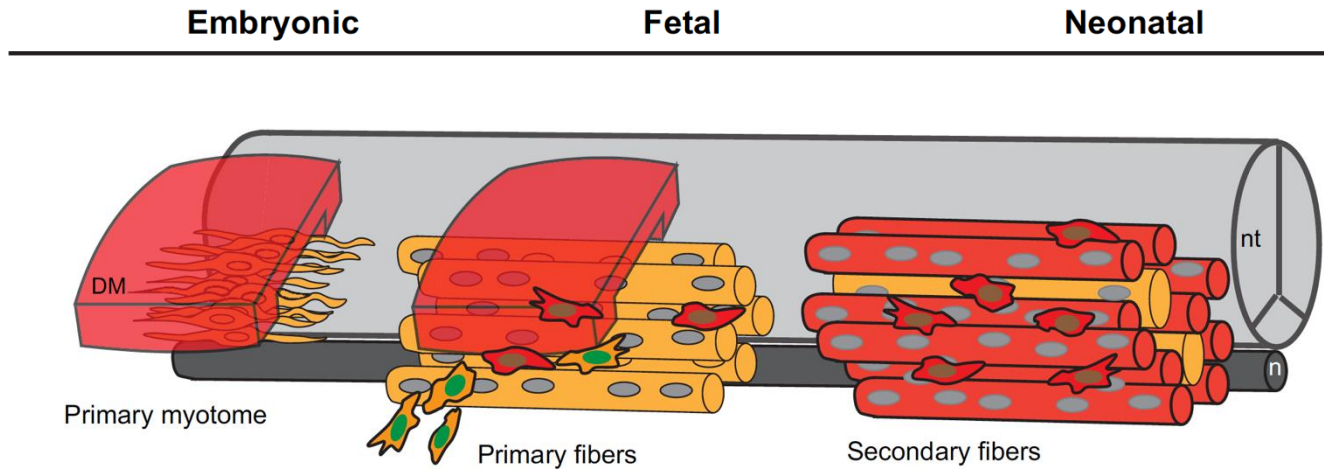
Muscles Squelettiques : fibres musculaires

Cours Priscilla Soulié



1 cellule: plusieurs noyaux (cellules multi-nucléée) = très grande cellule

Formation des muscles squelettiques



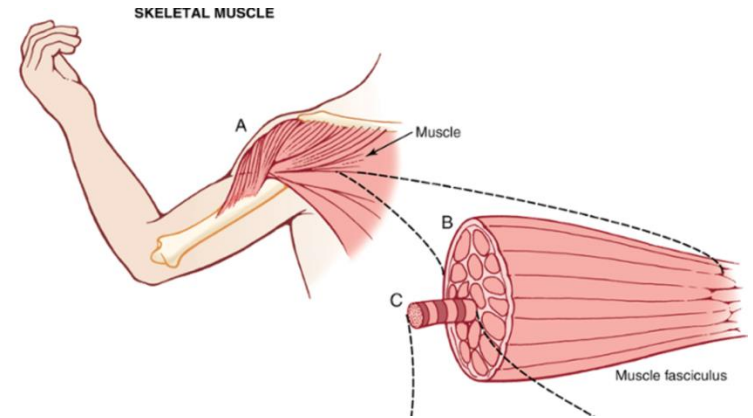
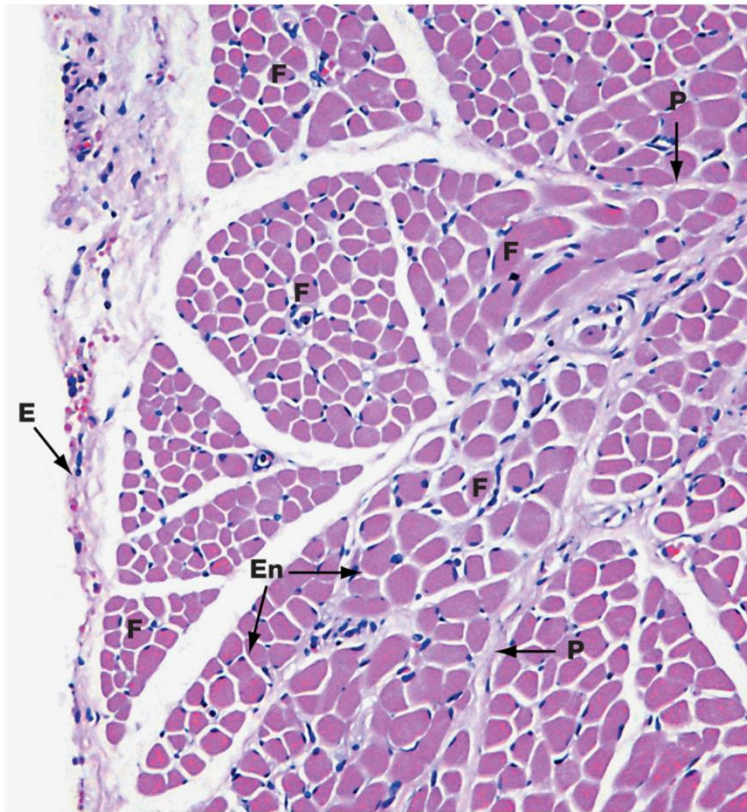
1 - Fusion de précurseurs musculaires
(myoblastes)

2 - Mise en place de la matrice extracellulaire
- Innervation / Formation de la jonction neuromusculaire

3 - Spécialisation des fibres musculaires (Type 1 / Type 2)
- Mise en place des cellules souches du muscles (cellules satellites)

Organisation générale du muscle squelettique: faisceaux

Coupe transversale d'un muscle squelettique



Chaque muscle est organisé en plusieurs faisceaux

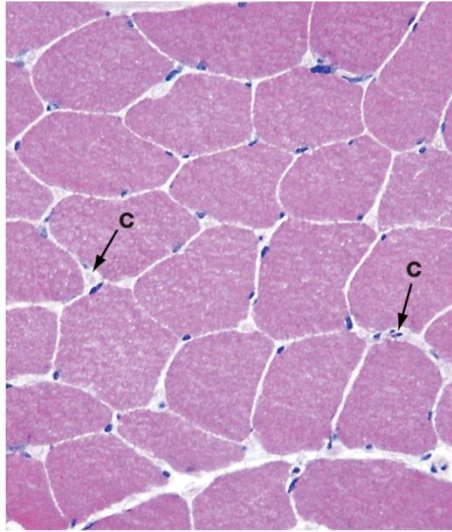
E: Epimysium entoure les muscles

P: Périmysium entoure les faisceaux (F)

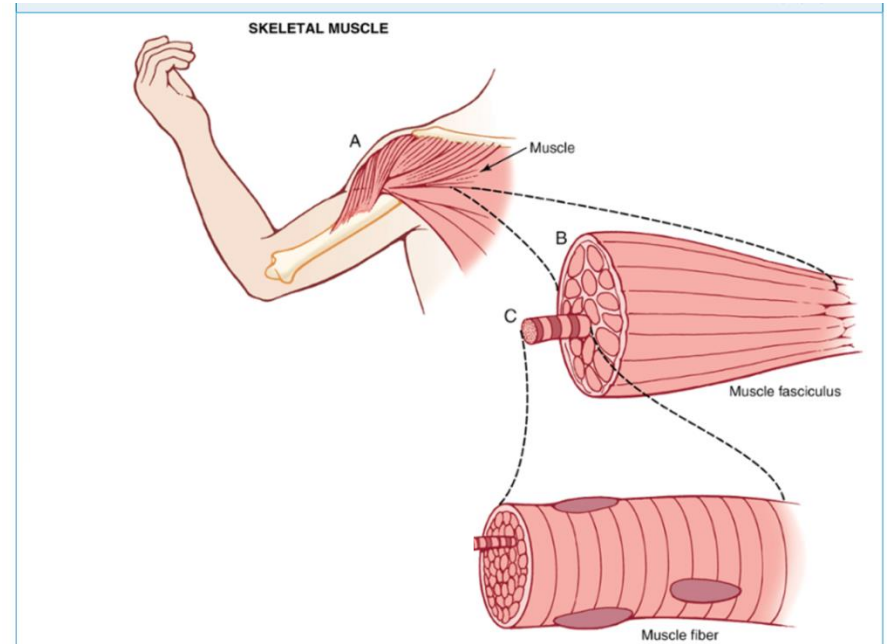
En: Endomysium entoure les fibres

Organisation générale du muscle squelettique: cellules

Coupe transversale d'un muscle squelettique



c : capillaires



Chaque faisceau comporte plusieurs fibres musculaires

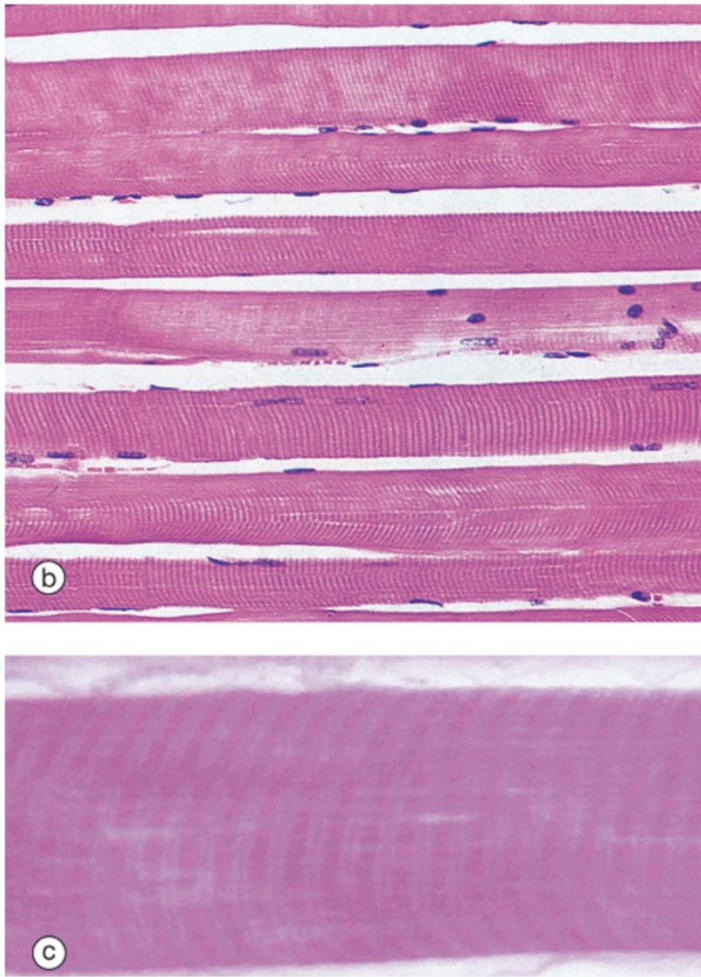
Chaque fibre musculaire est une cellule multinucléée!

Organisation générale du muscle squelettique:

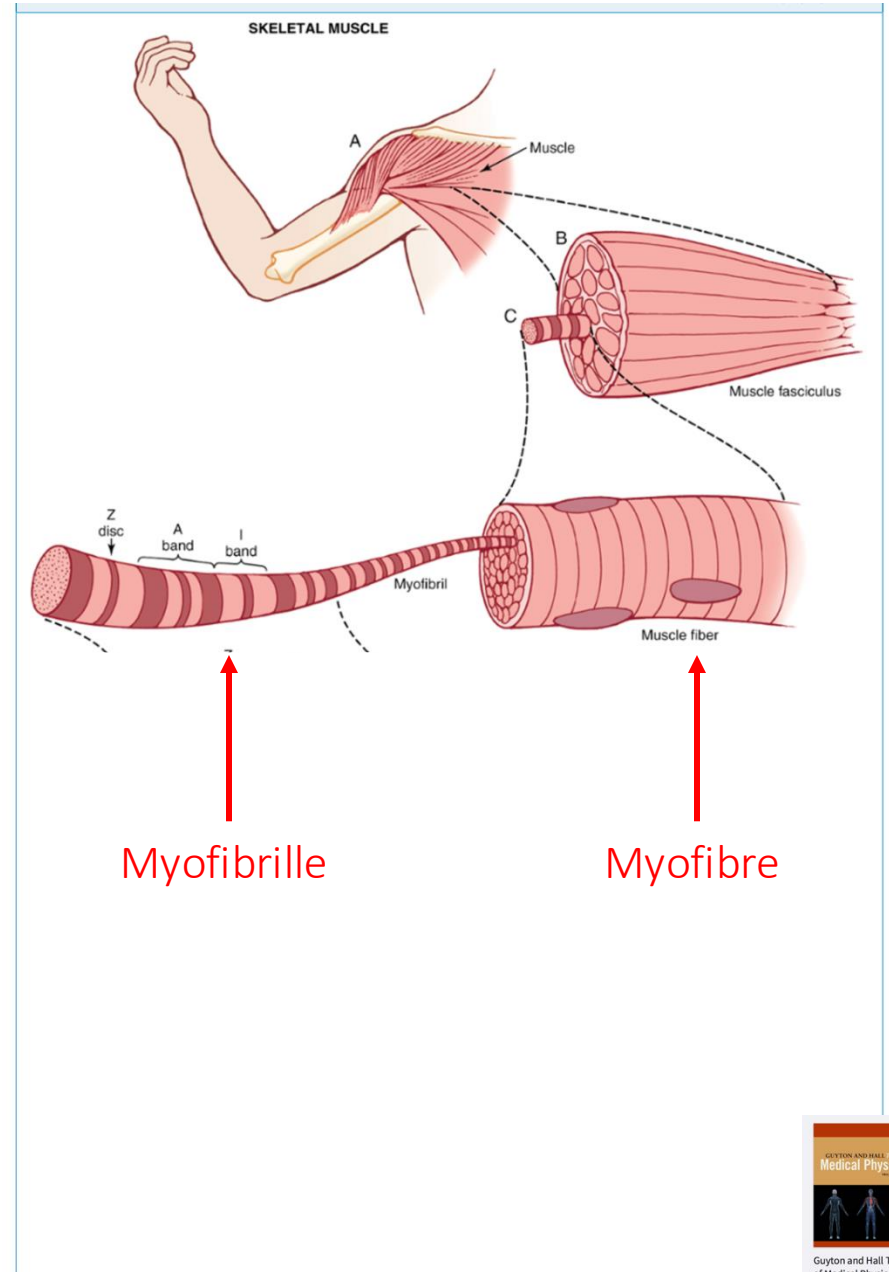
Les myofibrilles

Organisation générale du muscle squelettique: myofibrilles

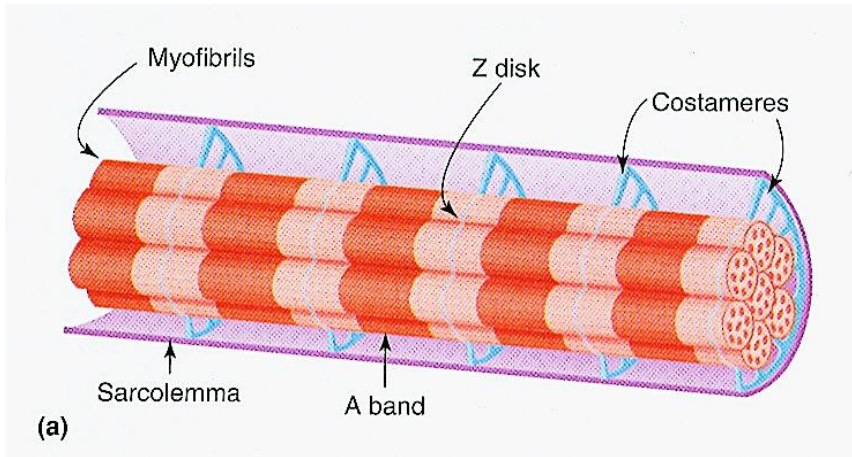
Coupe longitudinale d'un muscle squelettique



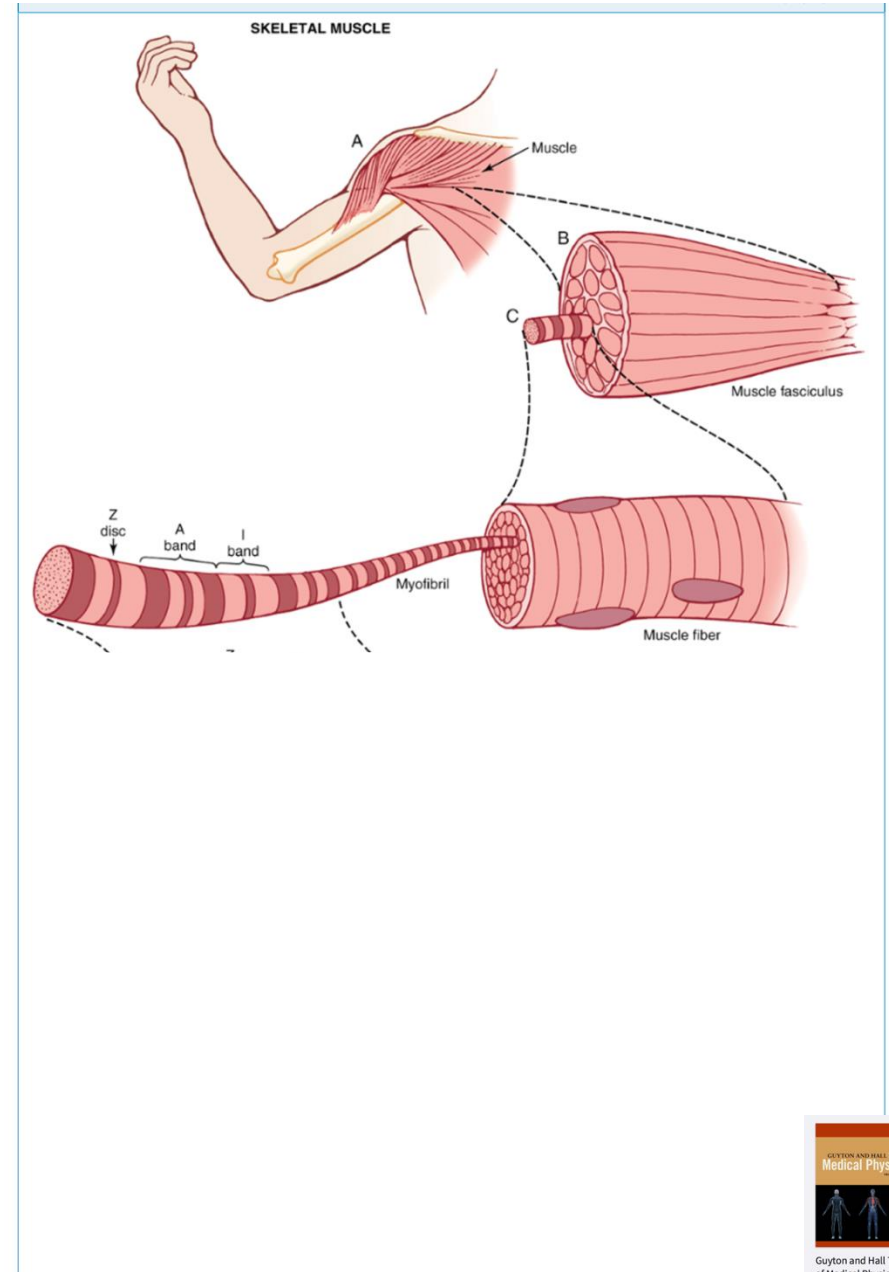
(b) H & E LS ×310 (c) H & E LS ×500



Organisation générale du muscle squelettique: myofibrilles



Les Myofibrilles sont toutes alignées **en parallèle** dans une cellule des muscles squelettiques

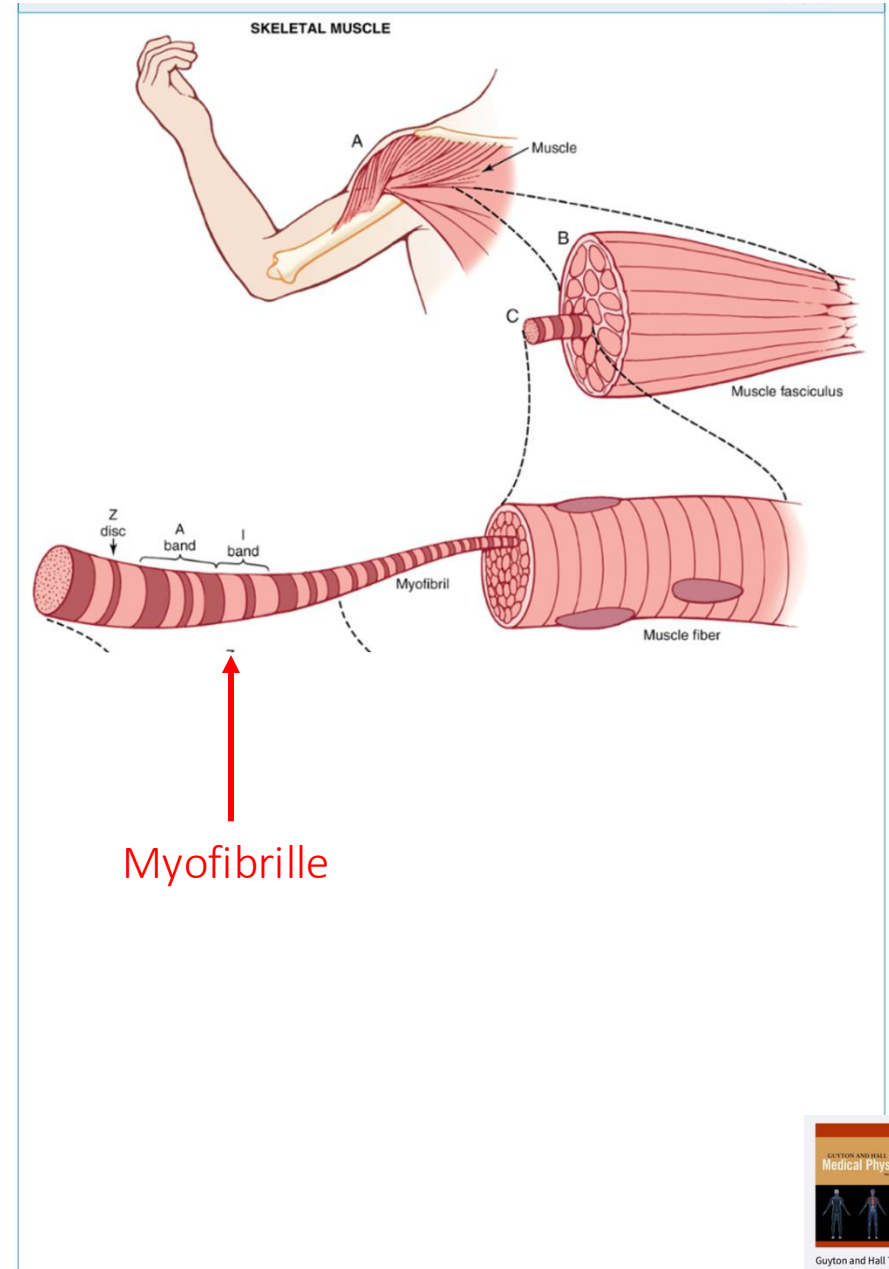
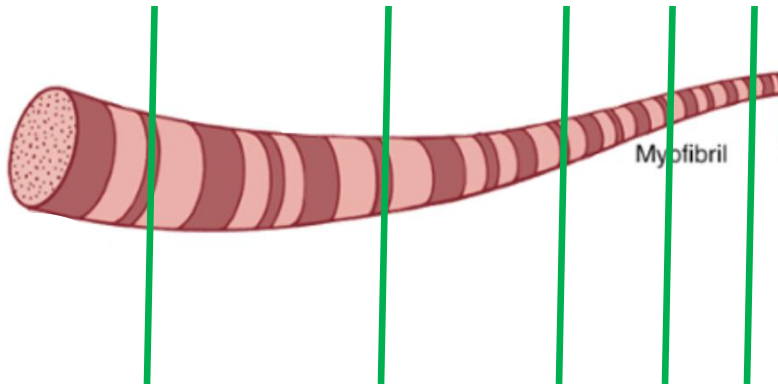


Organisation générale du muscle squelettique:

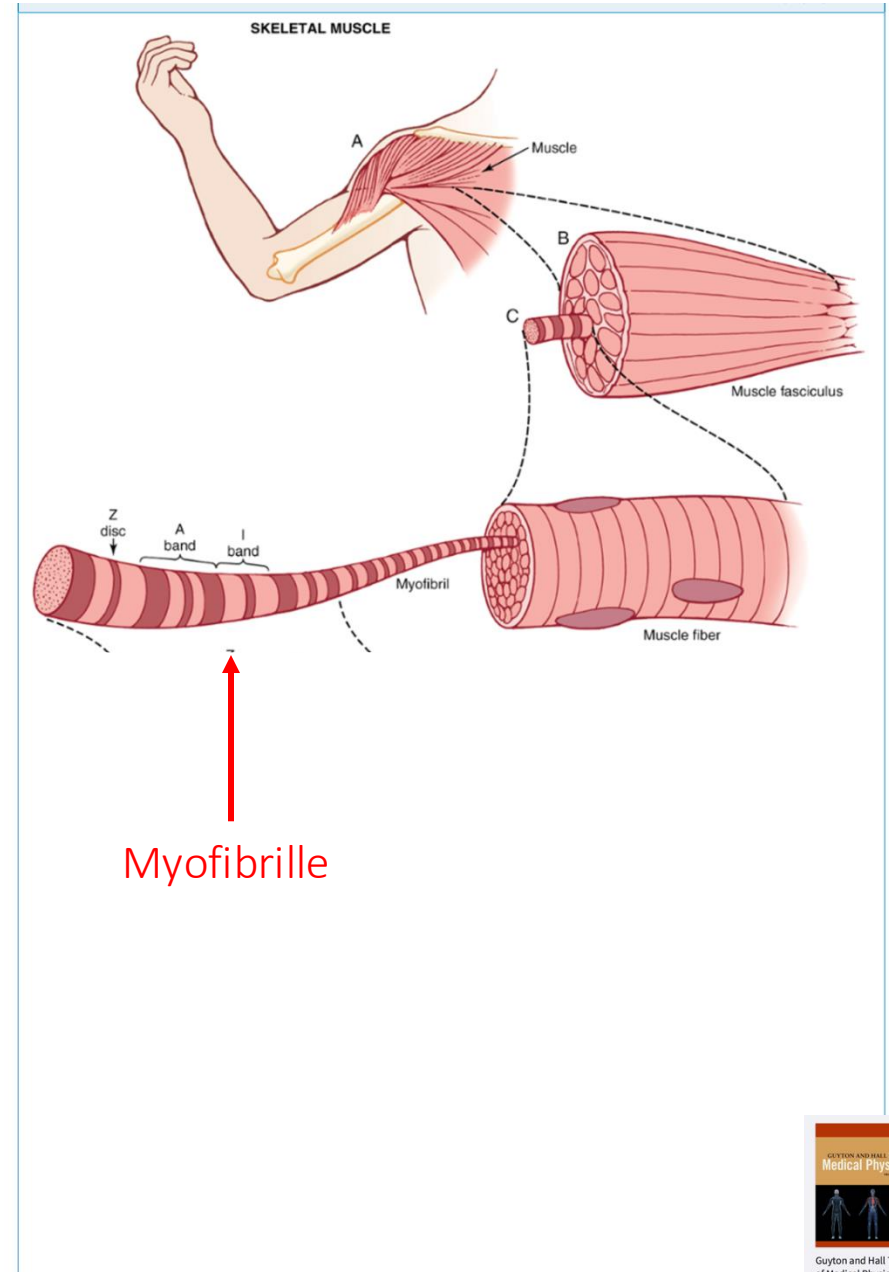
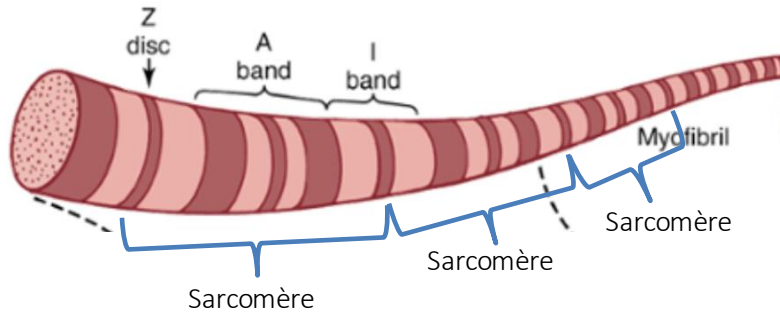
Le sarcomère

Organisation générale du muscle squelettique: sarcomère

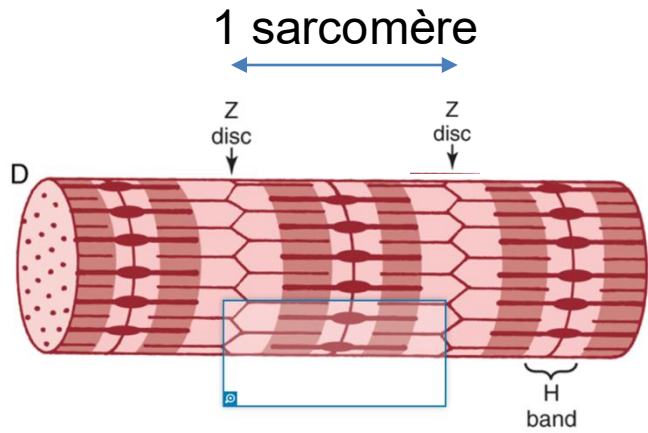
Répétitions en série



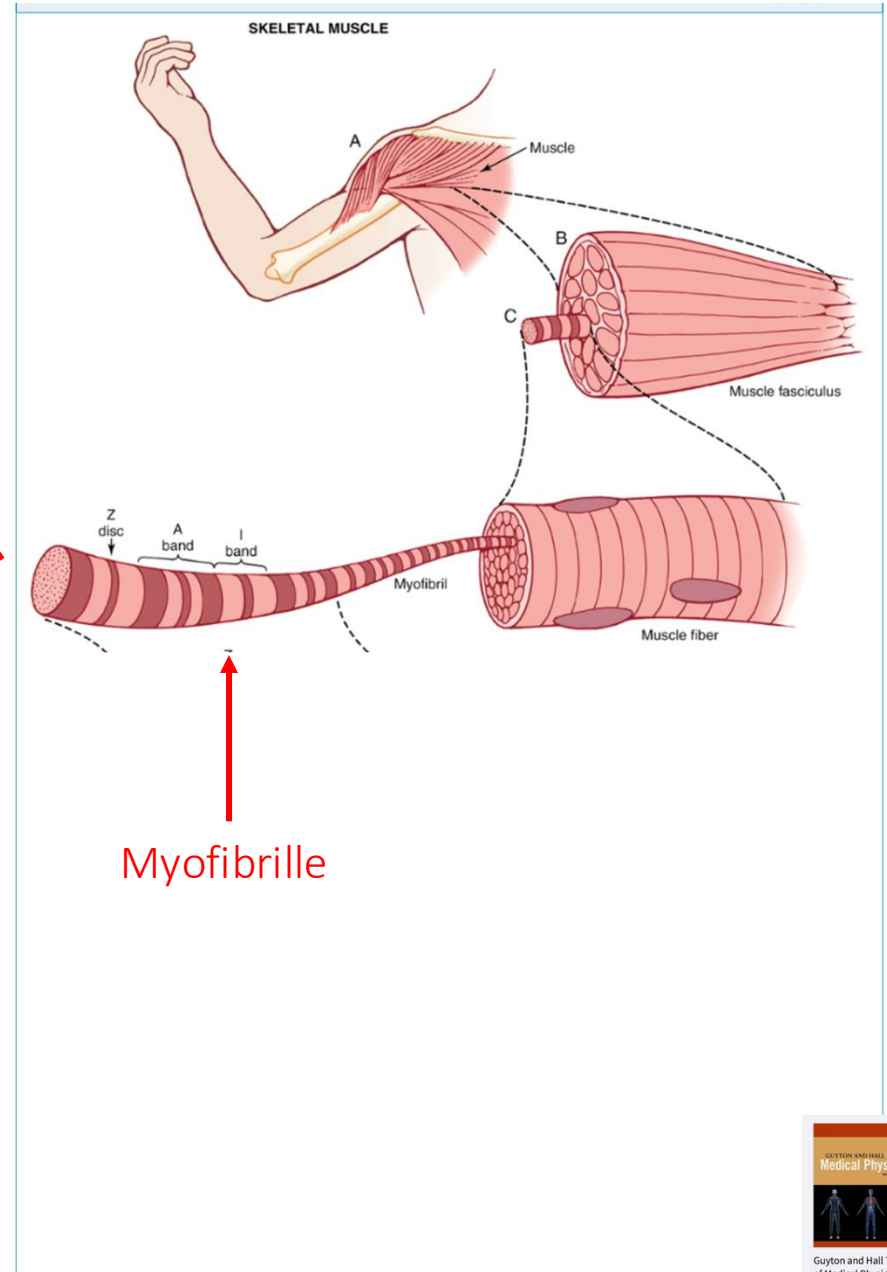
Organisation générale du muscle squelettique: sarcomère



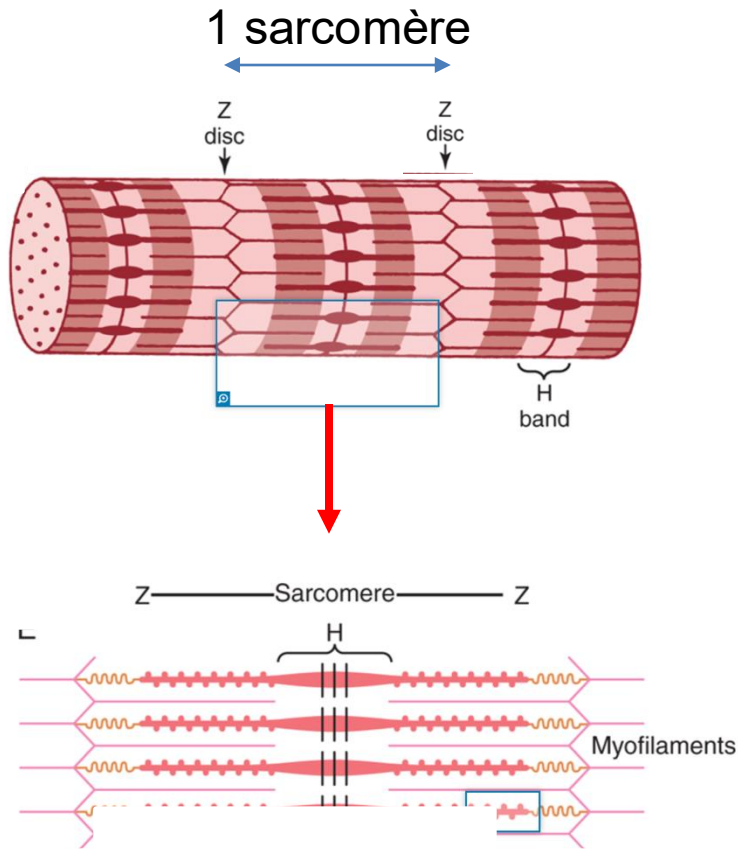
Organisation générale du muscle squelettique: sarcomère



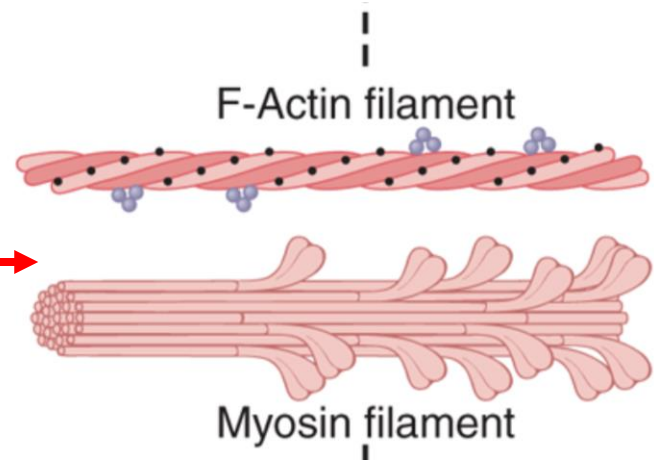
Sarcomère:
Unité minimale de
contraction située entre 2
disques Z



Organisation générale du muscle squelettique: sarcomère

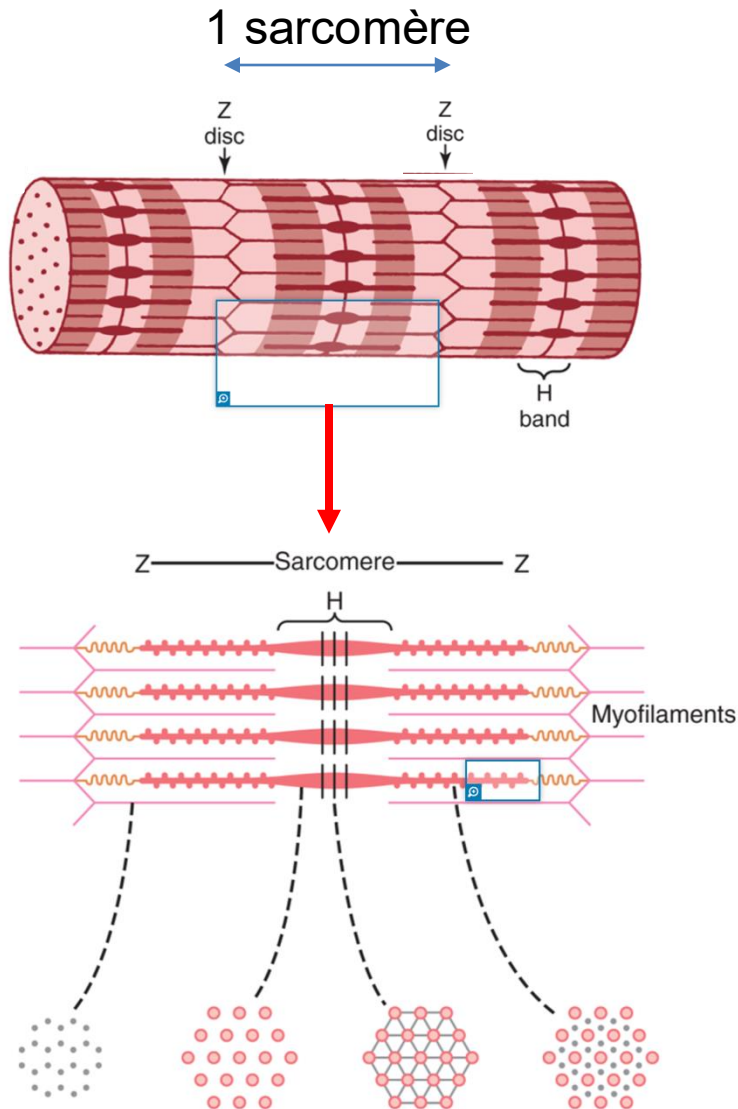


Filaments fins: actine + autres

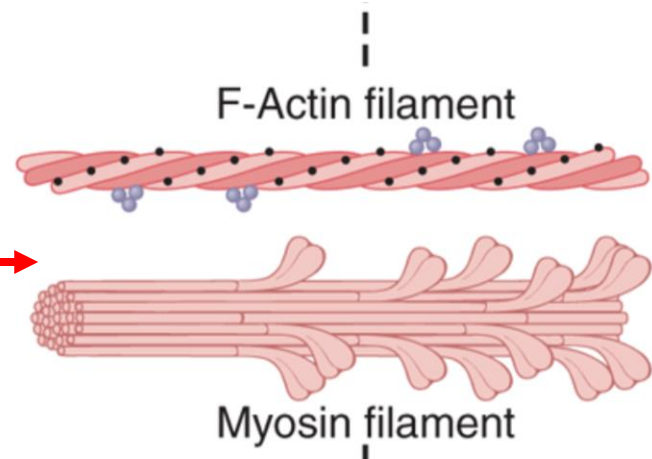


Filaments épais: myosines

Organisation générale du muscle squelettique: sarcomère



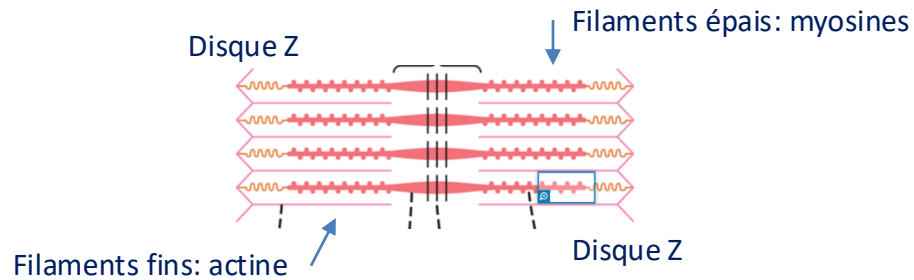
Filaments fins: actine + autres



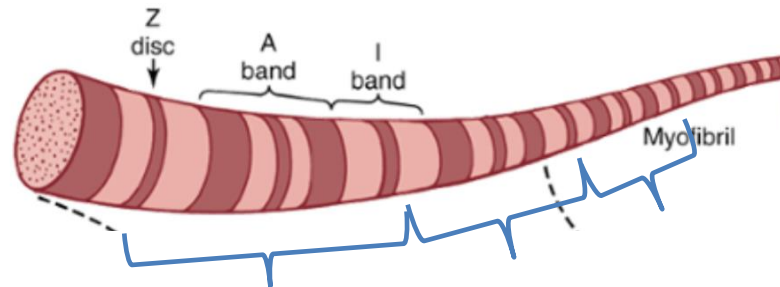
Filaments épais: myosines

Organisation générale du muscle squelettique: Résumé

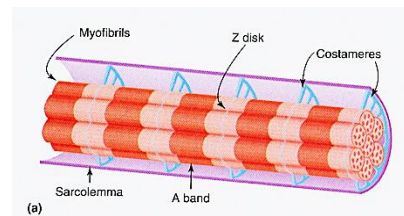
1 – Le sarcomère est l'unité minimale de contraction située entre 2 disques Z



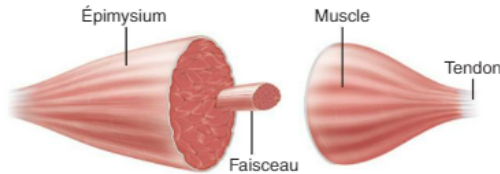
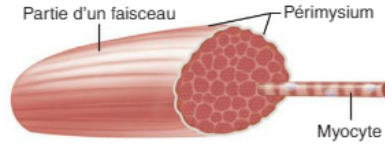
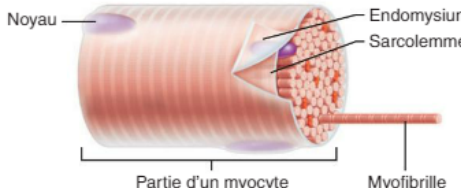
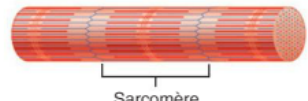
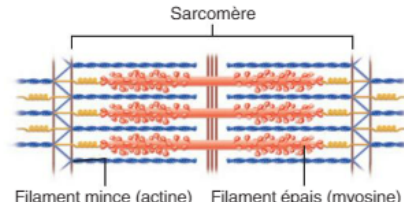
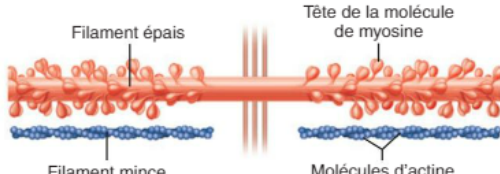
2 – Chaque myofibrille est composé d'un alignement **en série** de sarcomères



3 – Les Myofibrilles sont toutes alignées **en parallèle** dans une cellule des muscles squelettiques



Structure du muscle : Résumé

STRUCTURE ET NIVEAUX D'ORGANISATION	DESCRIPTION	GAINES DE TISSU CONJONCTIF
<p>Muscle (organe)</p> 	Un muscle est constitué de centaines ou de milliers de cellules musculaires ainsi que de gaines de tissu conjonctif, de vaisseaux sanguins et de neurofibres.	Recouvert par l'épimysium
<p>Faisceau (partie du muscle)</p> 	Un faisceau est un assemblage de myocytes, séparés du reste du muscle par une gaine de tissu conjonctif.	Recouvert par le périmysium
<p>Myocyte (fibre ou cellule musculaire)</p> 	Un myocyte est une cellule multinucléée allongée; son apparence est striée.	Recouverte par l'endomysium
<p>Myofibrille (organe complexe constitué de groupes de filaments)</p> 	Une myofibrille est un élément contractile cylindrique, constitué de sarcomères placés bout à bout; les myofibrilles occupent la plus grande partie du volume de la cellule musculaire; elles portent des stries, et les stries des myofibrilles voisines sont alignées.	—
<p>Sarcomère (segment d'une myofibrille)</p> 	Un sarcomère est une unité contractile, constituée de myofilaments de protéines contractiles.	—
<p>Myofilament ou filament (structure macromoléculaire)</p> 	Contractiles, les myofilaments sont de deux types (minces et épais); les filaments épais renferment un assemblage parallèle de molécules de myosine; les filaments minces renferment des molécules d'actine (ainsi que d'autres protéines); le raccourcissement du muscle est assuré par le glissement des filaments minces le long des filaments épais. Les filaments élastiques (non représentés ici) permettent le retour à la longueur au repos après le relâchement de la tension et contribuent à maintenir l'organisation du myofilament.	—

Organisation moléculaire des sarcomères:

Les myofilaments

Filaments fins

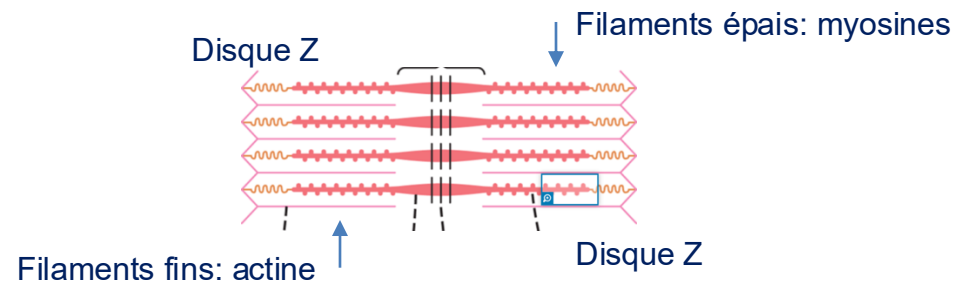
Filaments épais

Organisation moléculaire des sarcomères:

Les myofilaments

Filaments fins

Filaments épais



Myofilament ou filament (structure macromoléculaire)

Filament mince

Molécules d'actine



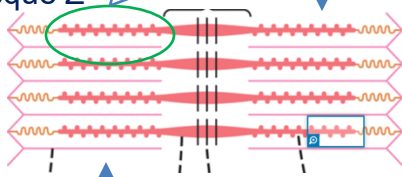
Filament épais

Tête de la molécule de myosine

Zoom

Disque Z

Filaments épais: myosines



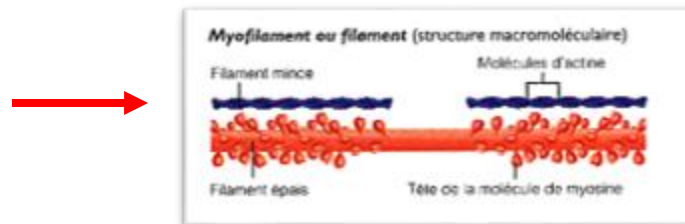
Disque Z

Filaments fins: actine

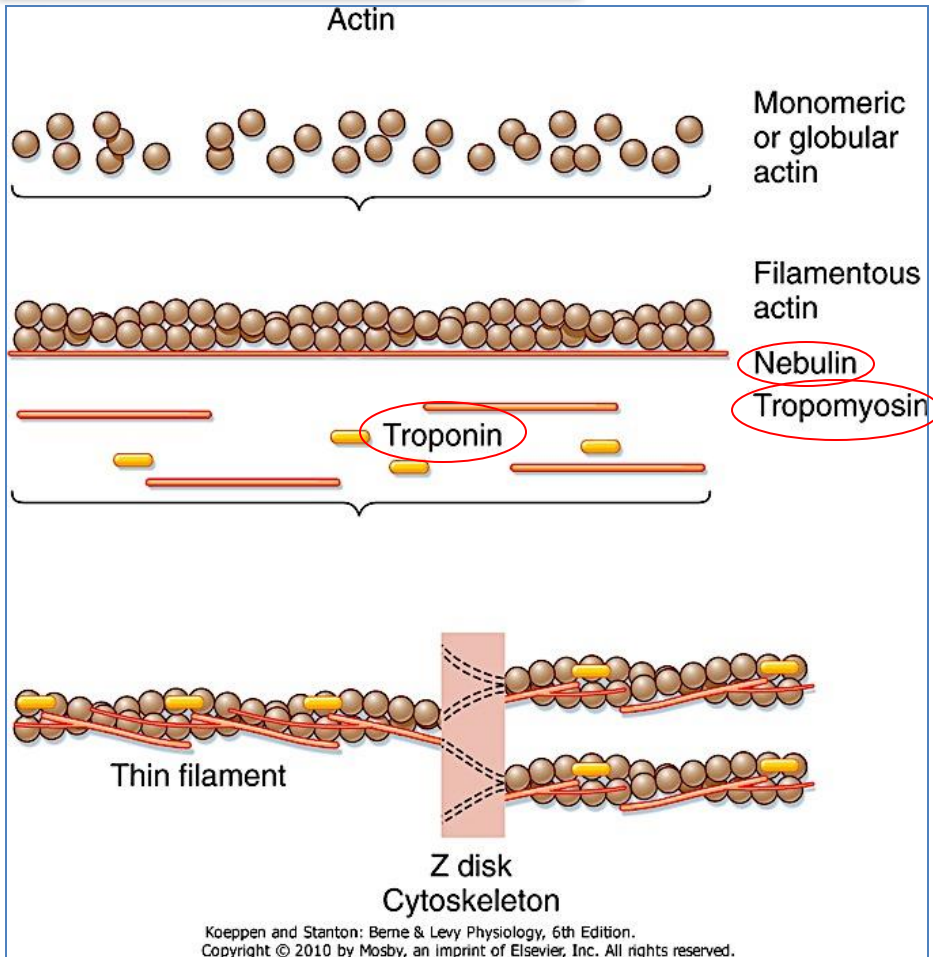
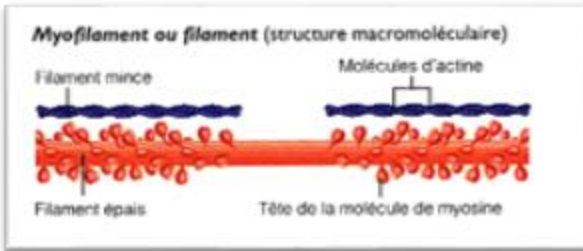
Organisation moléculaire des sarcomères:

Les myofilaments

Filaments fins



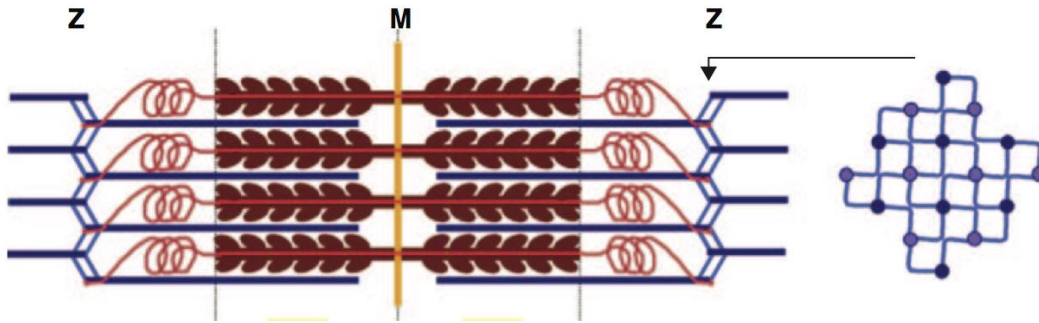
Organisation des Filaments Fins: Actine



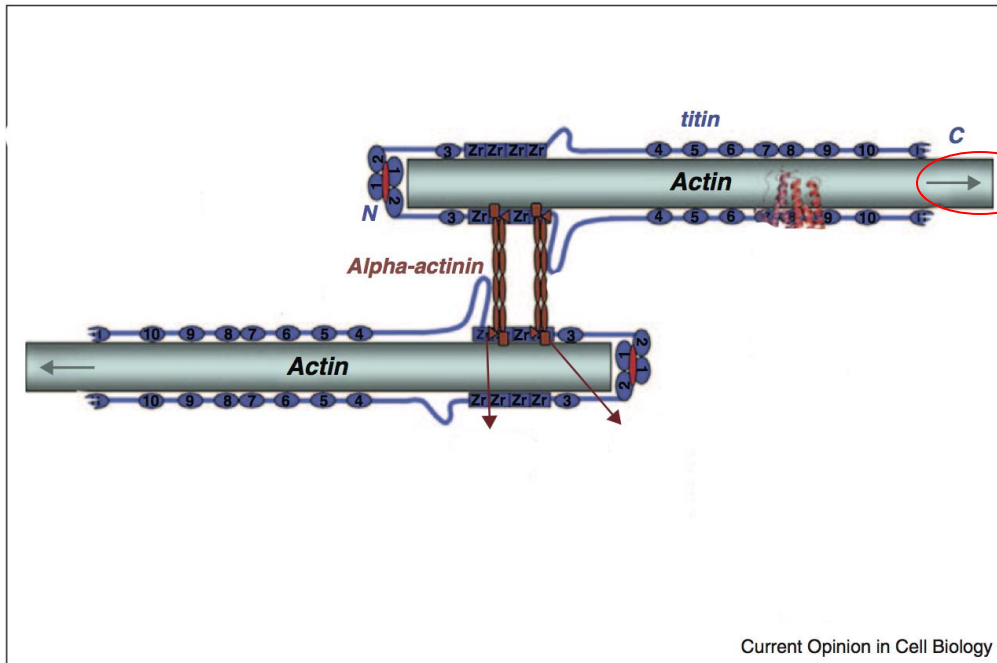
A savoir:

- Filaments d'actine
- Troponines (I, T,C)
- Tropomyosines
- Nebuline

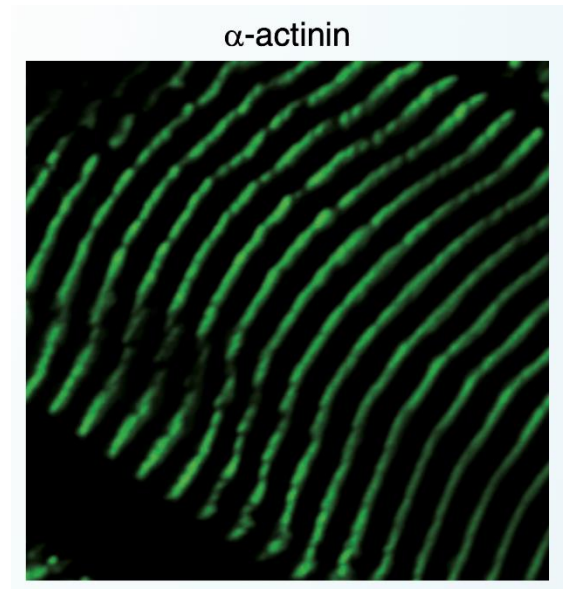
Muscle squelettique: alpha-actine



L'alpha-actinine se localise au niveau des lignes Z



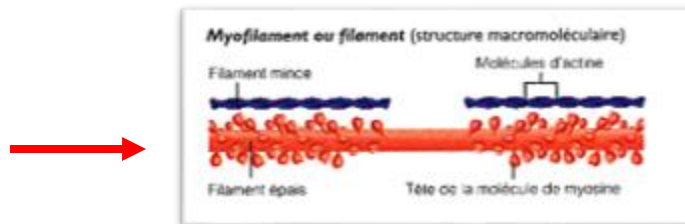
Current Opinion in Cell Biology



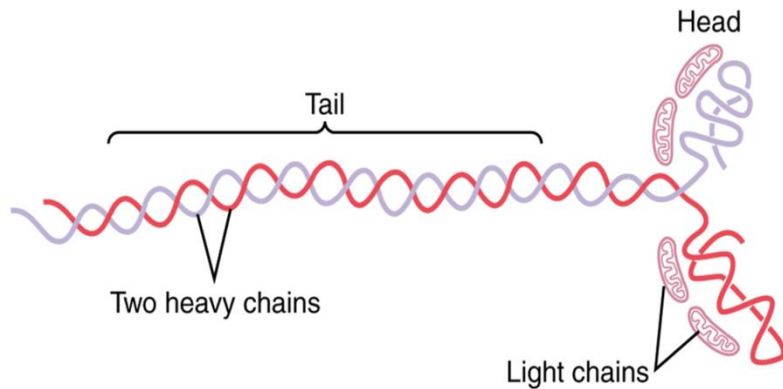
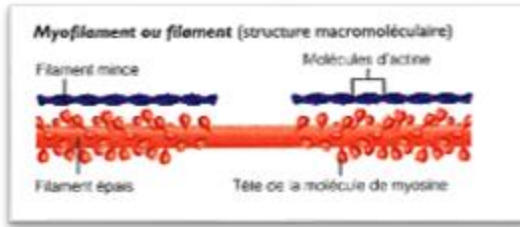
Organisation moléculaire des sarcomères:

Les myofilaments

Filaments épais

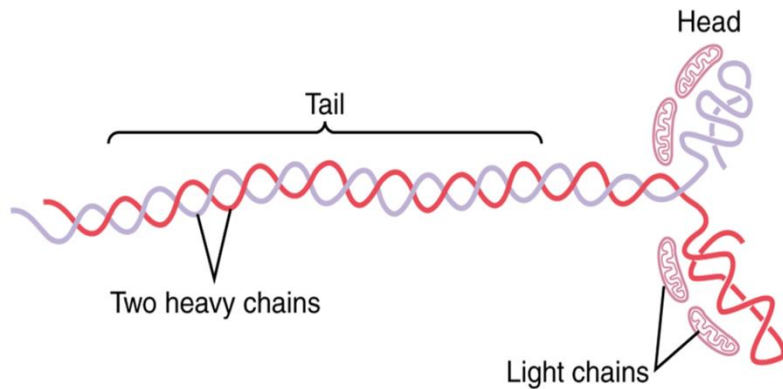
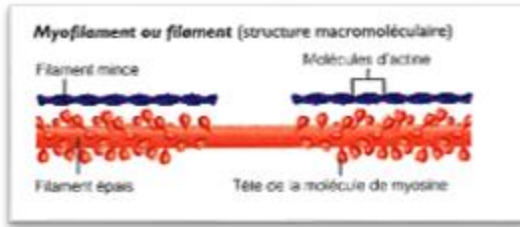


Organisation des Filaments Epais : Myosines



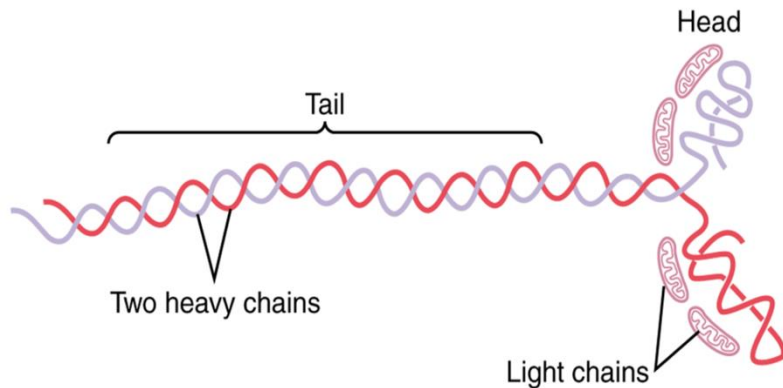
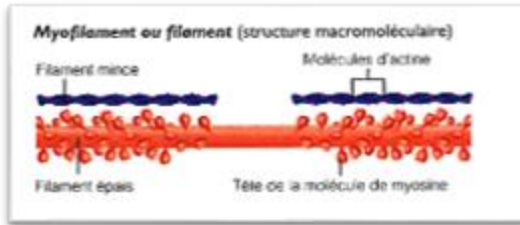
- Environ 200 molécules par filament épais
- Myosine II:
 - 2 Chaines lourdes de myosines (Myosin Heavy Chain)
 - 4 Chaines légères:
 - 2 chaines légères pour chaque chaine lourde
 - Rôle régulateur

Organisation des Filaments Epais : Myosines



- Chaines lourdes, deux parties:
 - Une queue entrelacée (structure)
 - 2 têtes globulaires formées par chacune des molécules de chaîne lourde de myosines

Organisation des Filaments Epais : Myosines

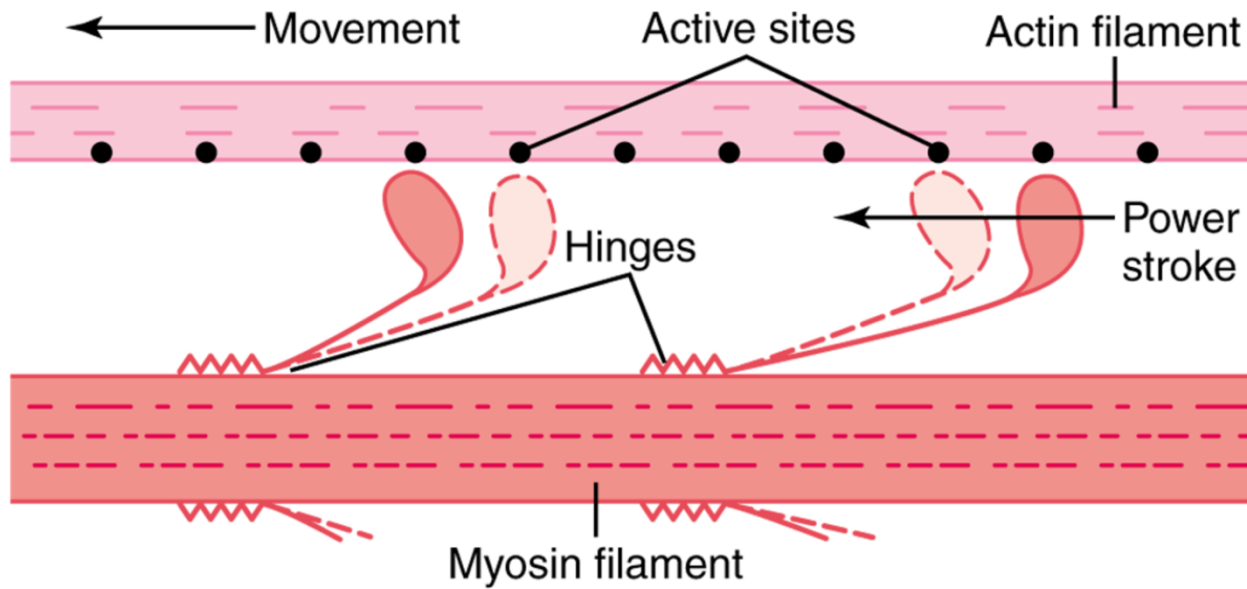


- Chaines lourdes, deux parties:
 - Une queue entrelacée (structure)
 - 2 têtes globulaires formées par chacune des molécules de chaîne lourde de myosines

Têtes globulaires des chaines lourde des myosines:

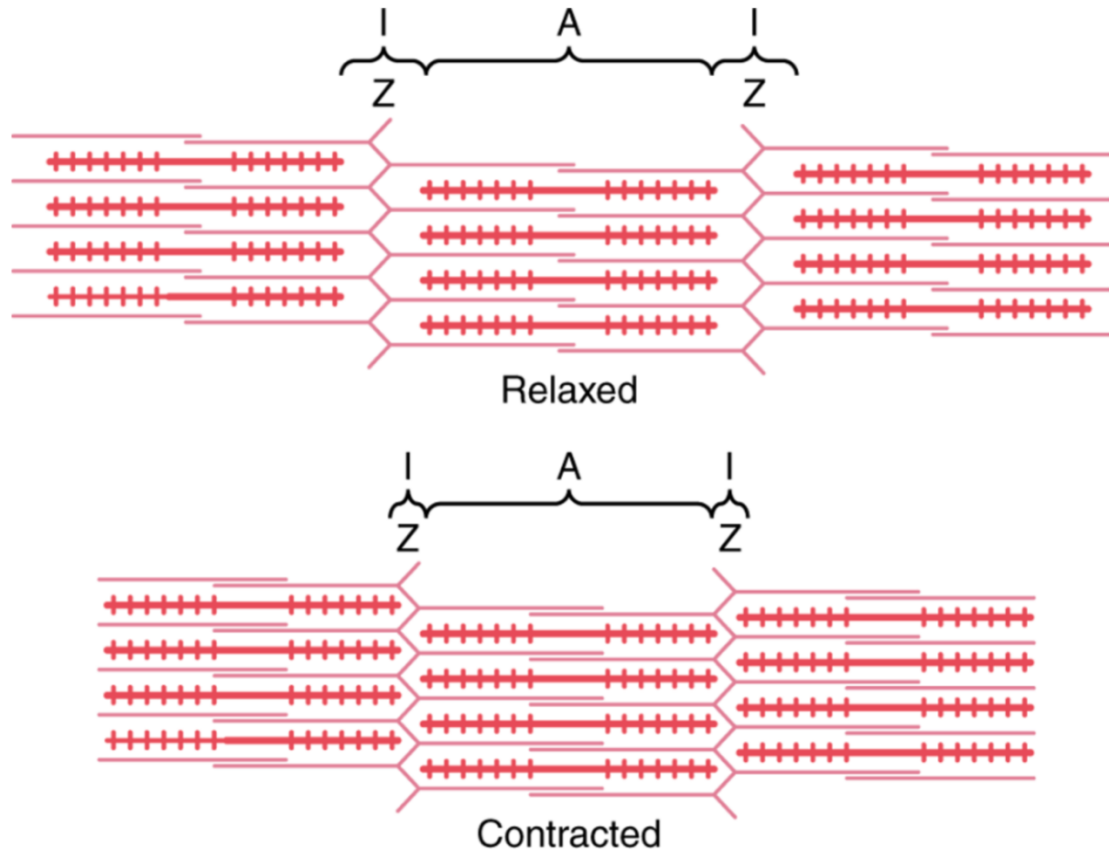
- Constituées par les chaines lourdes des myosines
- Site de liaison à l'ATP
- Activité ATPase
- Site interaction avec actine

Glissement des filaments



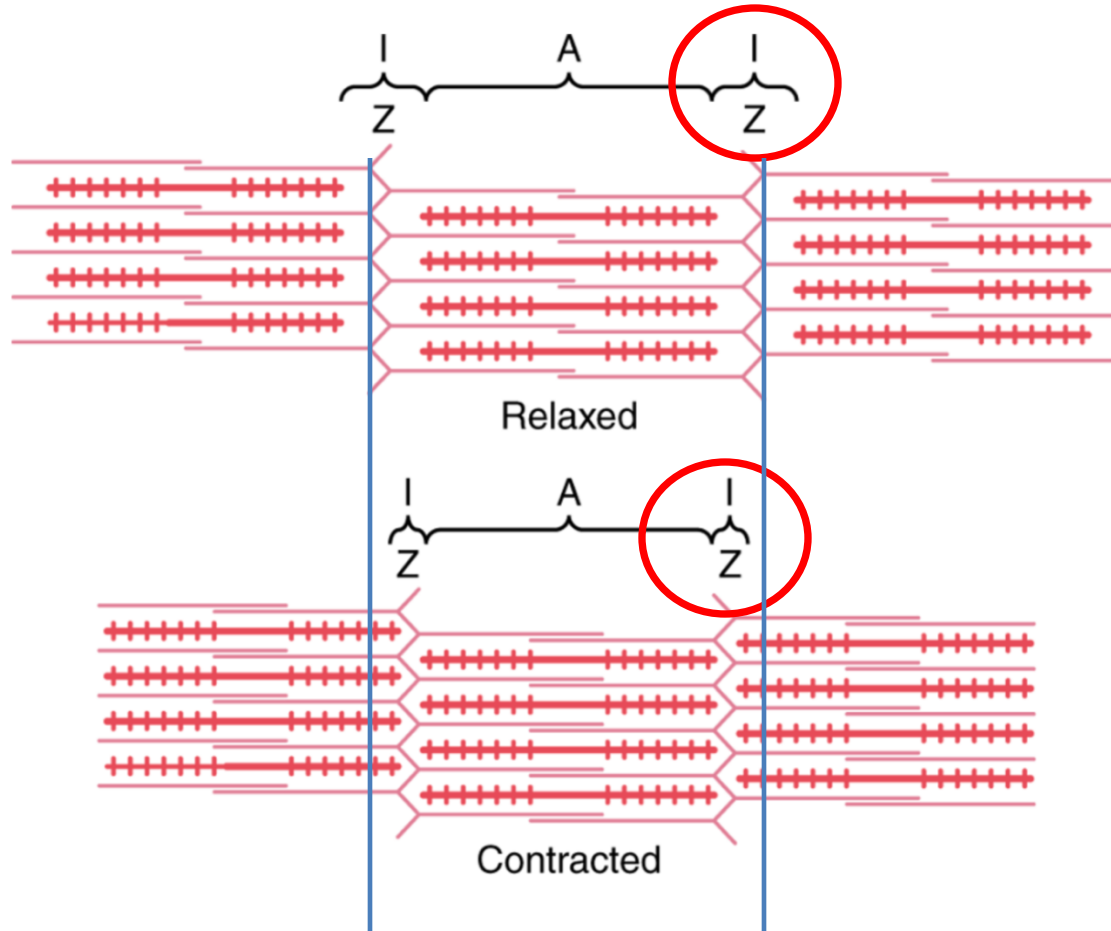
Les filaments fins et épais ne changent pas de taille lors d'une contraction.

Glissement des filaments



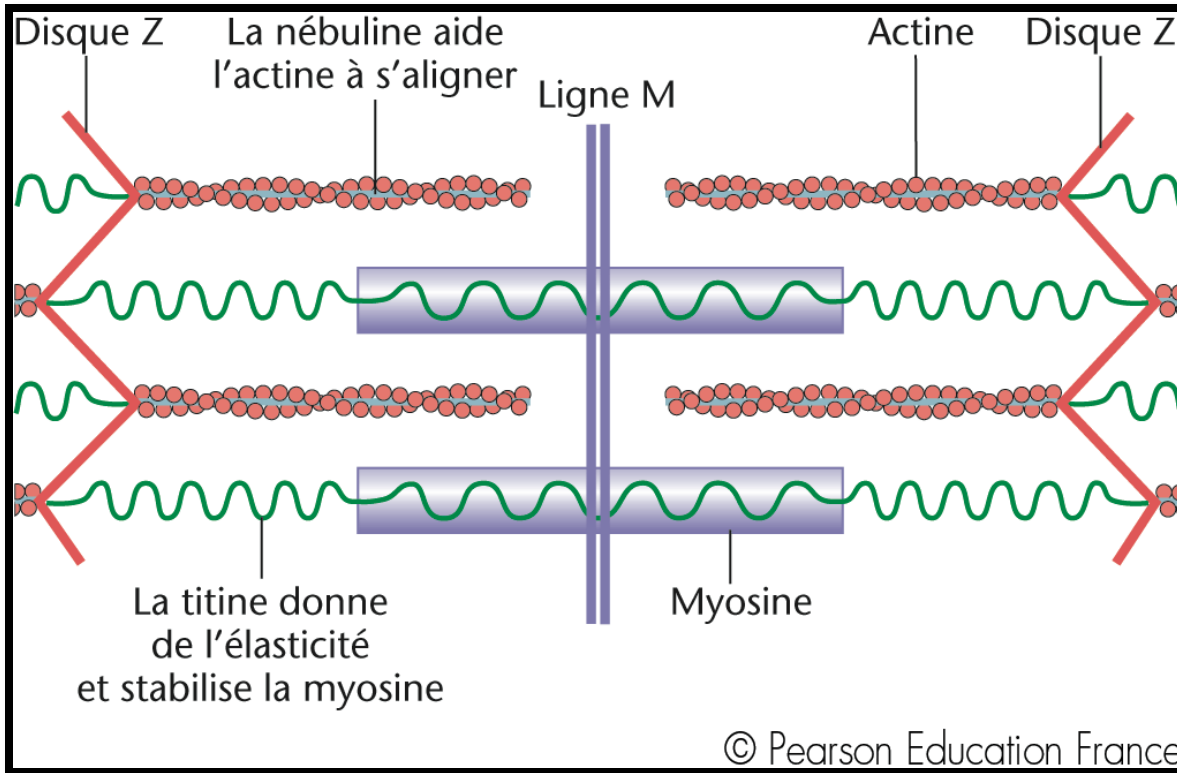
Les filaments fins et épais ne changent pas de taille lors d'une contraction.

Glissement des filaments



Les filaments fins et épais ne changent pas de taille lors d'une contraction.

Les myofilaments



Myosine: filaments épais (16 nm)

Actine: filaments minces (7-8 nm)

Titine: la plus longue protéine (25000 aa), filament élastique permet de maintenir les filaments de myosine centrés

Nébuline: très grande protéine non élastique définit longueur du filament d'actine

Contrôle des connaissances

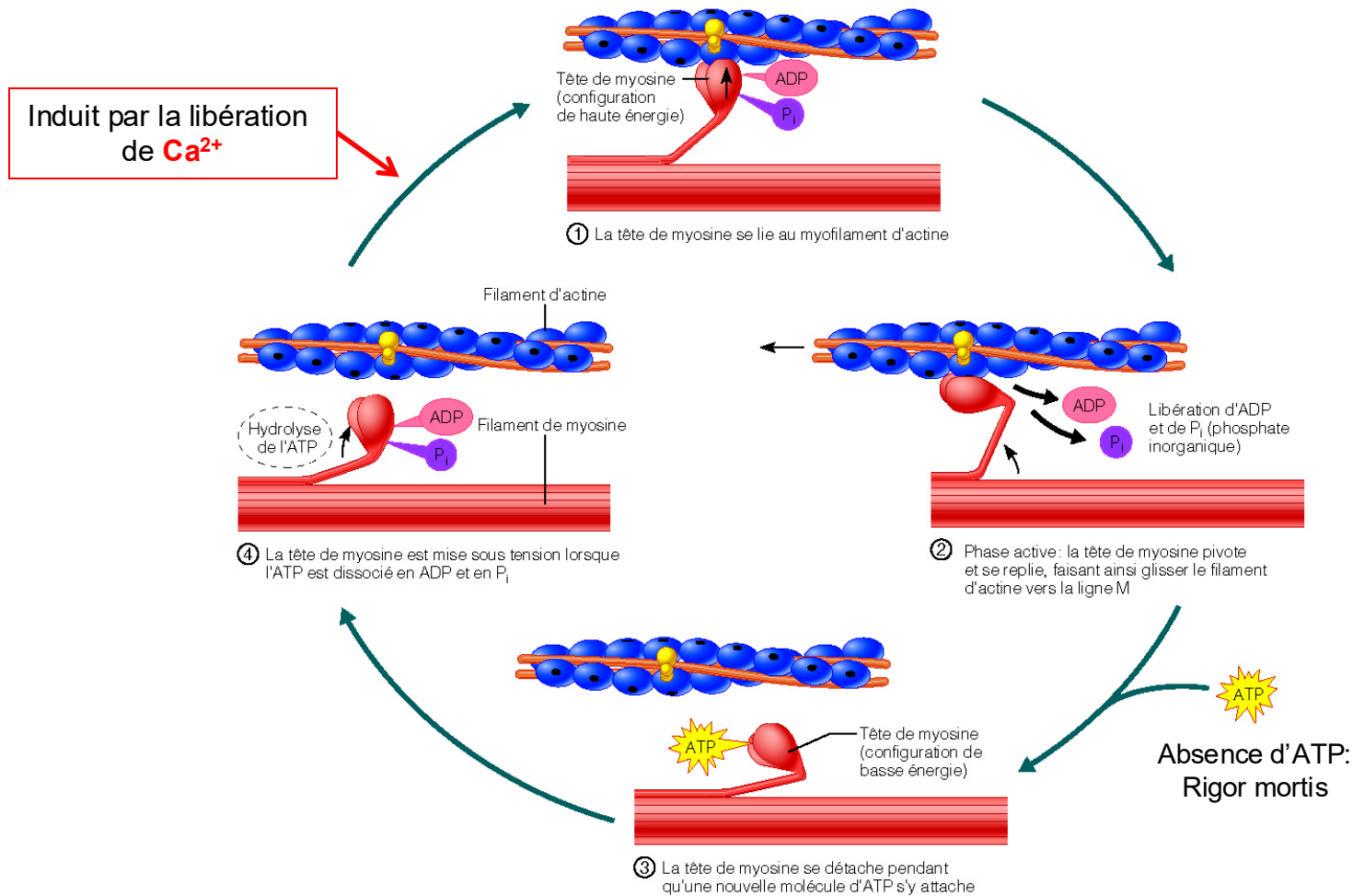
Quels sont les principaux constituants de la fibre musculaire?

- Sarcomère/ myofibrilles
- Protéines constituant les filaments fins
- Protéines constituant les filaments épais

?

Comment les muscles squelettiques se contractent?

Interaction Actine-Myosine: Contraction



Interaction Actine-Myosine: Contraction

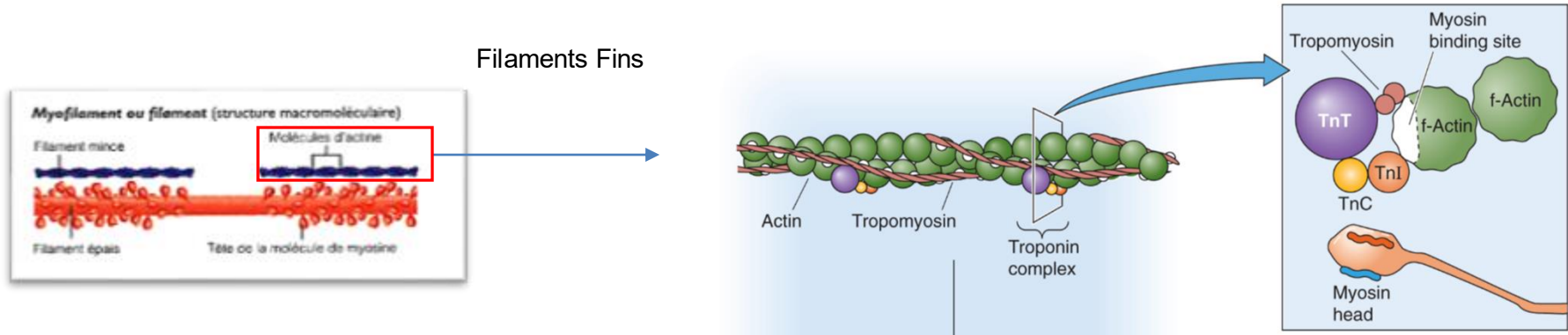
1. Augmentation de la concentration de calcium cytoplasmique

Interaction Actine-Myosine: Contraction

1. Augmentation de la concentration de calcium cytoplasmique

Rôle du calcium?

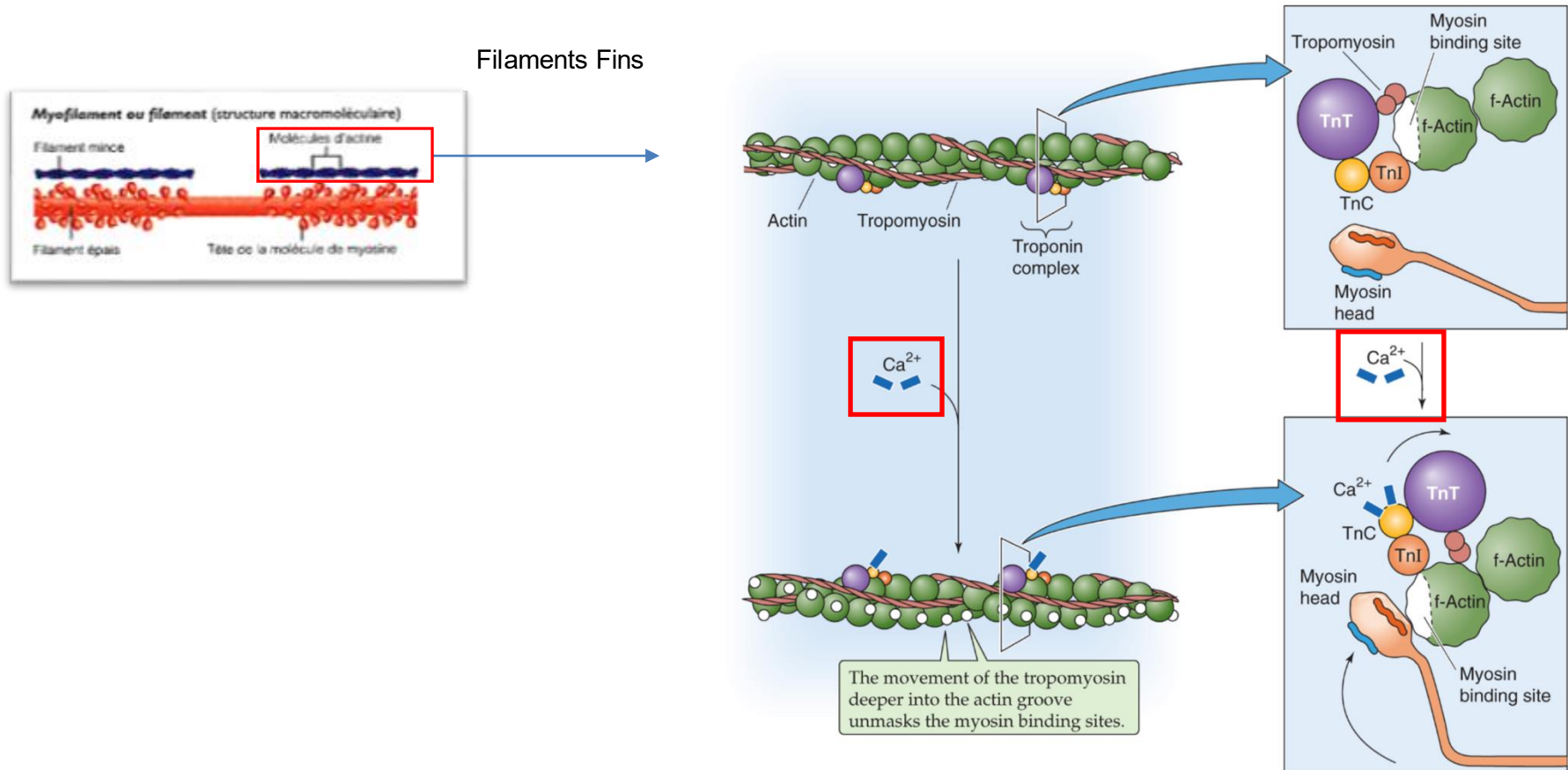
Interaction Actine-Myosine: Rôle du Calcium



Tropomyosine

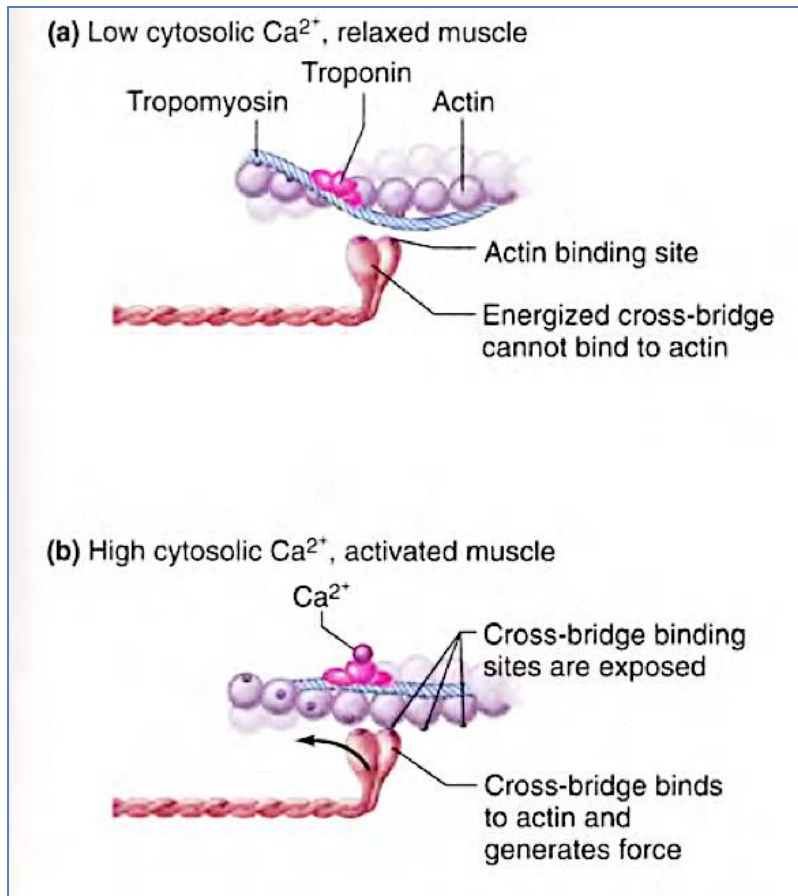
Complexe des Troponines:
- Troponin I
- Troponine T
- Troponine C

Interaction Actine-Myosine: Rôle du Calcium



La fixation du calcium sur la Troponine C permet le déplacement du complexe tropomyosine-troponine (I, C, T) ce qui permet l'interaction actine-myosines

Résumé Tropomyosine - Troponine



- **Tropomyosine:**

- Protéines fibreuses, double brins
- Entourent l'actine
- 1 Tropomyosine pour 7 actines
- Masquent les sites de fixation des myosines sur l'actine

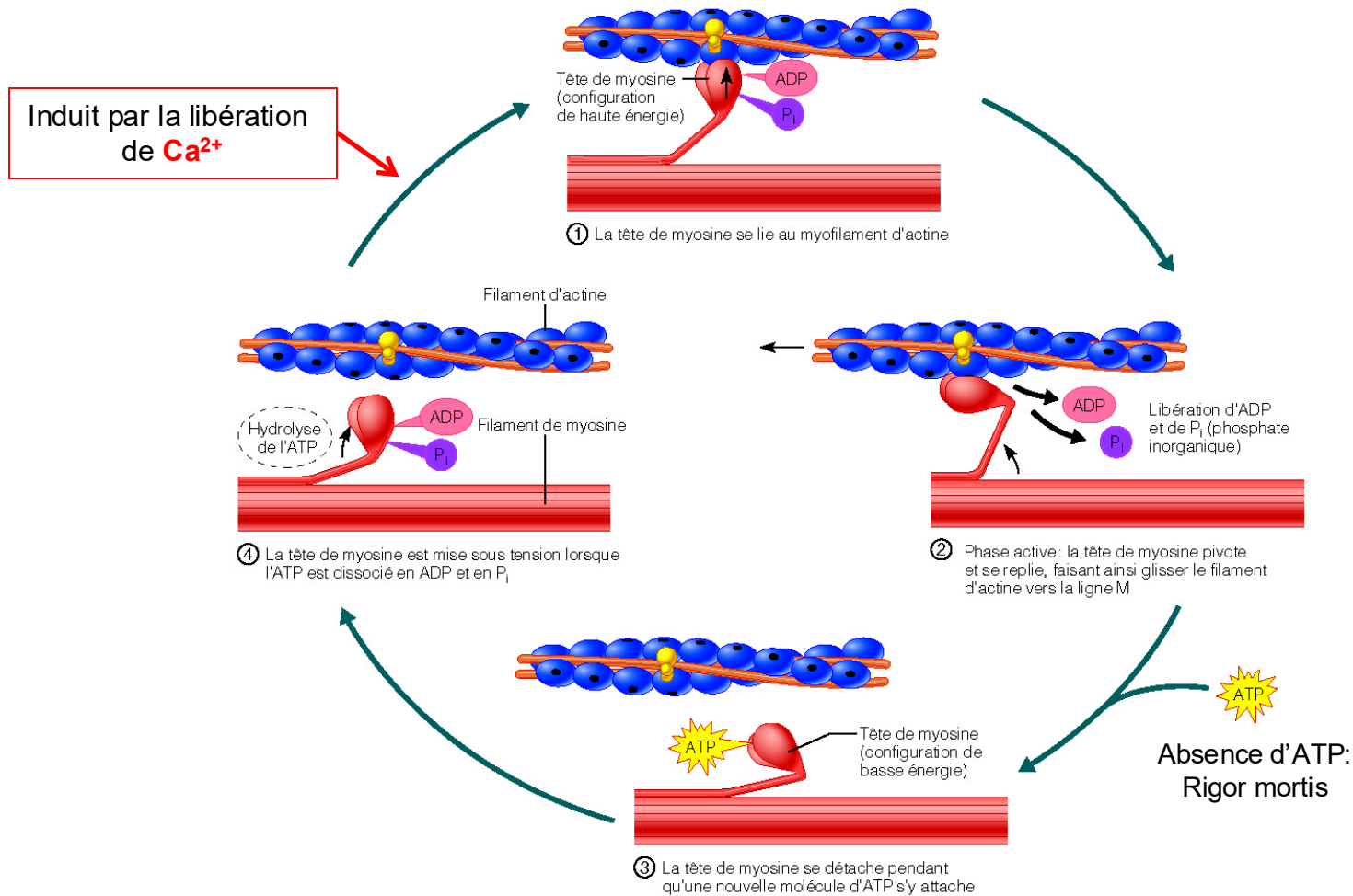
- **Troponine:**

- Troponin I: sous-unité inhibitrice qui se lie à l'actine
- Troponin T: se lie à la tropomyosine
- Troponin C: se lie aux ions calcium

Interaction Actine-Myosine: Contraction

1. Augmentation de la concentration de calcium cytoplasmique
2. Fixation du calcium sur les troponines C, induit un changement de conformation du complexe Troponines-Tropomyosines

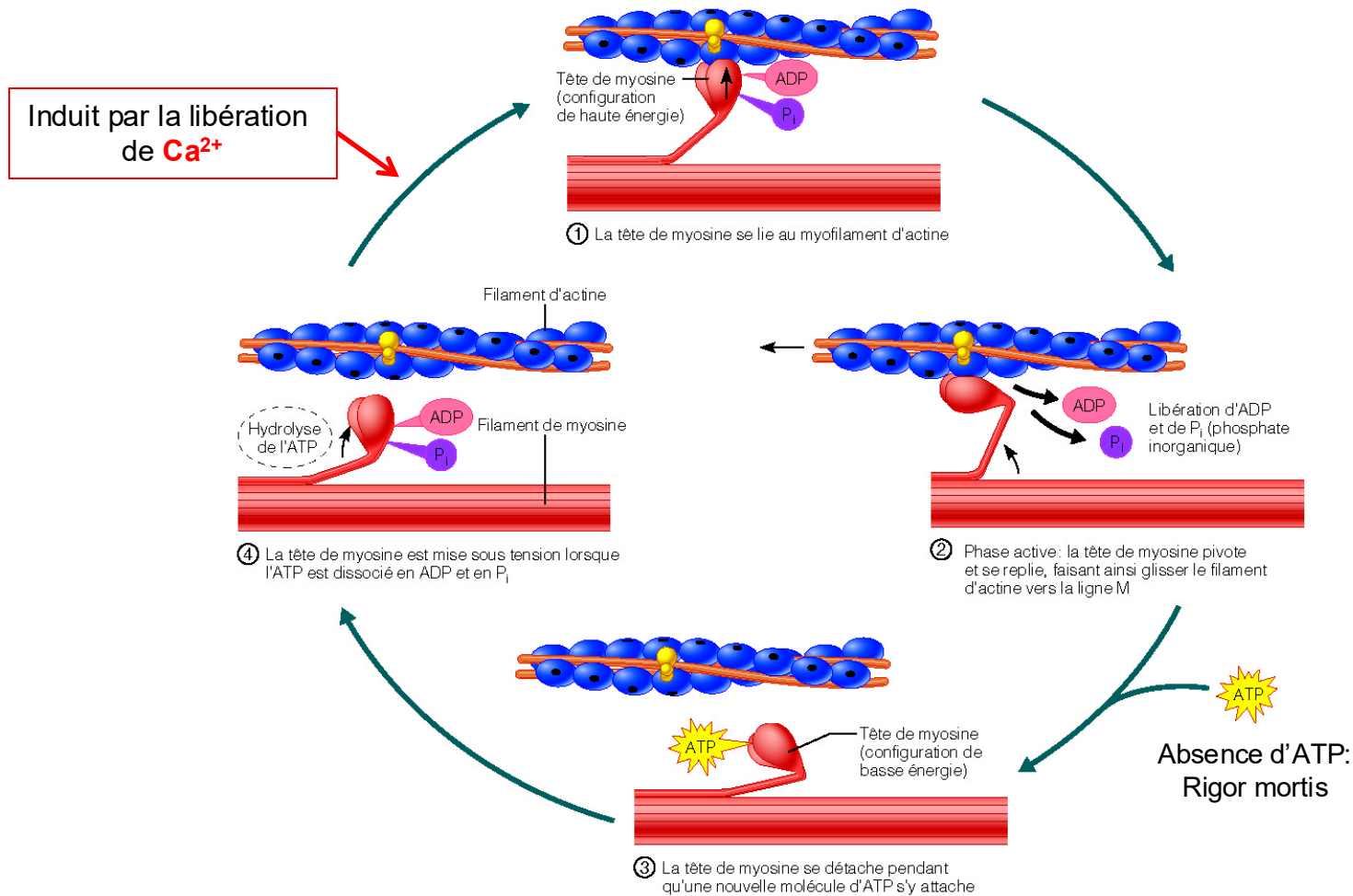
Interaction Actine-Myosine: Contraction



Interaction Actine-Myosine: Contraction

1. Augmentation de la concentration de calcium cytoplasmique
2. Fixation du calcium sur les troponines C, induit un changement de conformation du complexe Troponines-Tropomyosines
3. Interaction des têtes de myosines avec les filaments fin d'actine
4. Contraction:
 1. Pivotement des têtes de myosine chargées en énergie
 2. Libération ADP et Pi
 3. Fixation d'ATP
 4. Décrochement des têtes de myosines de l'actine
 5. L'hydrolyse de l'ATP en ADP et Pi fournit l'énergie pour remettre les têtes de myosine en position chargées en énergie

Interaction Actine-Myosine: Contraction

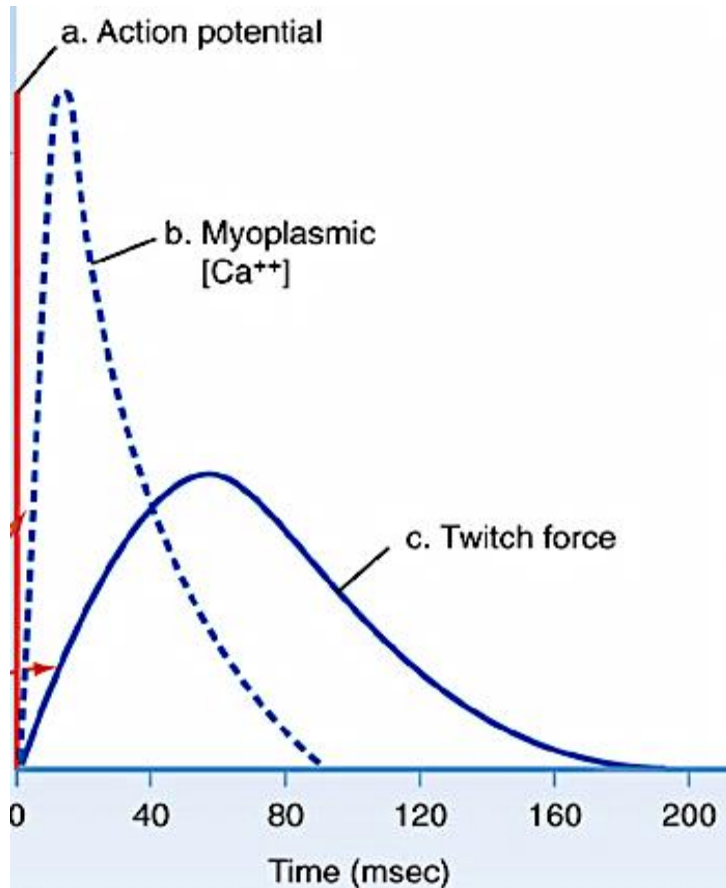


Interaction Actine-Myosine: Contraction

1. Augmentation de la concentration de calcium cytoplasmique
2. Fixation du calcium sur les troponines C, induit un changement de conformation du complexe Troponines-Tropomyosines
3. Interaction des têtes de myosines avec les filaments fin d'actine
4. Contraction
5. Diminution de la concentration de calcium cytoplasmique induit l'arrêt de la contraction

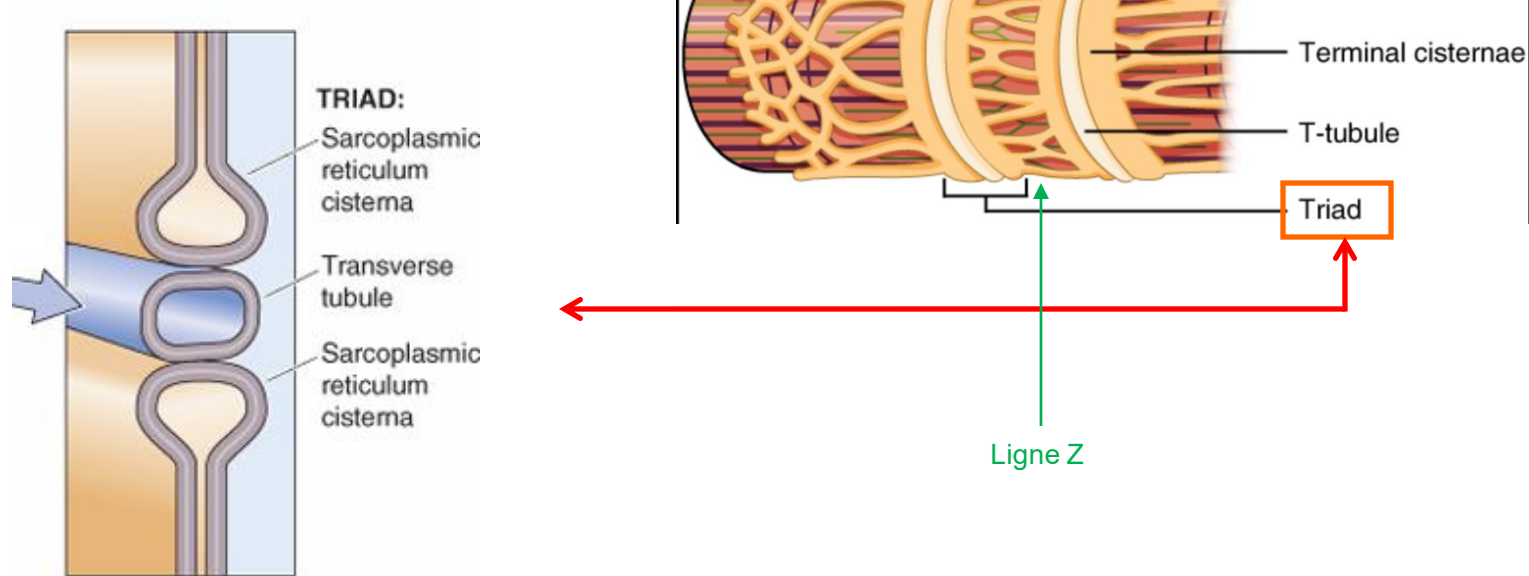
D'où vient le calcium?

Couplage Excitation-Contraction



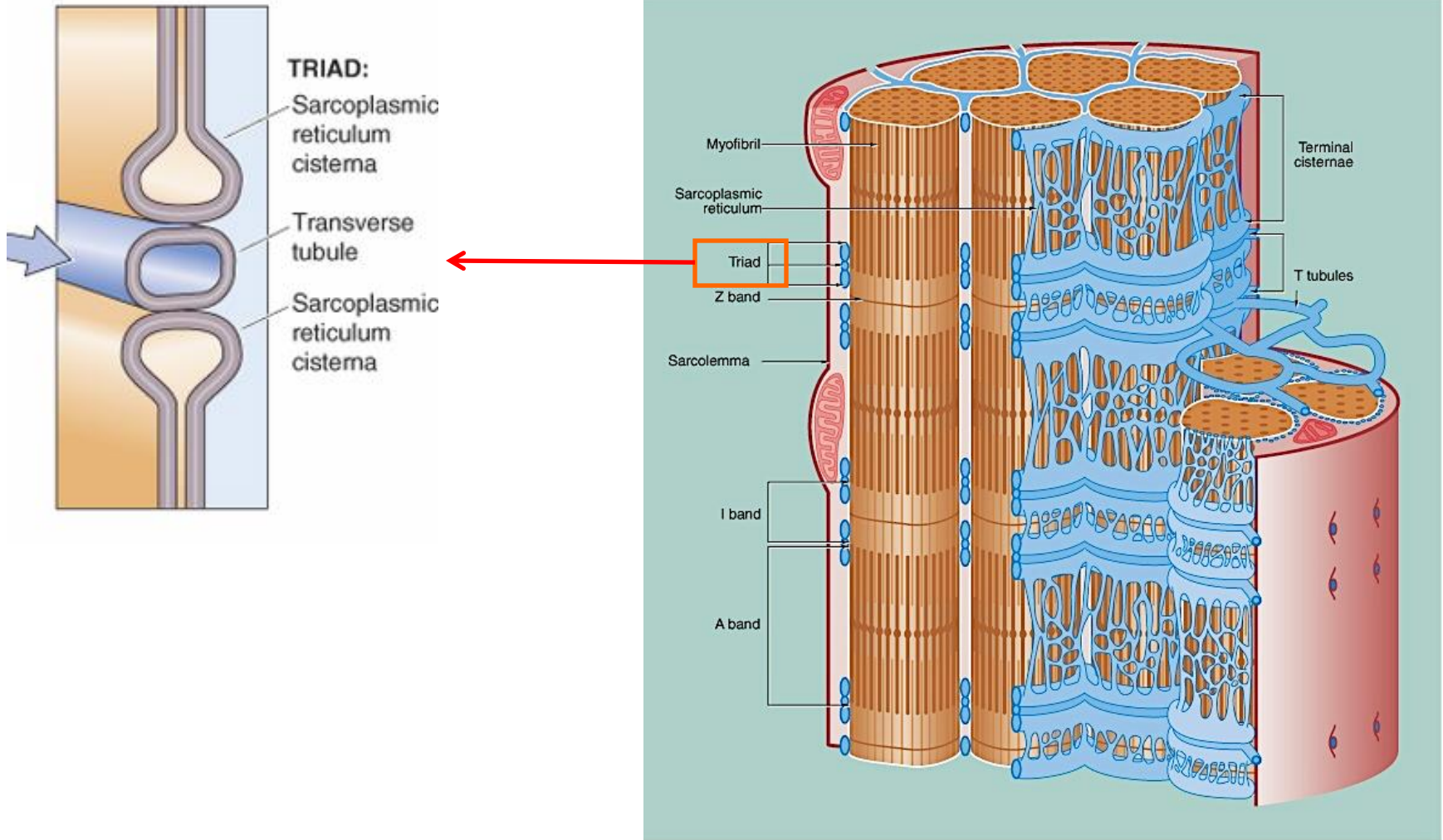
- Libération de calcium dans le cytoplasme fait suite à un potentiel d'action sur la fibre musculaire
- Cette libération de calcium est rapide et son repompage est plus lent.
- La libération de calcium dans le cytoplasme provoque une contraction musculaire.
- Le calcium est libéré du [réticulum sarcoplasmique](#).

Organisation du réticulum sarcoplasmique



Tubule transverse (tubule T): Invaginations de la membrane plasmique qui entourent les myofibrilles
Se situent à la jonction A-I

Organisation du réticulum sarcoplasmique

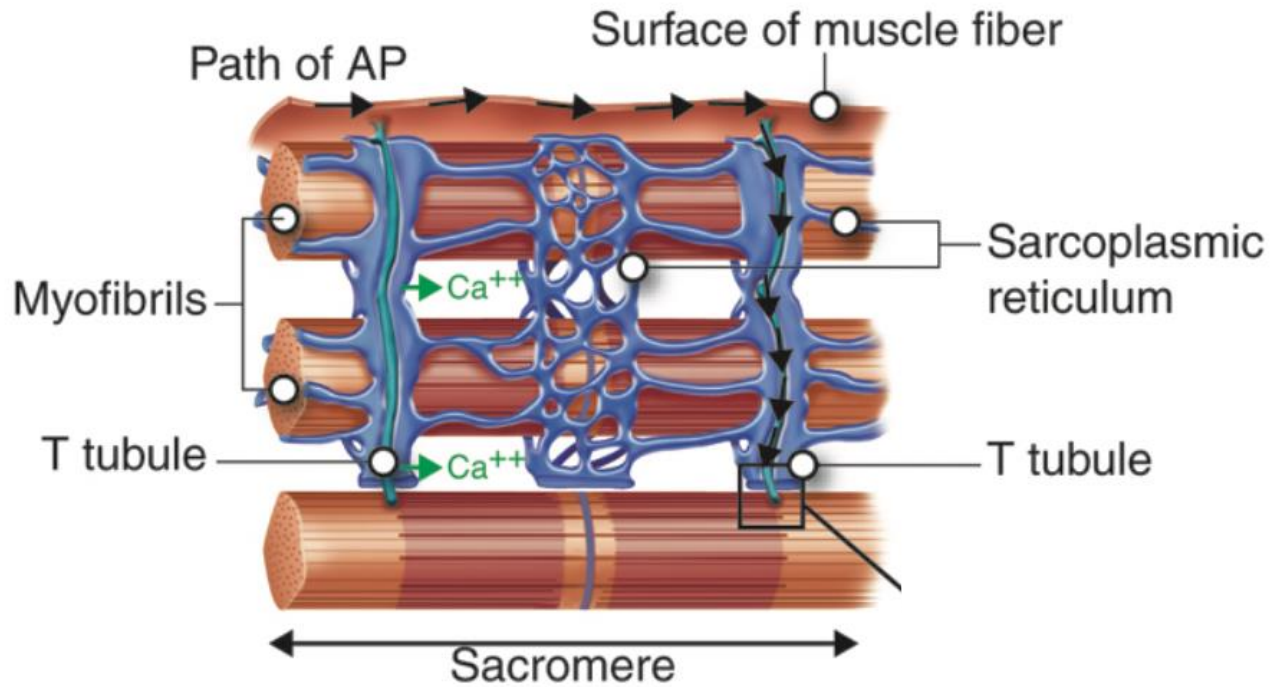


© Elsevier. Young et al. Wheater's Functional Histology 5e - www.studentconsult.com

Tubule transverse (tubule T): entre deux citernes du RS, repli de la membrane plasmique

Triade: à la jonction entre les stries A et I

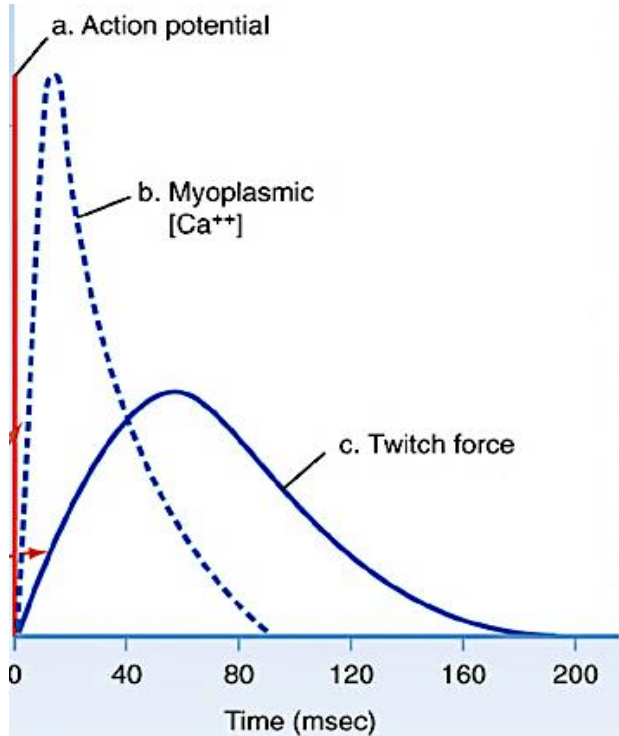
Organisation du réticulum sarcoplasmique



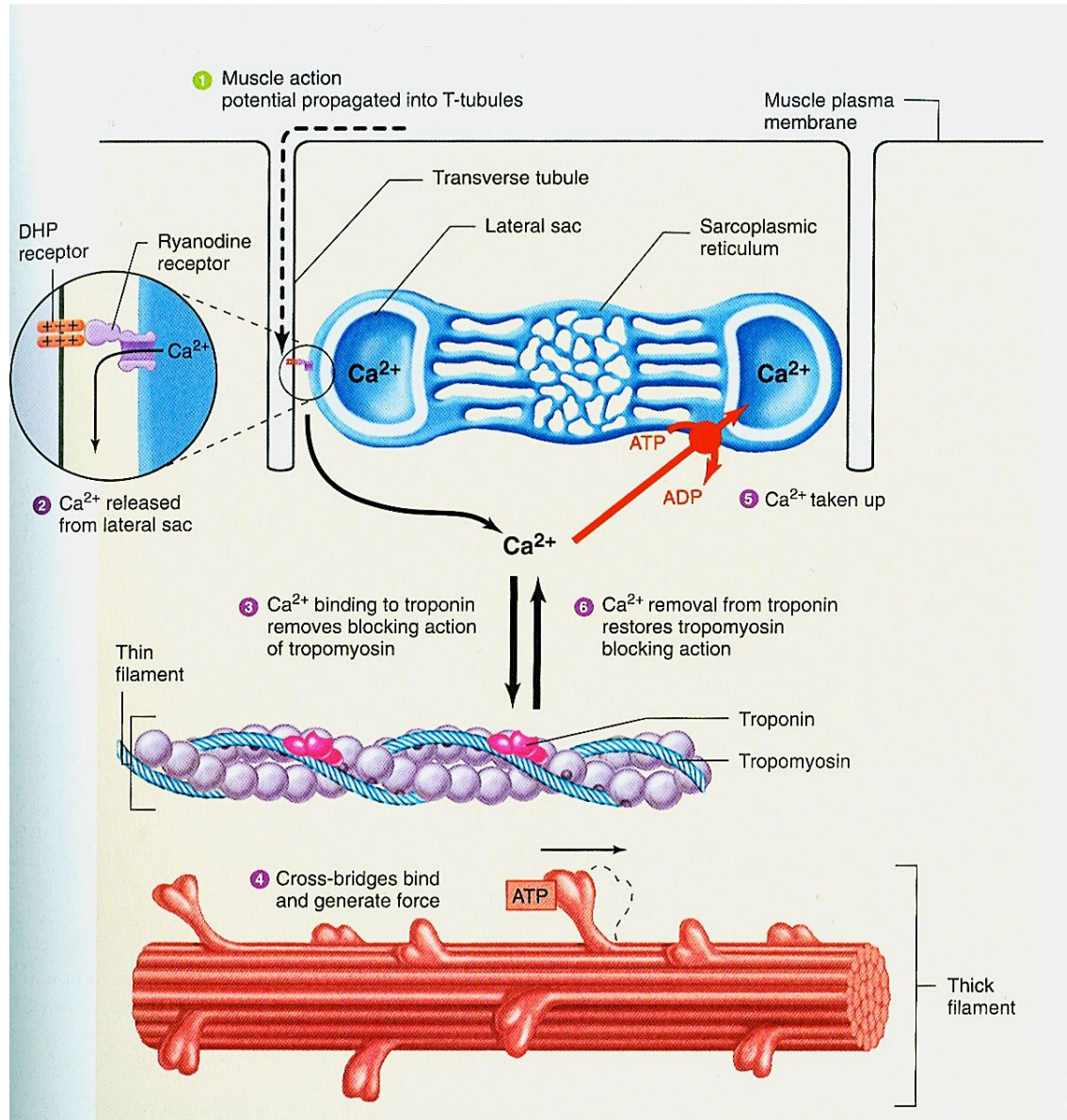
Tubule transverse (T tubule): Repli de la membrane plasmique entre deux citernes du RS

Triade: à la jonction entre les stries A et I

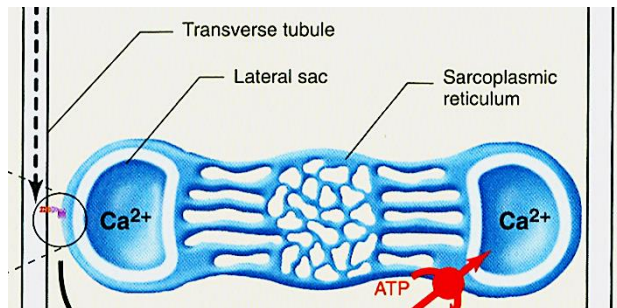
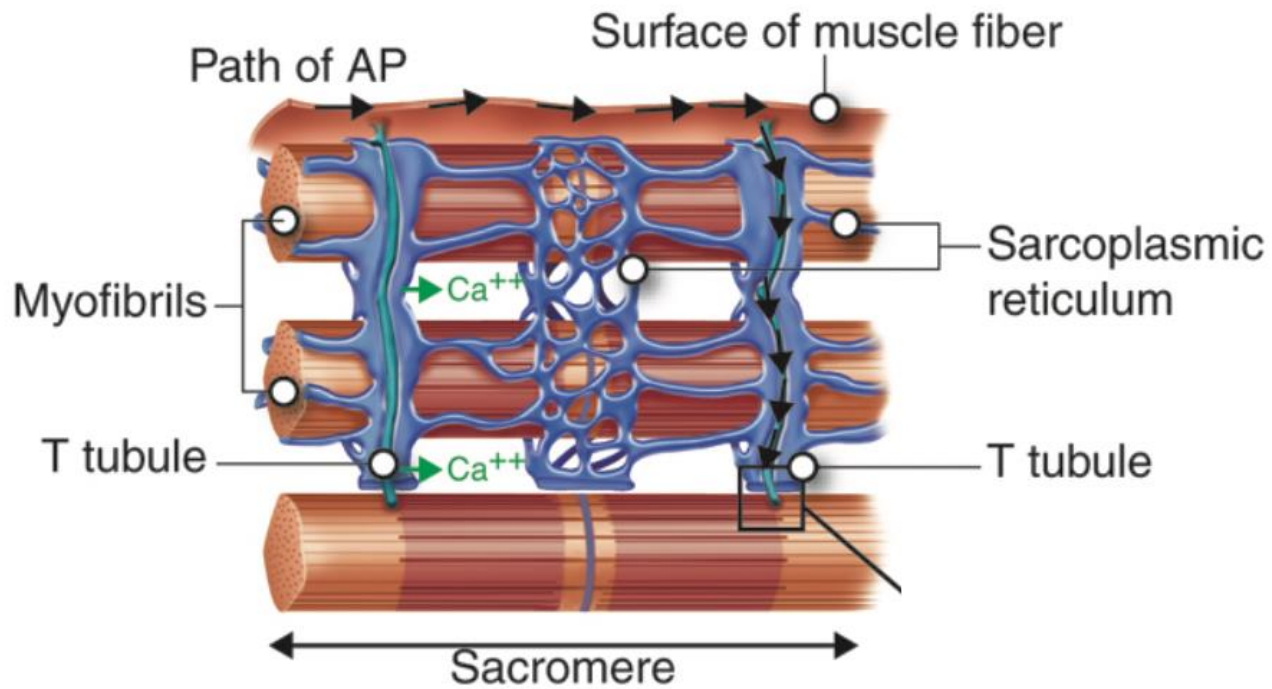
Couplage Excitation-Contraction



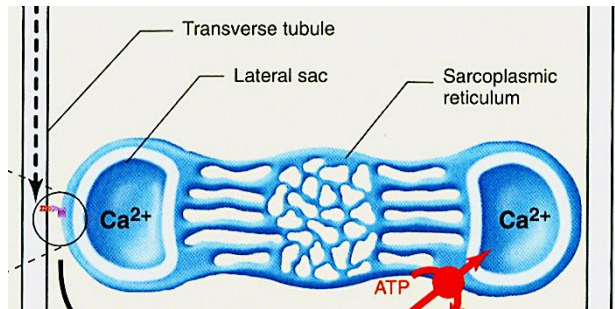
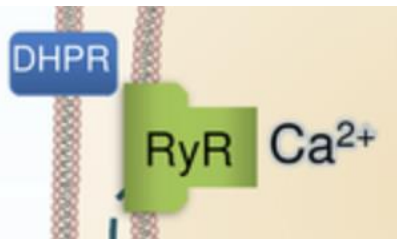
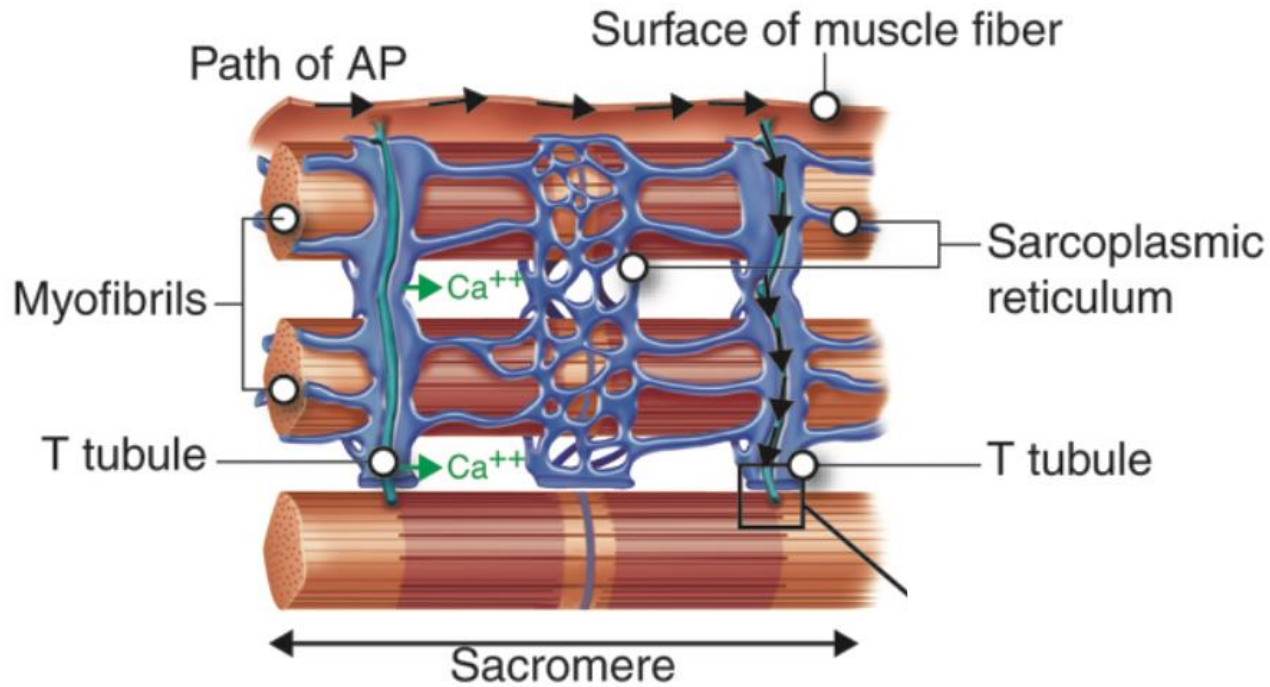
Koepfen and Stanton: Berne & Levy Physiology, 6th Edition.
 Copyright © 2010 by Mosby, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.



Organisation du réticulum sarcoplasmique



Organisation du réticulum sarcoplasmique

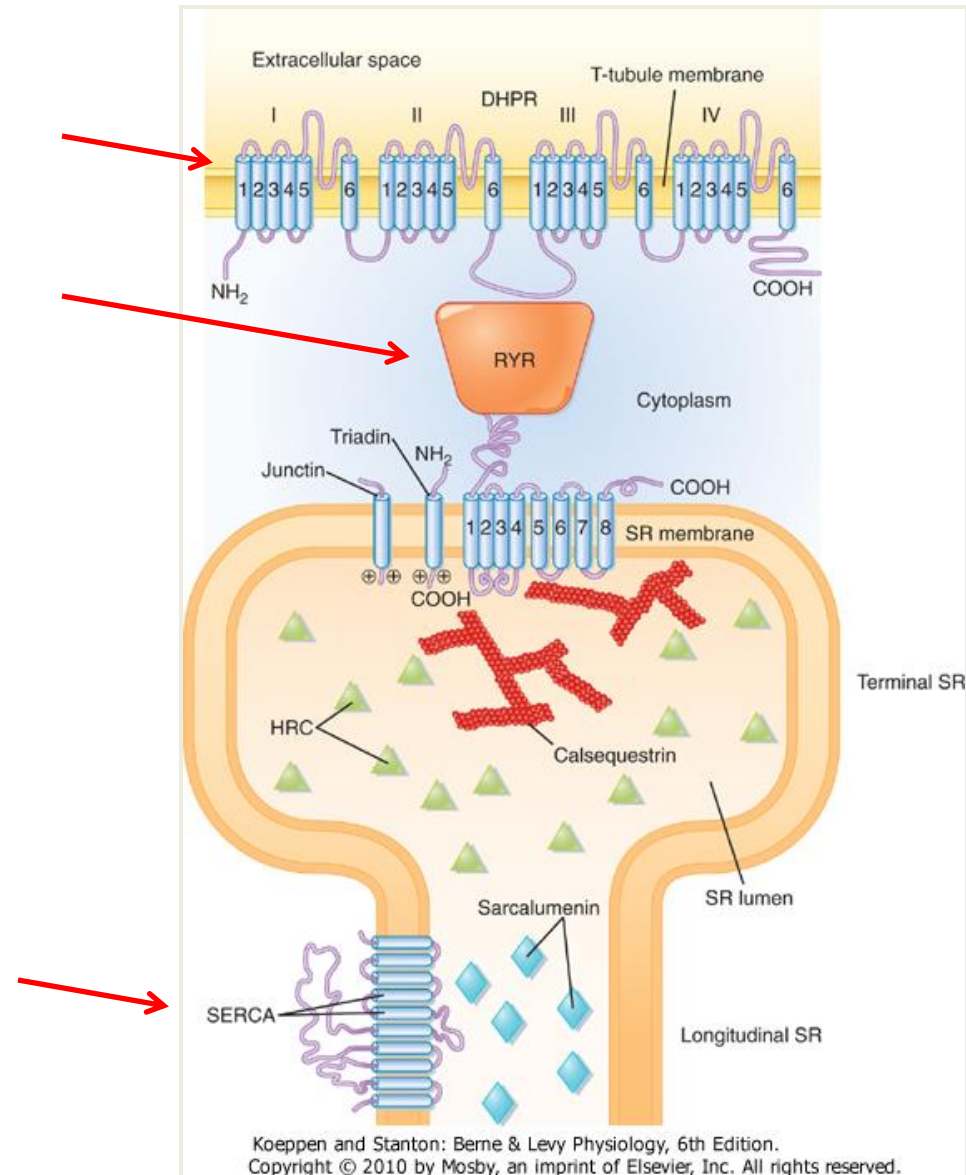


Couplage excitation-contraction

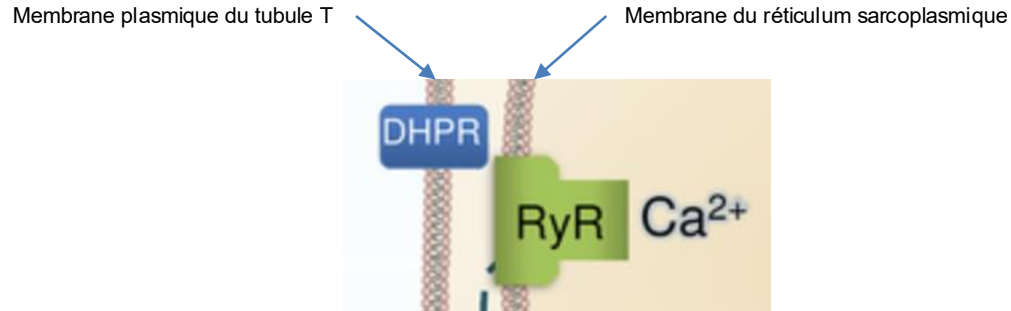
Sur les tubules T (membrane plasmique):
Canaux Ca^{2+} L-type appelés aussi récepteurs à la dihydropyridine DHPR (senseur du voltage)

Sur la membrane du RS:
Récepteurs à la ryanodine (RyR) qui est un canal Ca^{2+}
(Ca^{2+} -release channel)

La protéine SERCA est une pompe (ATPase) qui permet de re-pomper le calcium cytoplasmique dans le reticulum sarcoplasmique.



Organisation du réticulum sarcoplasmique



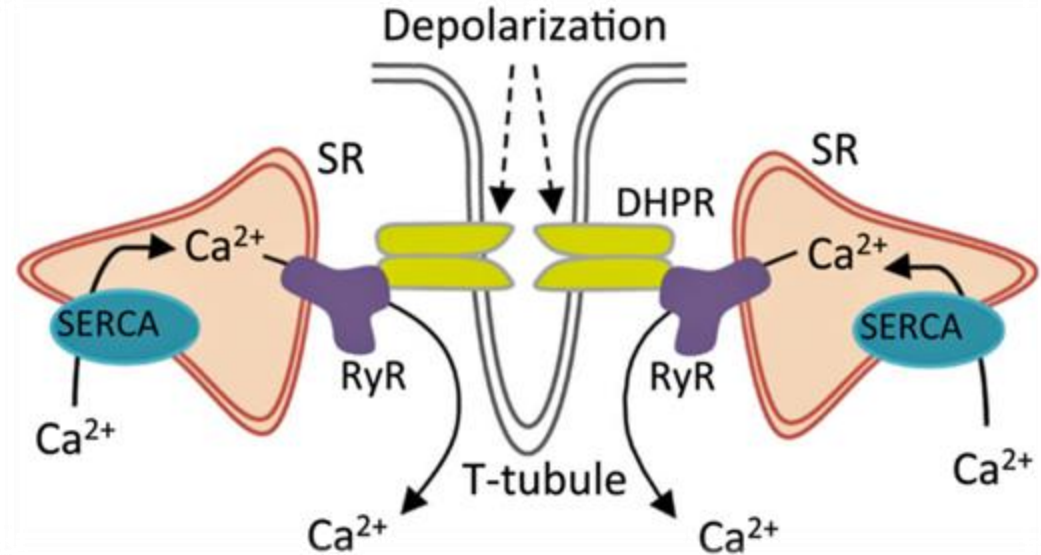
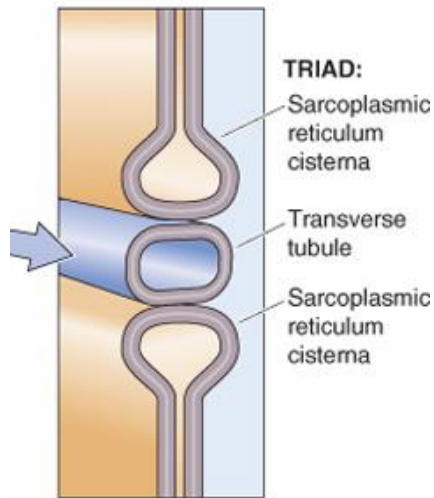
DHPR

- “Dihydropyridine Receptor”
- Canal calcique voltage dépendant de type L
- Présent sur la membrane plasmique
- Change de conformation lors d’un potentiel d’action (dépolariation)
- Interagit avrc RyR

RyR

- “Ryanodine Receptor”
- Canal calcique
- Présent à la membrane du reticulum sarcoplasmique
- S’ouvre quand DHPR change de conformation
- Interagit avrc DHPR

Couplage excitation-contraction



Dépolarisation induit un changement de conformation des canaux Ca²⁺ voltage-dépendants « L-type » ou DHPR

Changement de conformation des canaux DHPR est « transmis » aux canaux RyR du RS

Le Ca²⁺ sort du RS par les canaux RyR et va déclencher la contraction

Le Ca²⁺ est re-pompé dans le RS par les pompes SERCA

Conclusions

1. Dépolarisation cellule musculaire (= Potentiel d'Action: PA)
2. Au niveau des Tubules T, suite au PA, l'interaction DHPR-RyR active le RyR
3. Libération du calcium du réticulum sarcoplasmique par le RyR
4. Fixation calcium à la Troponine C
5. Interaction Actine-Myosine
6. Contraction
7. ATP:
 1. Chaîne lourde des myosines (=décrochage des têtes de myosines de l'actine)
 2. SERCA (=repompage calcium dans les réticulum sarcoplasmique)
 3. PMCA (=expulse calcium dans milieu extracellulaire)
8. Fin de la contraction

Contrôle des connaissances

Contrôle de la contraction musculaire

Couplage excitation - contraction

Protéines impliquées dans le couplage excitation - contraction

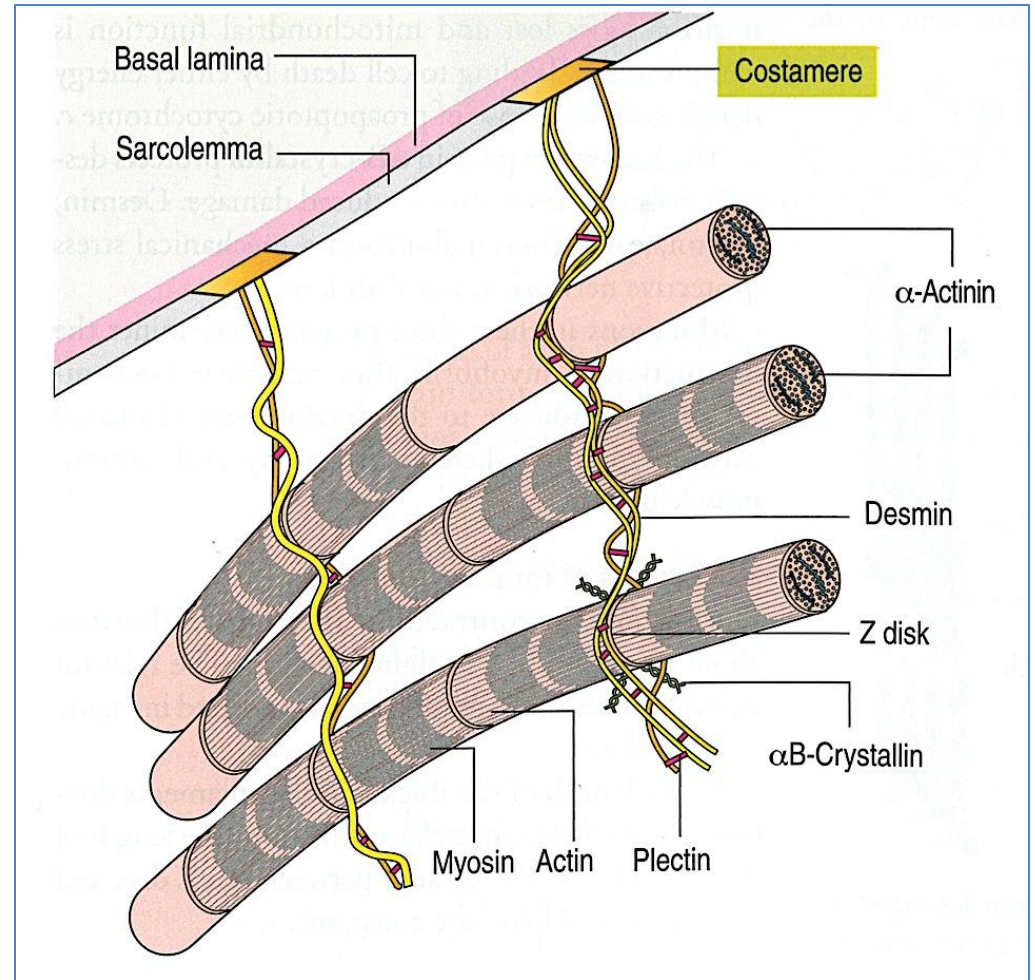
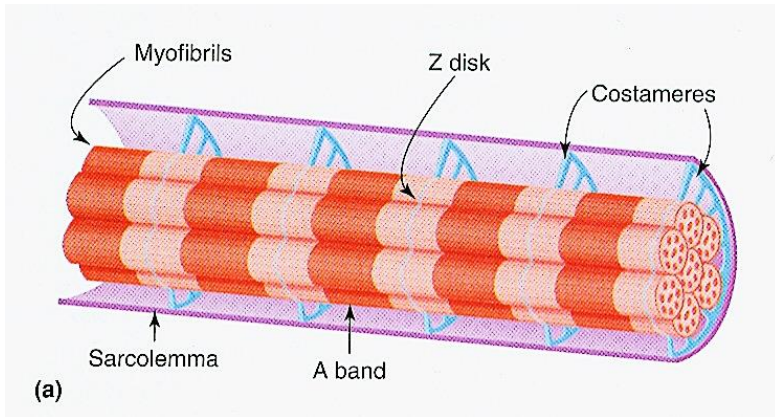
Rôle / origine calcium dans la contraction musculaire

Senseur calcique

?

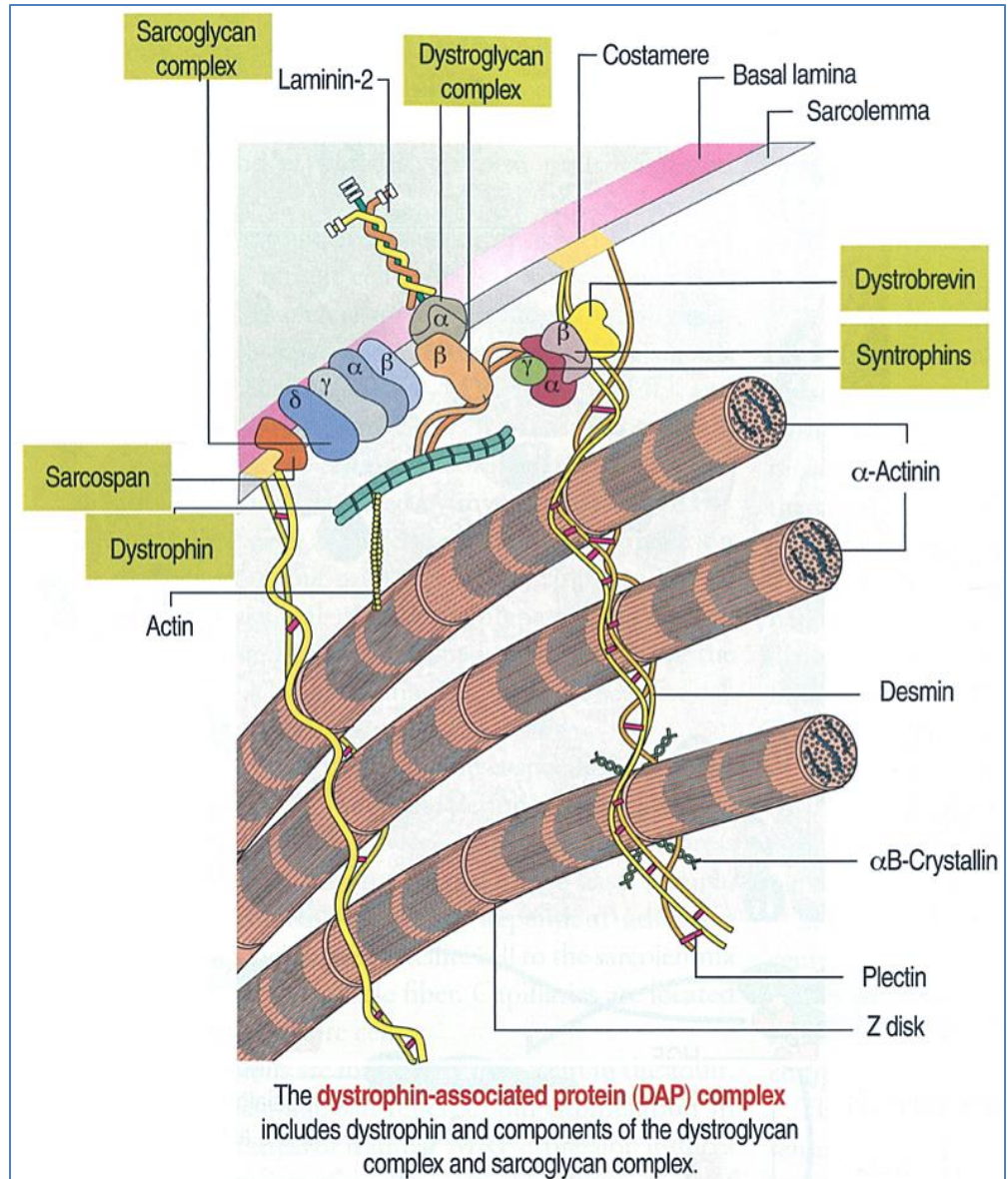
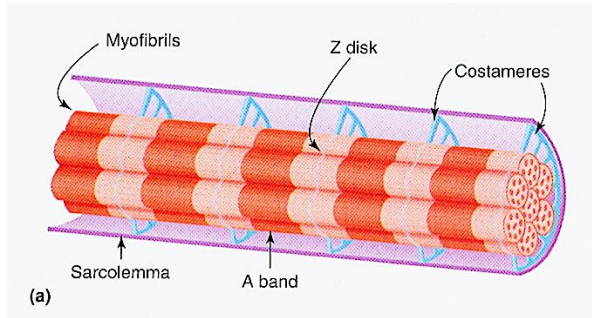
Stabilisation des myofibrilles

Pour en savoir plus!



Costamère: complexe dystrophine-glycoprotéine

Pour en savoir plus!



Myopathies

Pour en savoir plus!



From: Human Physiology – Vander's 12E

Mutation de Laminin-2: Myopathie Congénitales

Mutation des sarcoglycans: Myopathie des Ceintures

Mutation de Dystrophine: Myopathie de **Duchenne**

Mais aussi mutations de Desmin, $\alpha\beta$ -Crystallin, ...

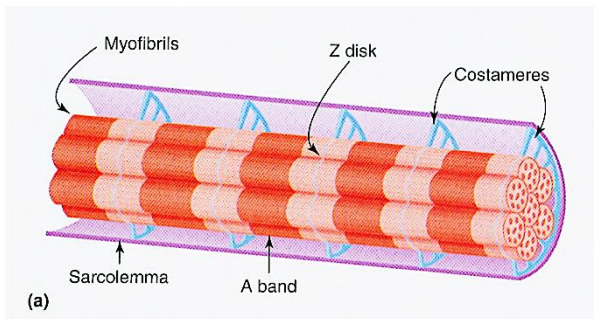
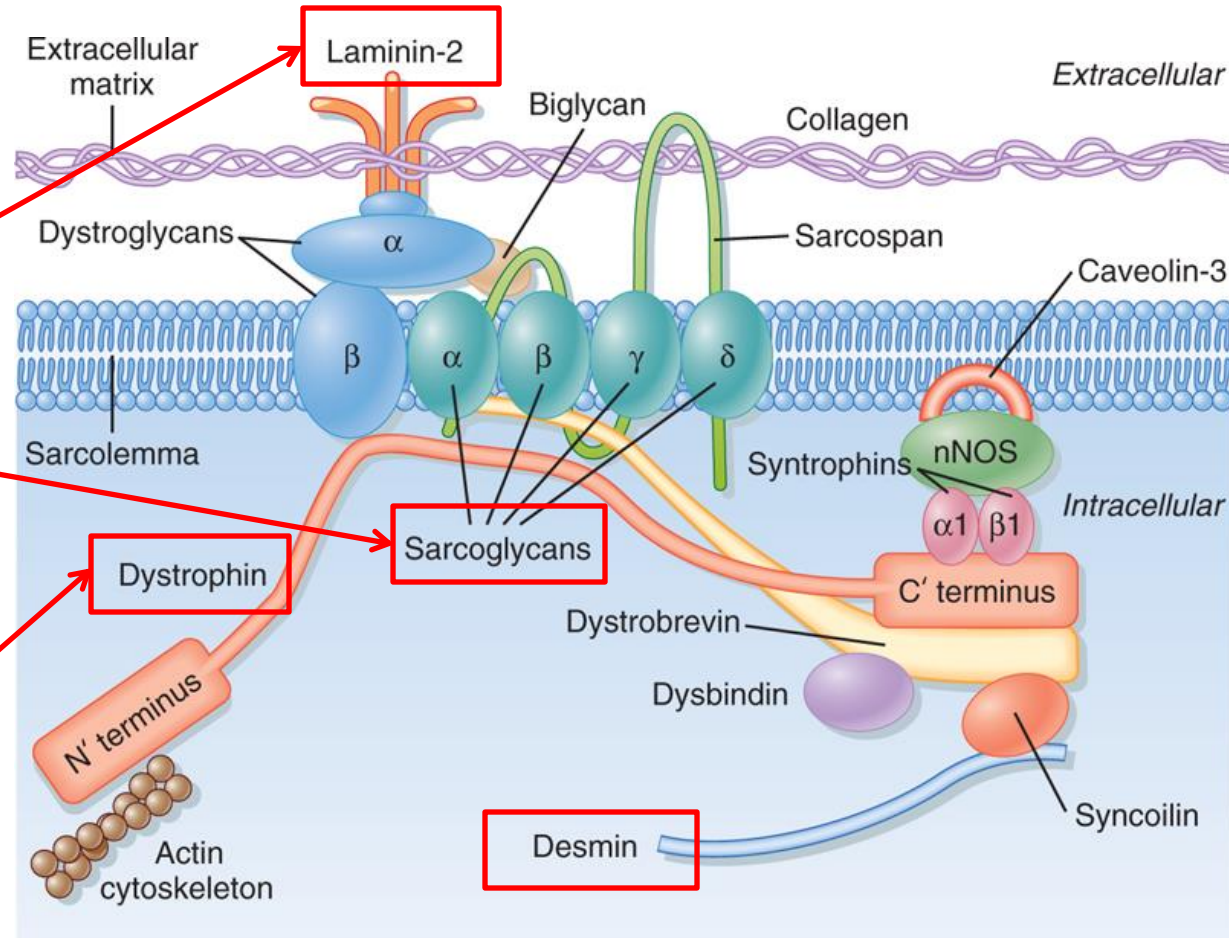
Organisation du complexe dystrophine-glycoprotéine du muscle squelettique

Pour en savoir plus!

Myopathie Congénitales

Myopathie des Ceintures

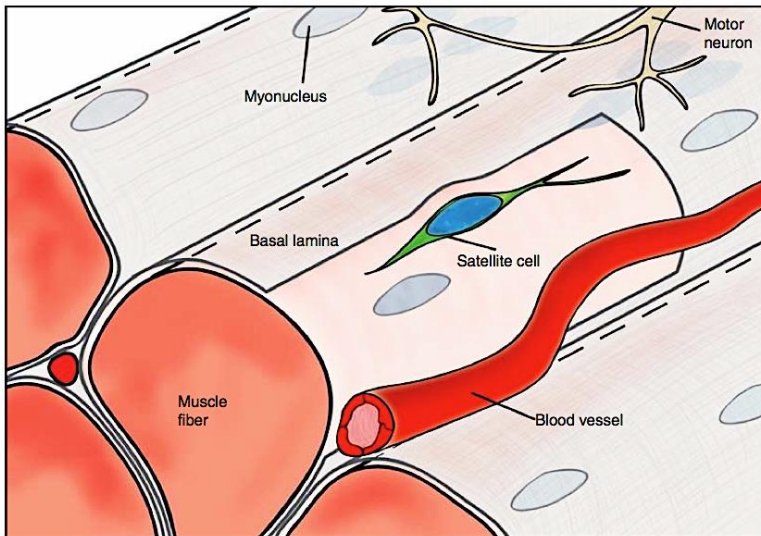
Myopathie de **Duchenne-Becker**



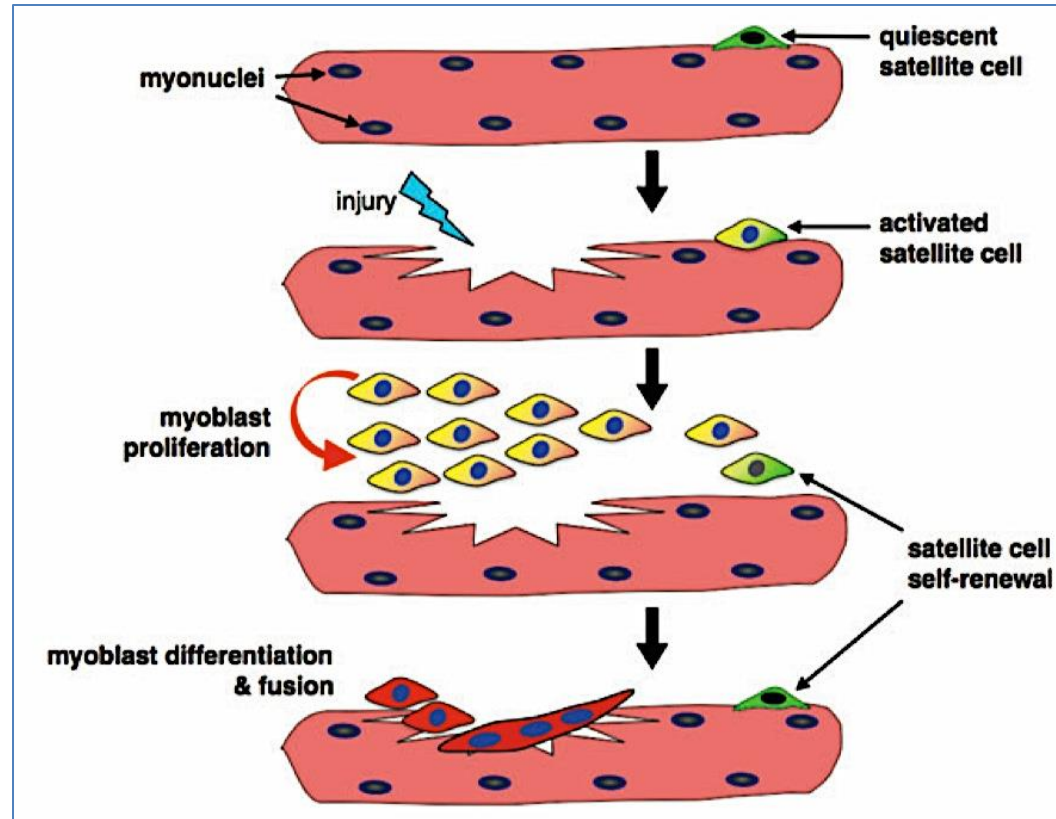
Régénération Musculaire

Pour en savoir plus!

Rôle essentiel des cellules souches musculaires.

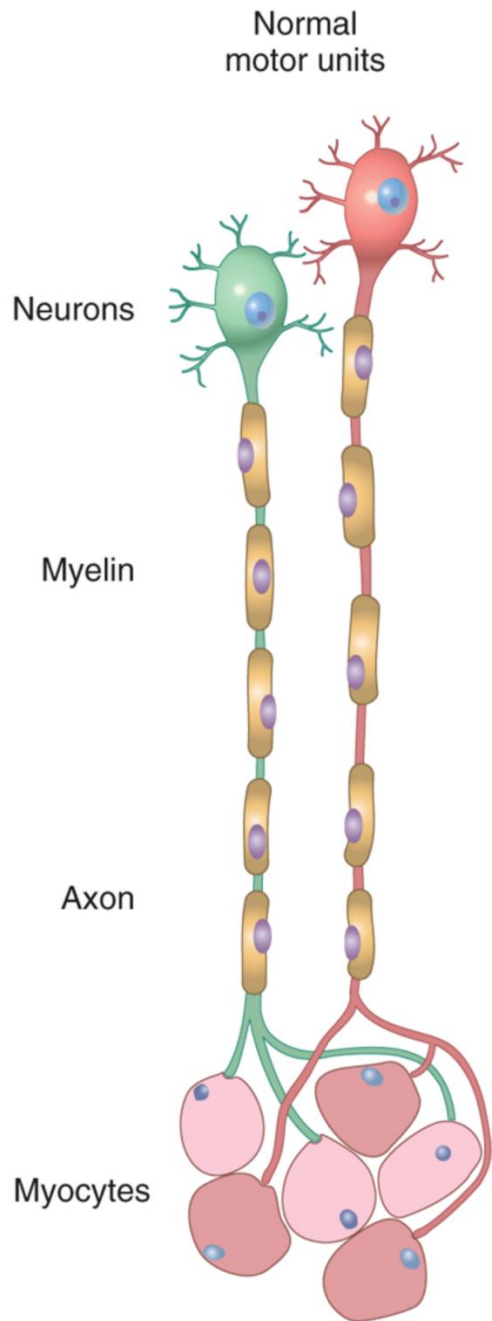


La lame basale est une partie de l'endomysium.



Unité motrice

Unité motrice



L'unité motrice:

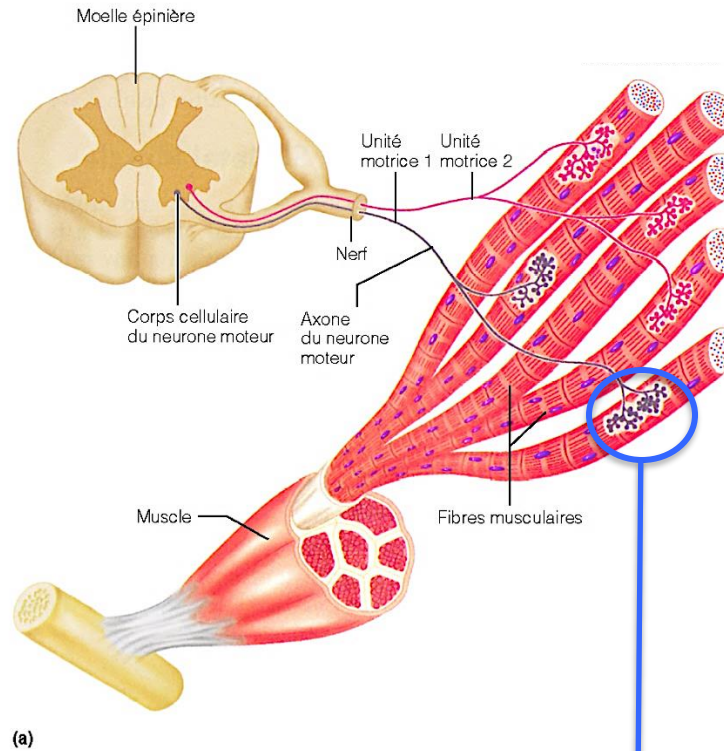
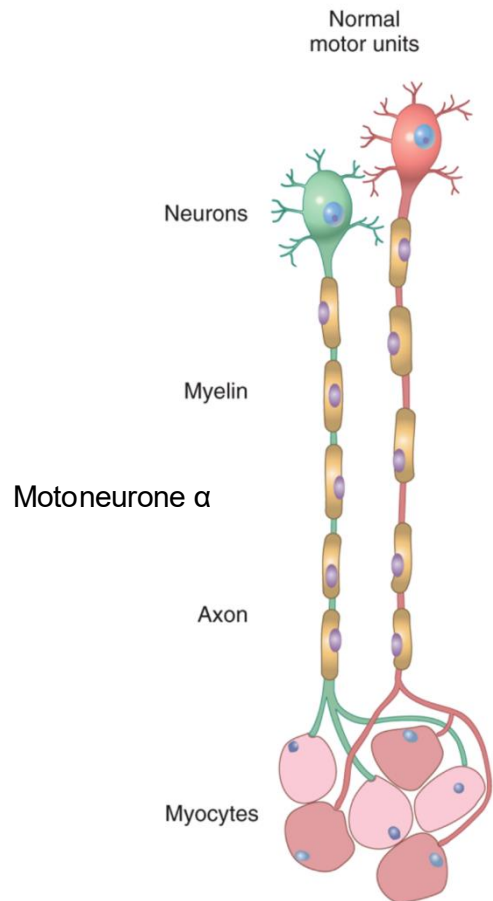
un motoneurone

l'ensemble de fibres musculaires innervées par ce motoneurone

- Toutes les fibres des muscles squelettiques sont innervées par 1 seul motoneurone
- Tous les motoneurones innervent un grand nombre de fibres musculaires

Unité motrice

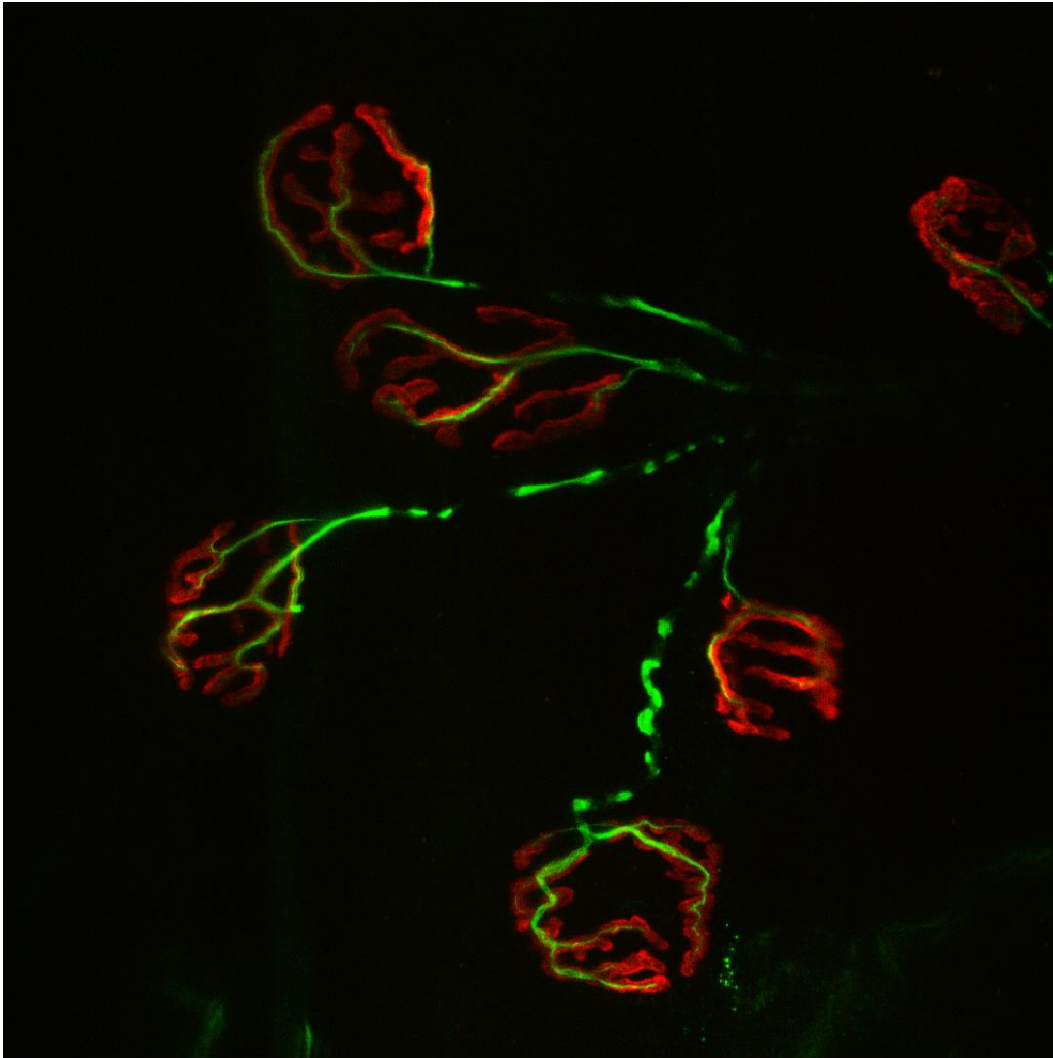
Chaque fibre musculaire est innervée par un seul motoneurone α



From: Anatomie et physiologie humaine, Elaine N. Marieb

1 Jonction Neuro-Musculaire!

La jonction neuromusculaire

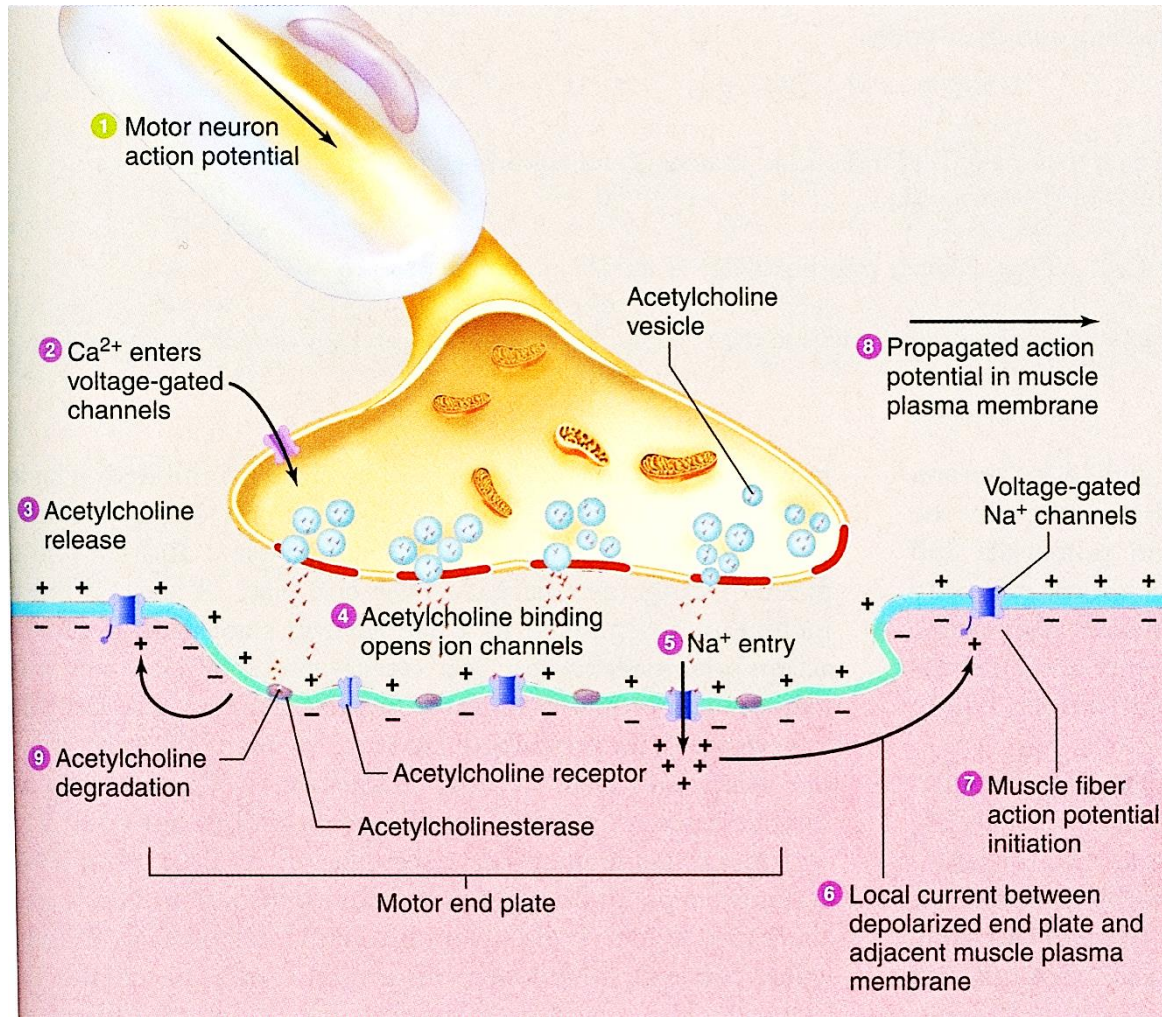


neurofilament
(exprimé par les neurones)

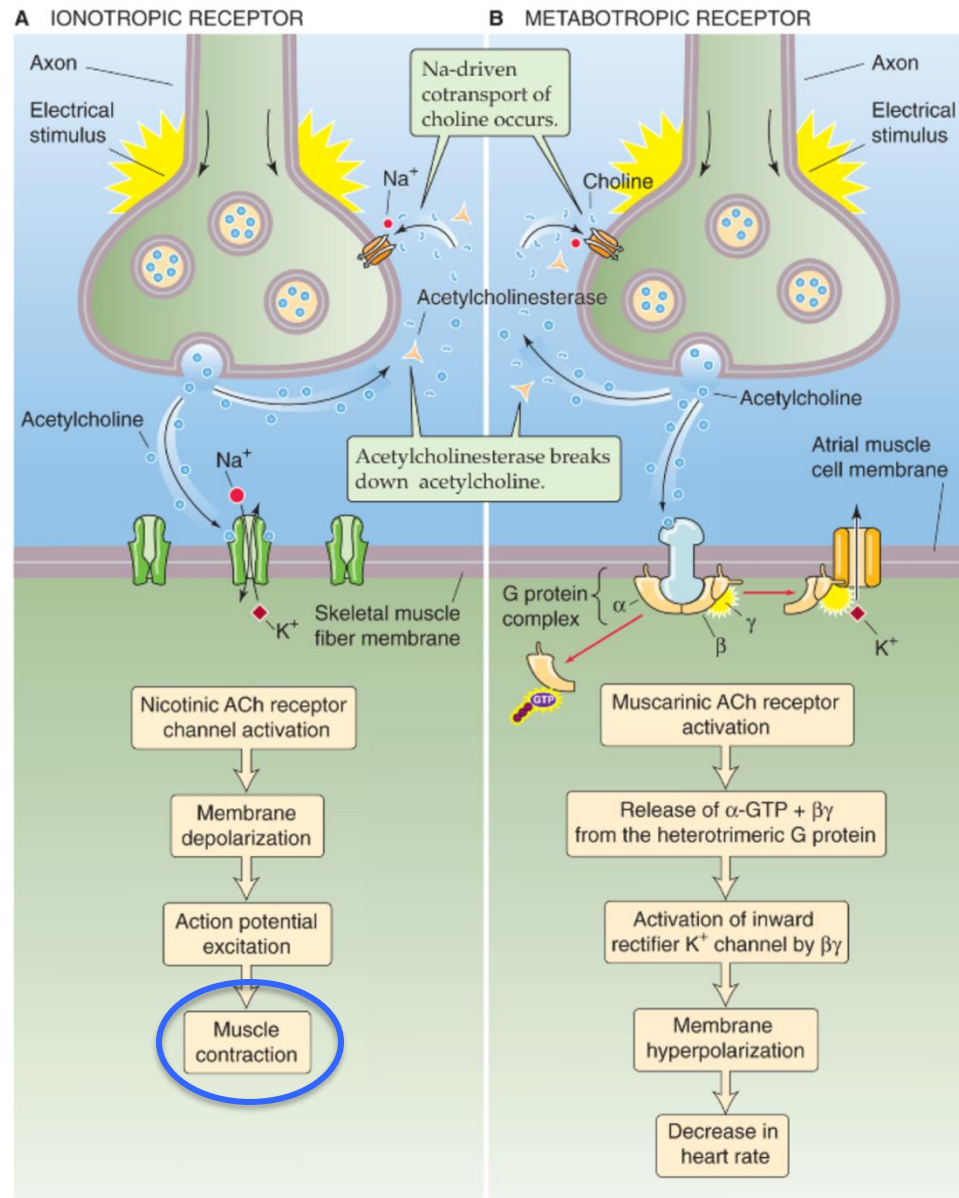
synaptophysin (jonction
neuromusculaire)

Photo: Pre Perrine Castets - Unige

Jonction Neuro-Musculaire



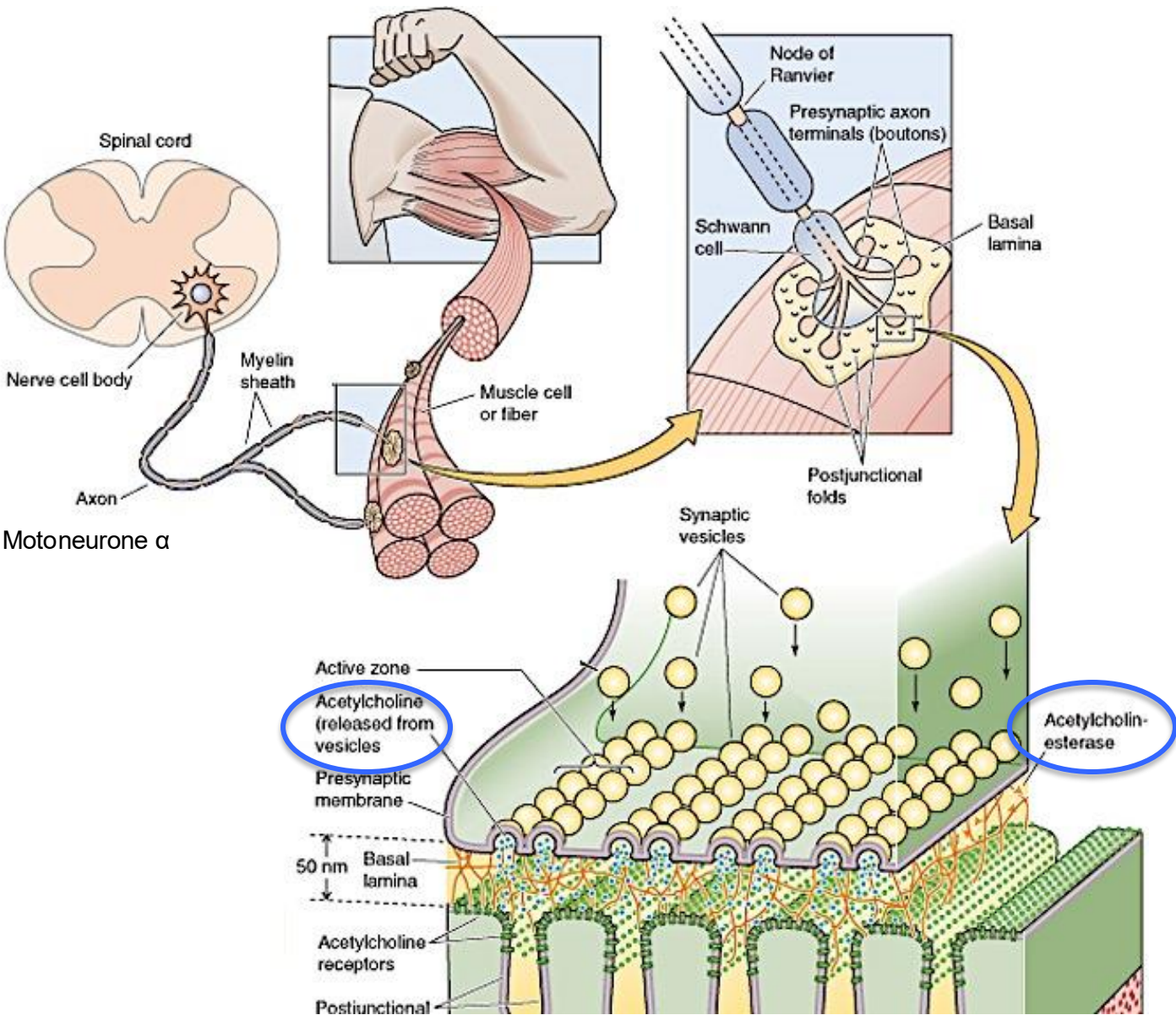
Récepteurs ionotropes / metabotropiques



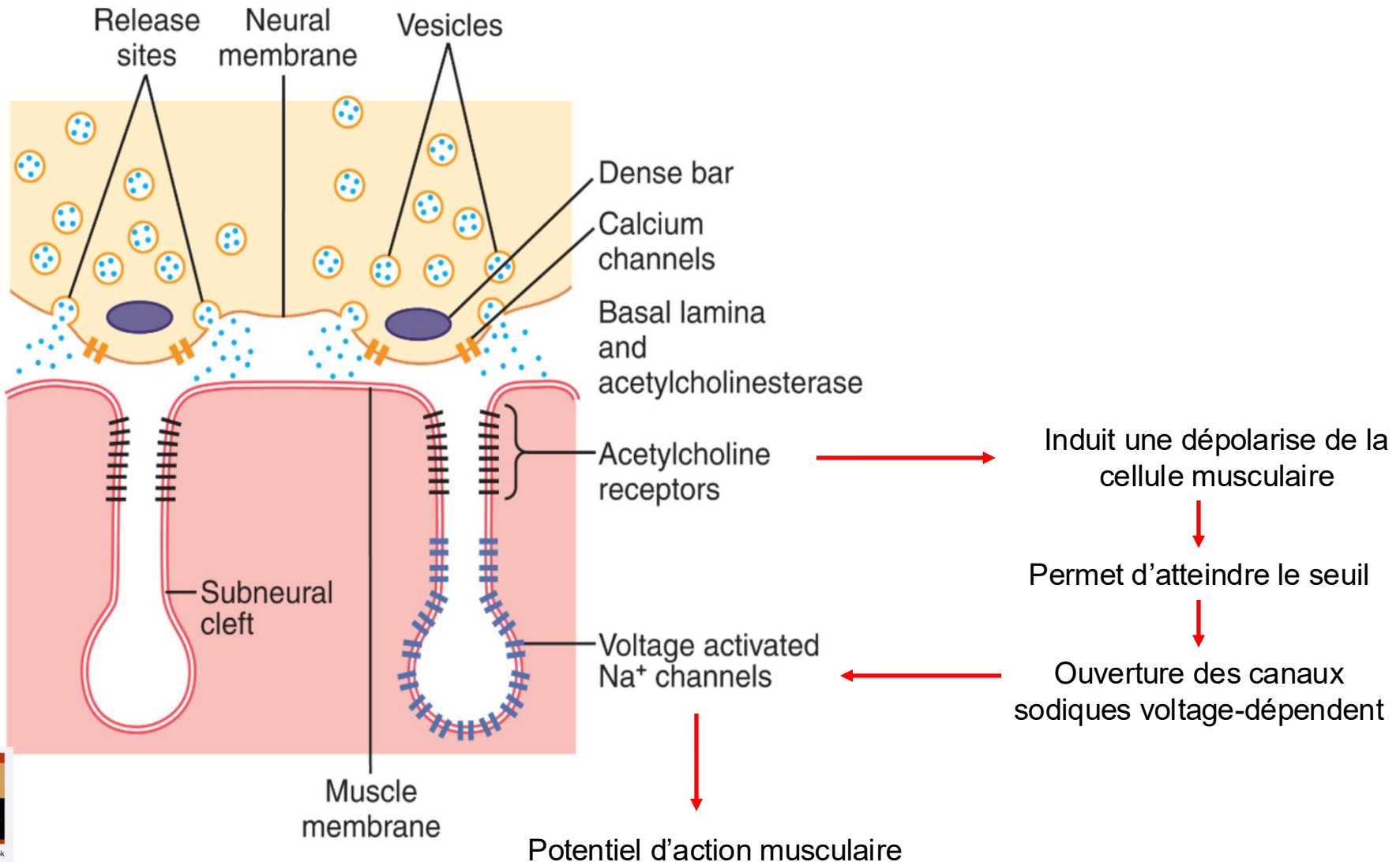
Muscles squelettiques

Muscle cardiaque

Jonction Neuro-Musculaire

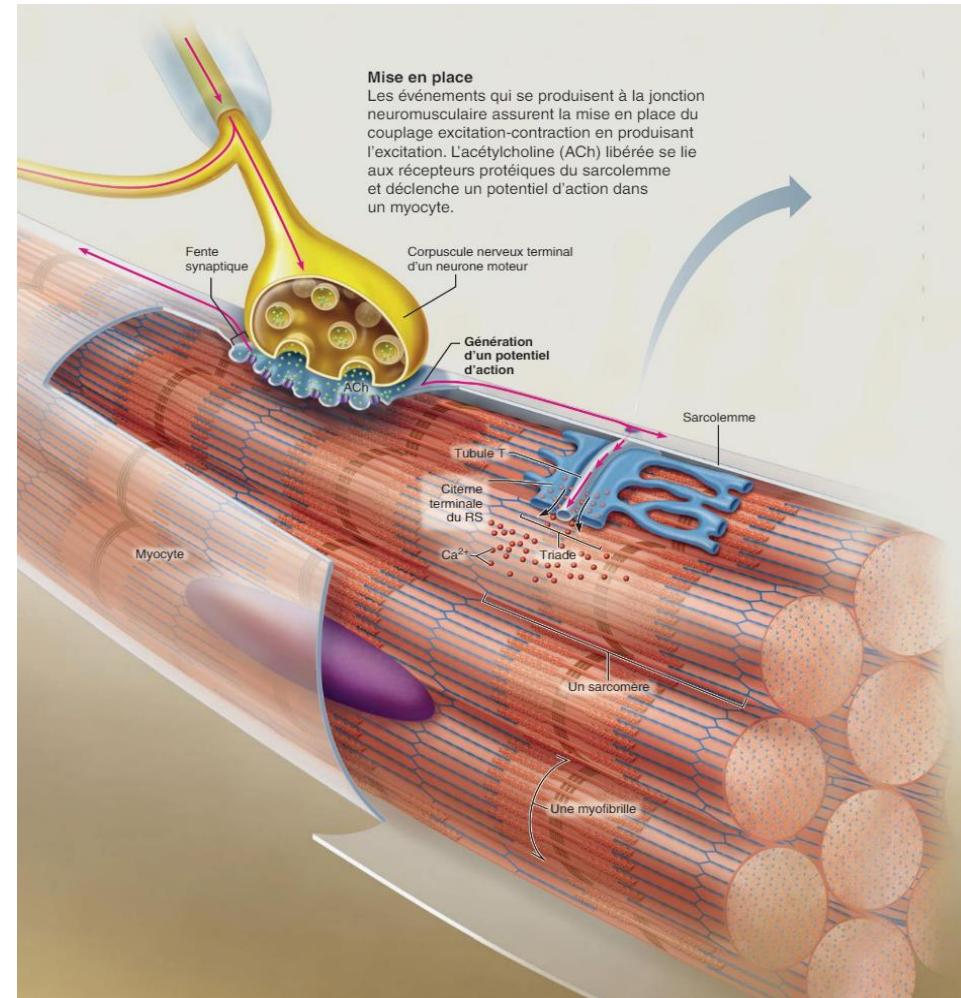


Jonction Neuro-Musculaire

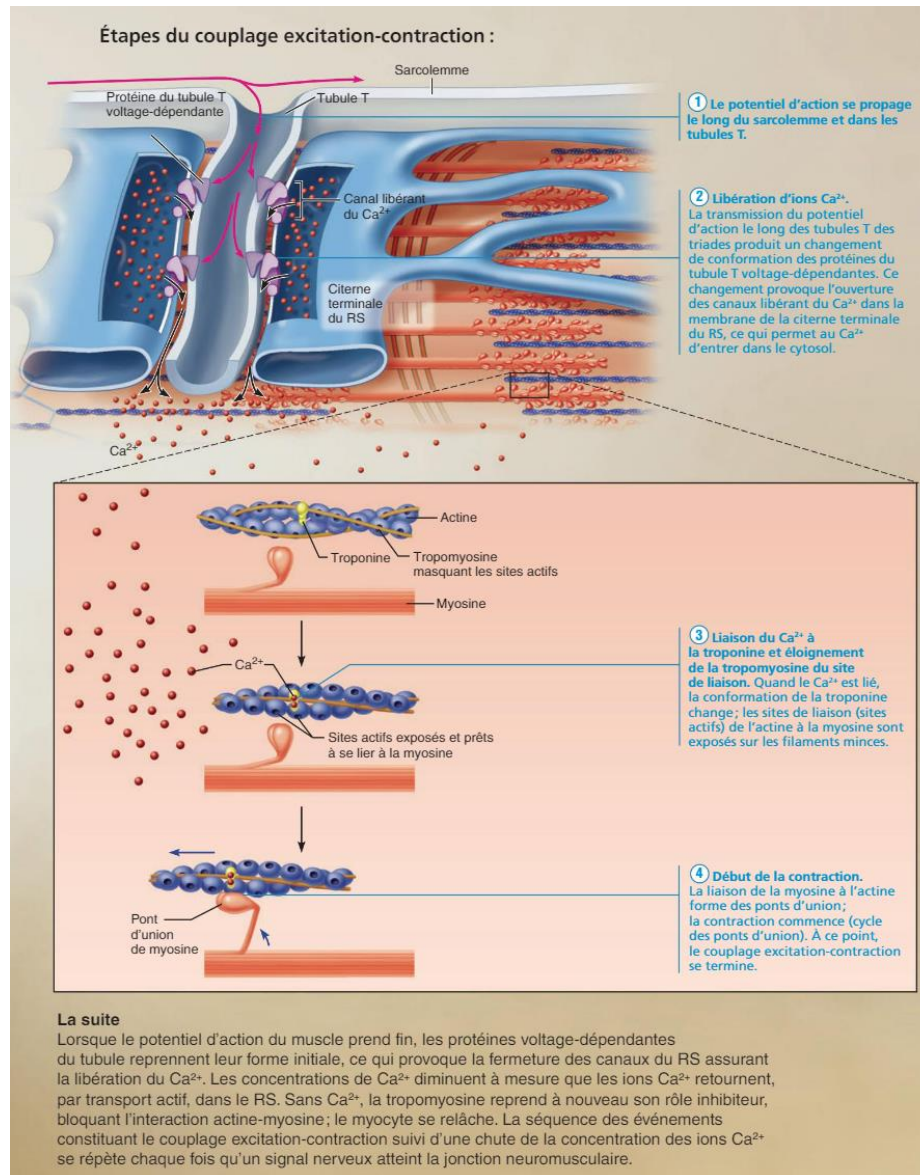


Couplage Excitation-Contraction (1)

- Le couplage excitation-contraction correspond à la succession d'événements par laquelle le PA transmis le long du sarcolemme provoque le glissement des myofilaments



Couplage Excitation-Contraction (2)



Cours S. Armand

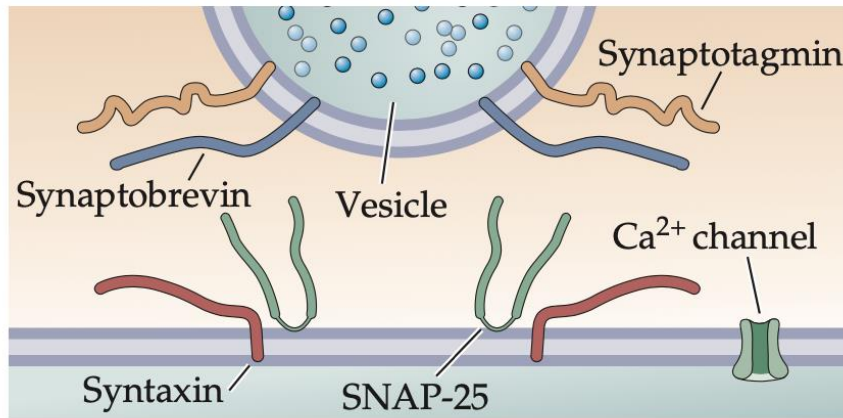
Atteintes de la Jonction Neuro-Musculaire

Clostridium: pathogènes associés à une paralysie

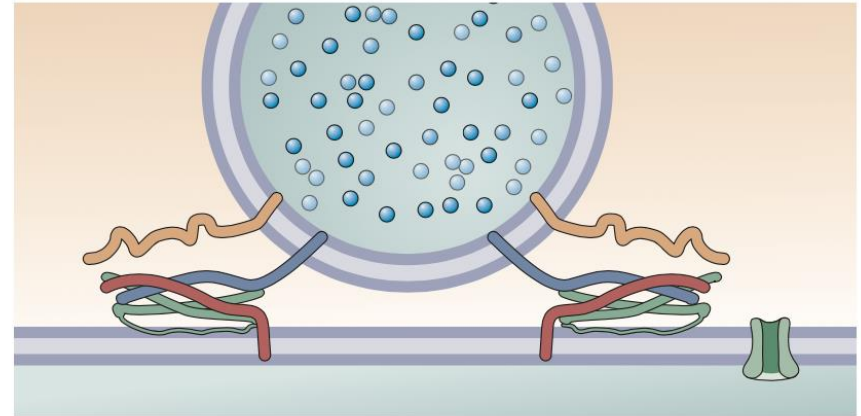
- Bactéries Clostridium:
 - Croissance anaérobie
 - Gram positives
 - Produisent des spores
- 2 types de Clostridium associés à des paralysies:
 - **C. tetani**
 - Tetanos (**paralysie spastique**)
 - Toxine: tetanospasmine (TeTX)
 - **Inhibition de la libération de neurotransmetteurs**
 - Neurones
 - **C. botulinium**
 - Botulisme (**paralysie flasque**)
 - Toxine: Toxine Botulique A-G (BoTX)
 - **Inhibition de la libération de neurotransmetteurs**
 - Jonction Neuro-Musculaire

Exocytose des vésicules

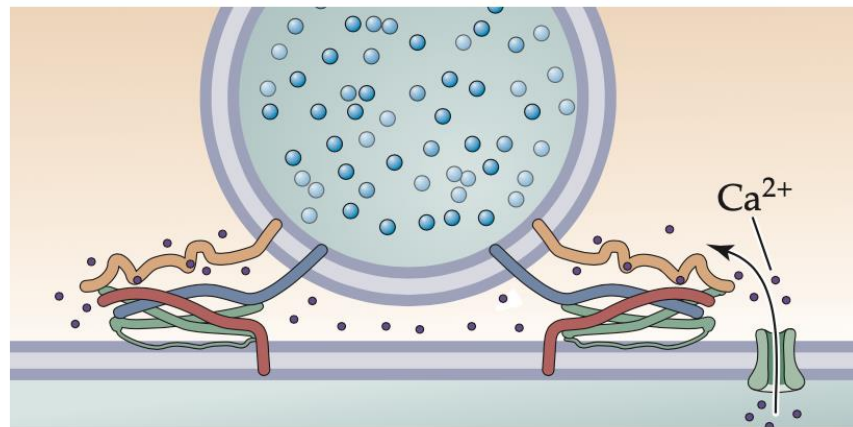
(1) Vesicle docks



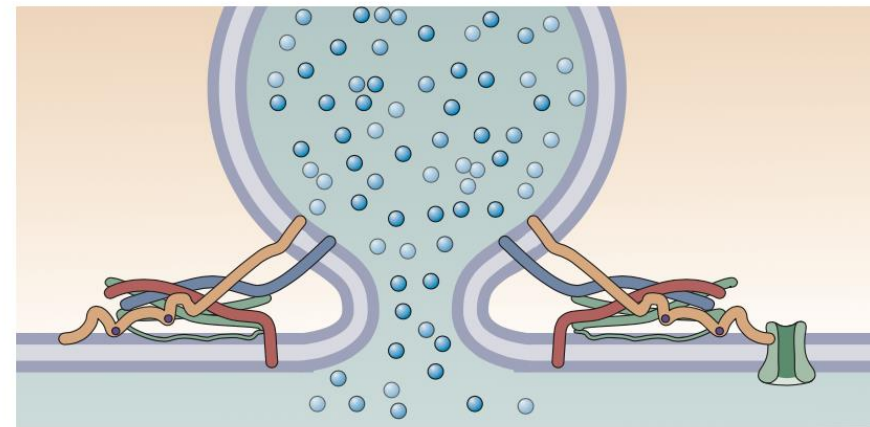
(2) SNARE complexes form to pull membranes together



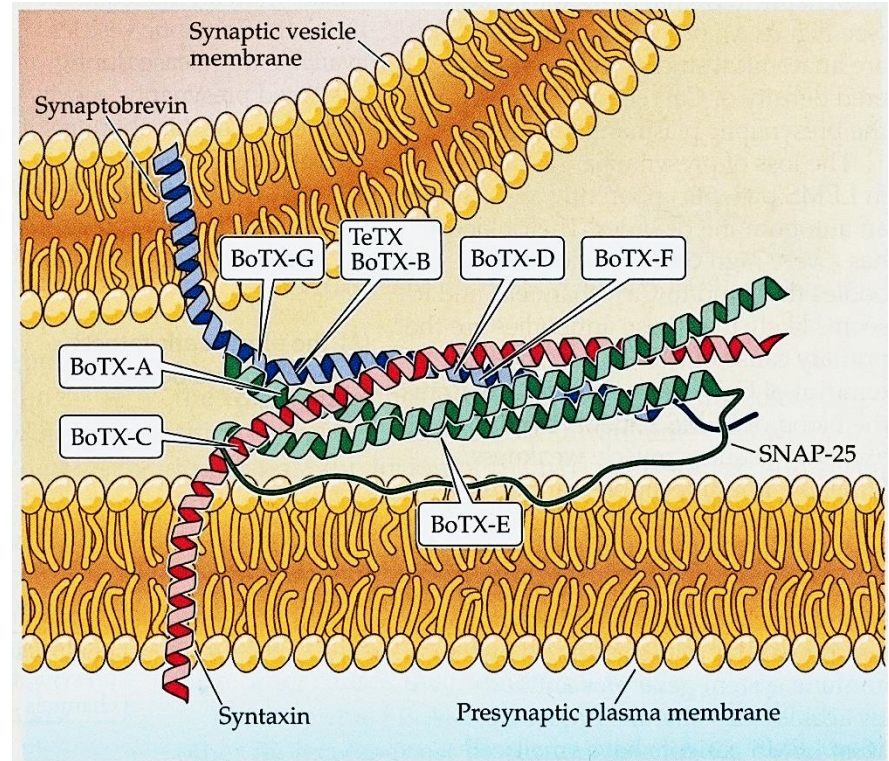
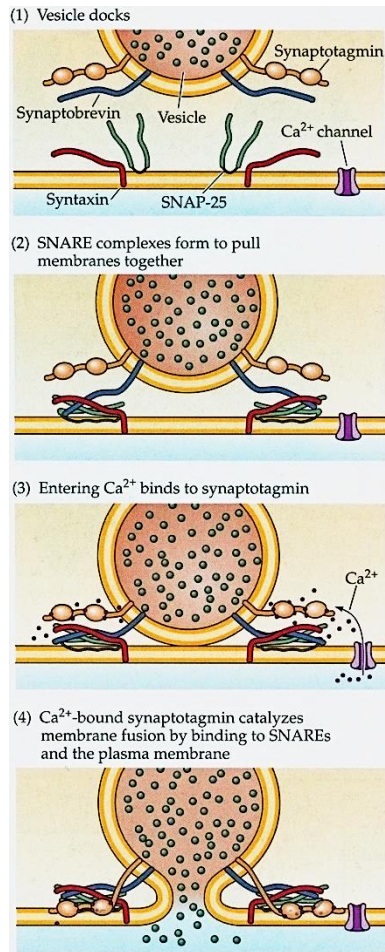
(3) Entering Ca^{2+} binds to synaptotagmin



(4) Ca^{2+} -bound synaptotagmin catalyzes membrane fusion



Sites d'action des toxines botuliniques et tétaniques



Botulisme: Inhibition exocytose vésicules au niveau de la jonction neuromusculaire
= inhibition libération Ach = paralysie flasque

Tétanos: Inhibition exocytose vésicules au niveau d'interneurones inhibiteurs de la moelle
= hyperexcitabilité des muscles squelettiques concernés

Contrôle des connaissances

Unité motrice

Jonction Neuromusculaire:

Neurotransmetteur

Récepteur postsynaptique

Canaux

?

Pathologies

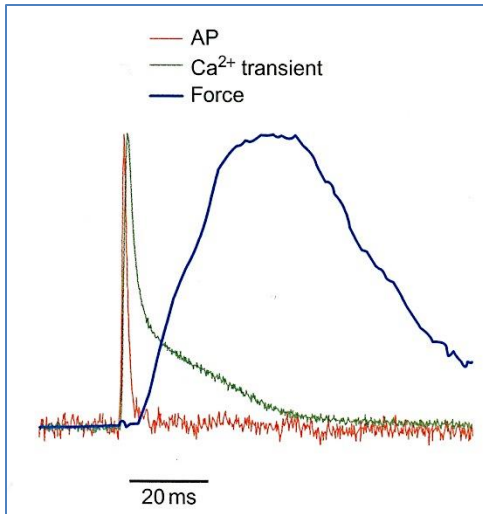
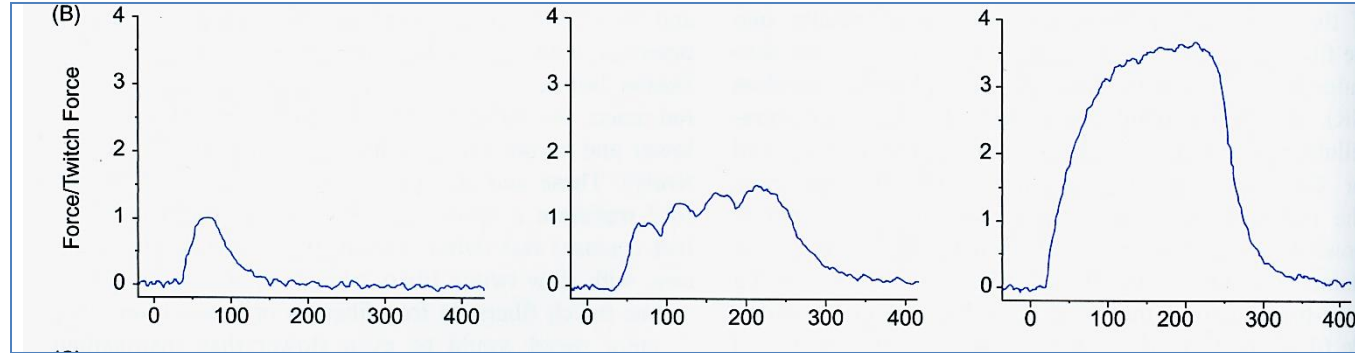
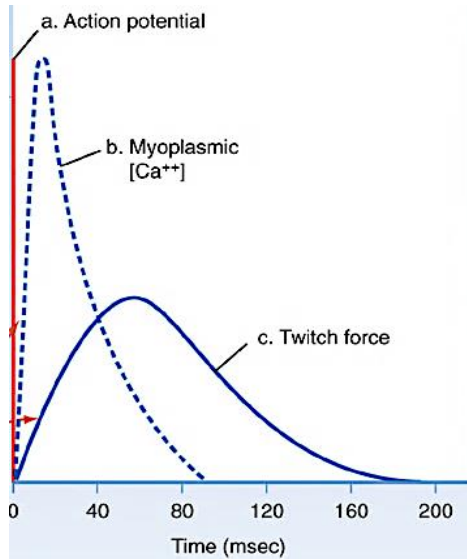
Synapse spéciale

Modulation de la force musculaire?

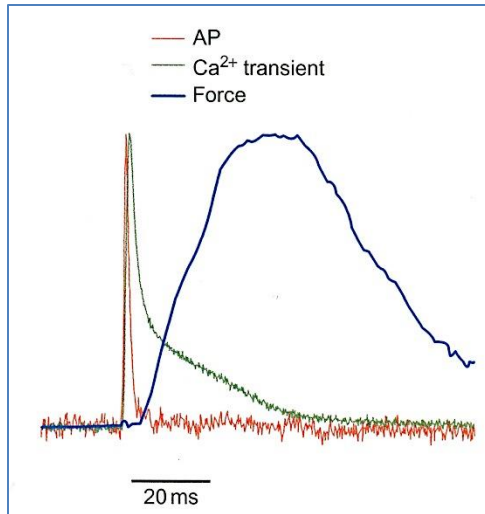
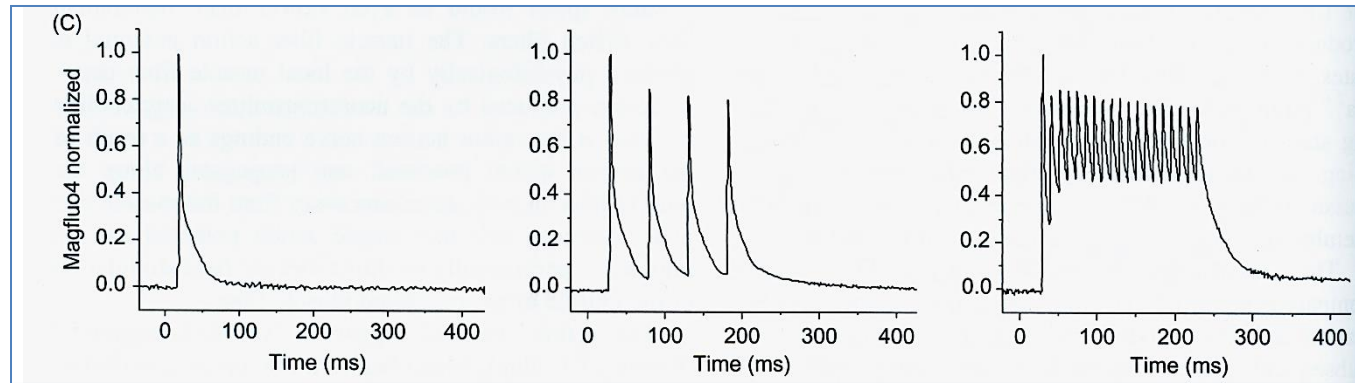
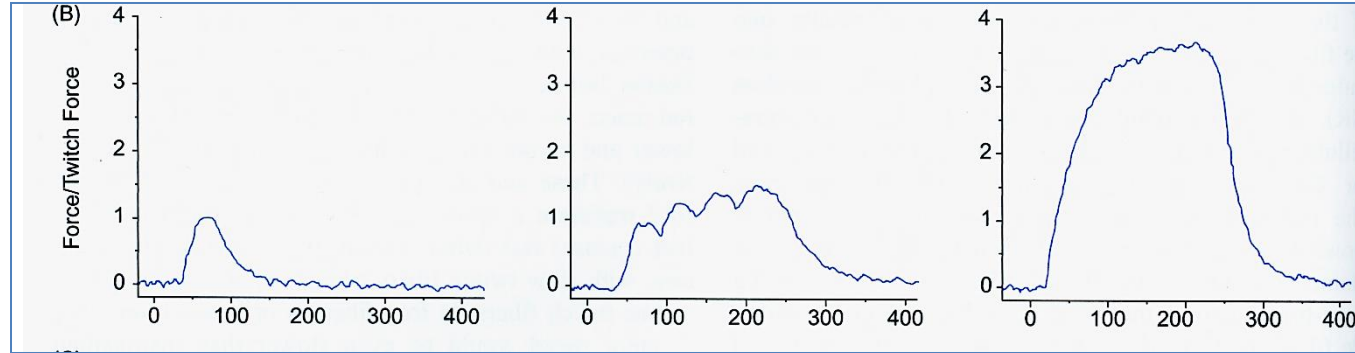
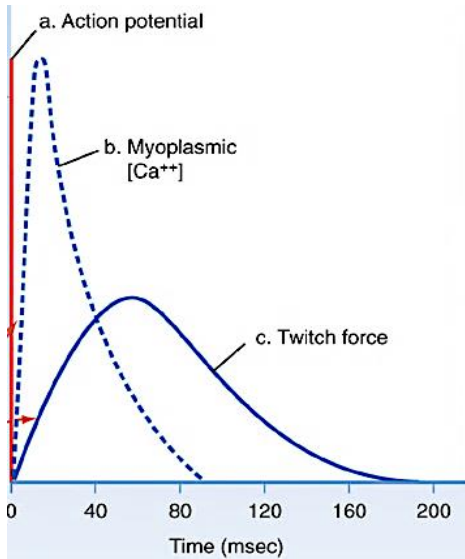
Modulation de la force musculaire?

- Taille des fibres (Nombre de myofibrilles / cellules)
- Composition du muscle (Fibres lentes / Rapides)
- Fréquence de stimulation (Tétanos)
- Nombre de fibres qui se contractent (Sommatation spatiale)

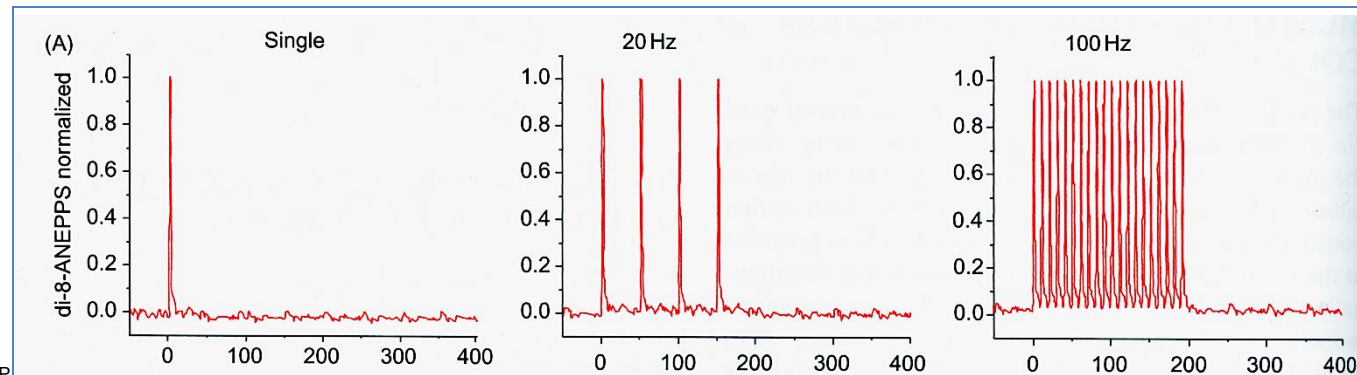
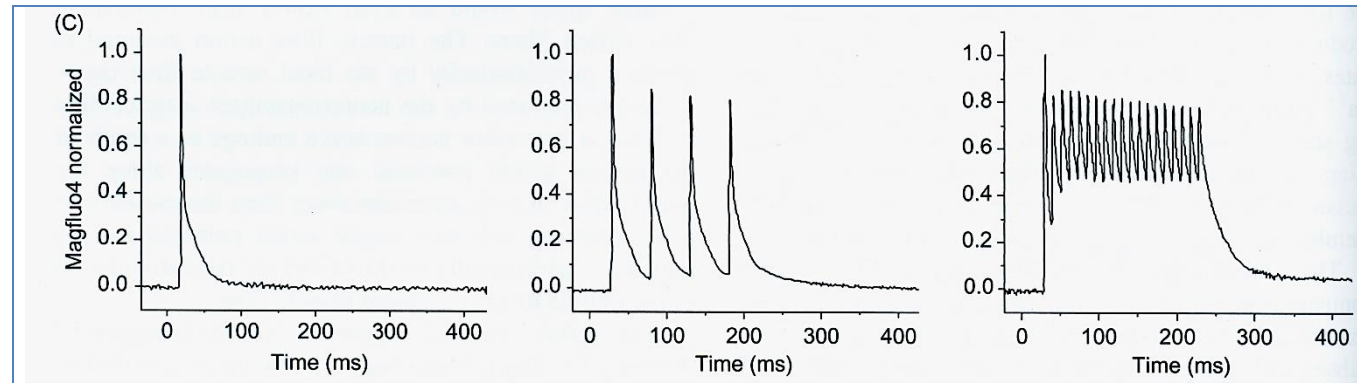
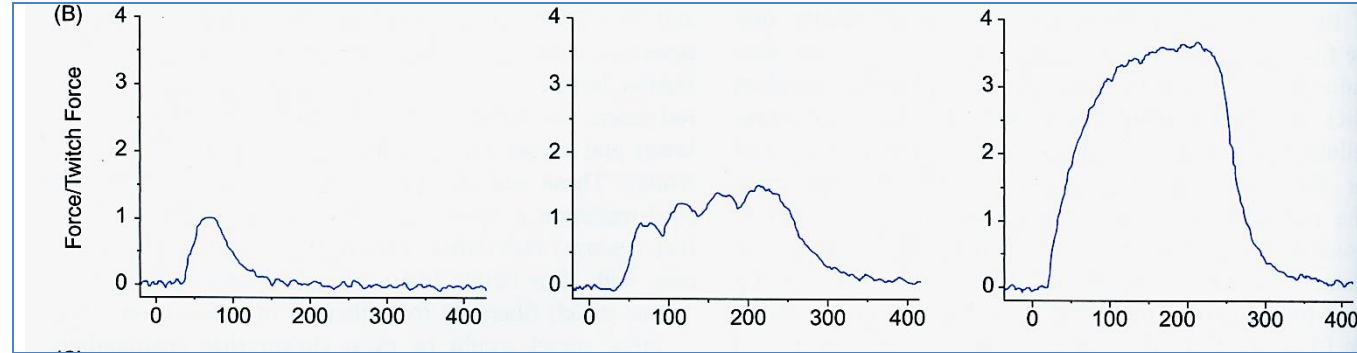
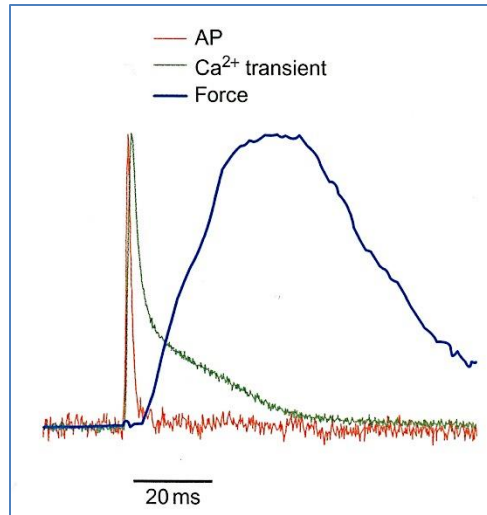
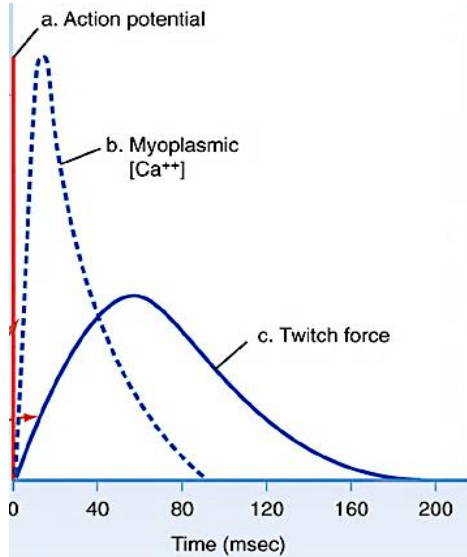
Modulation de la force



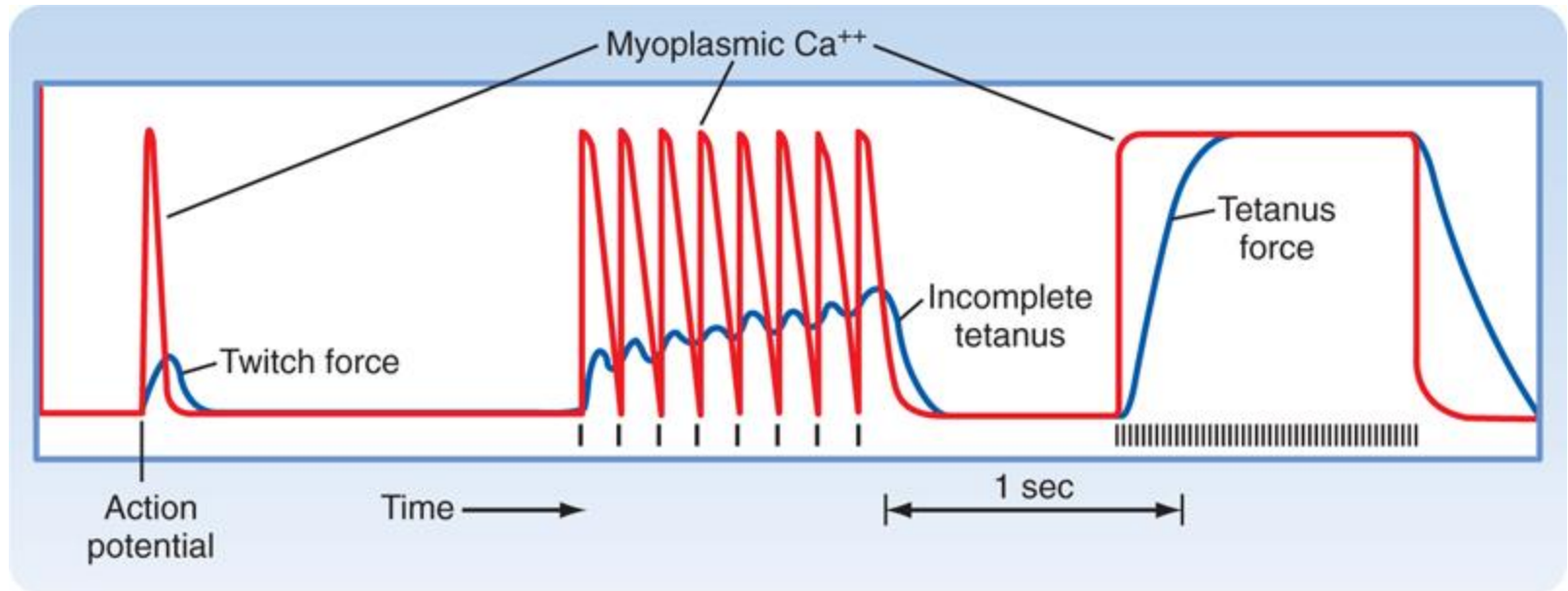
Modulation de la force



Modulation de la force



Sommation temporelle



Koeppen and Stanton: Berne & Levy Physiology, 6th Edition.
Copyright © 2010 by Mosby, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

Des stimulations de même intensité sont appliquées successivement, jusqu'à obtenir un tétanos.

Le tétanos correspond à une contraction physiologique du muscle.

L'augmentation de la force de contraction est due au maintien du Ca^{2+} cytoplasmique constamment élevée permettant la mise sous tension des éléments élastiques du muscle.

Modulation de la force musculaire?

- Taille des fibres (Nombre de myofibrilles / cellules)
- Composition du muscle (Fibres lentes / Rapides)
- Fréquence de stimulation (Tétanos)
- Nombre de fibres qui se contractent (Sommatation spatiale)

Composition des muscles squelettiques: différents types de fibres

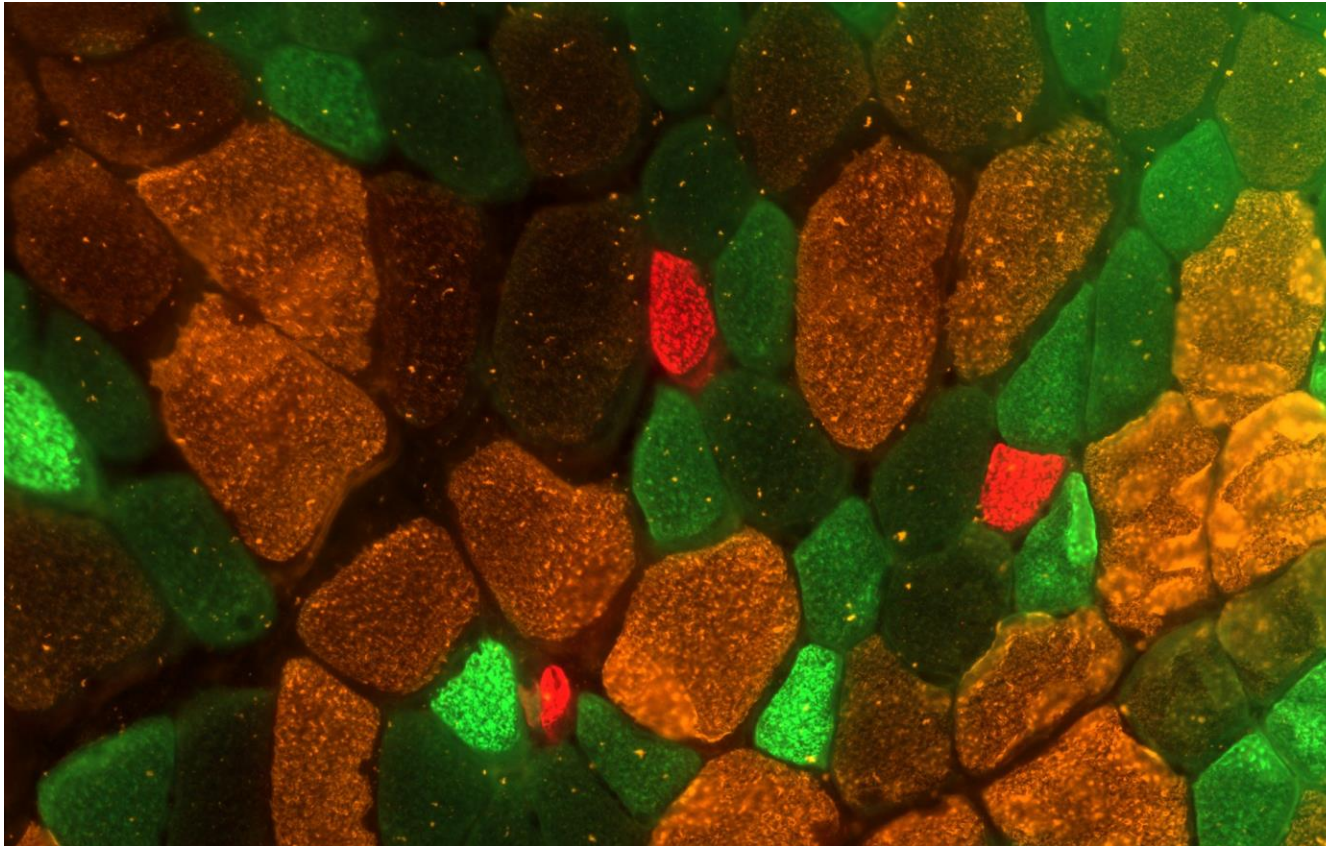
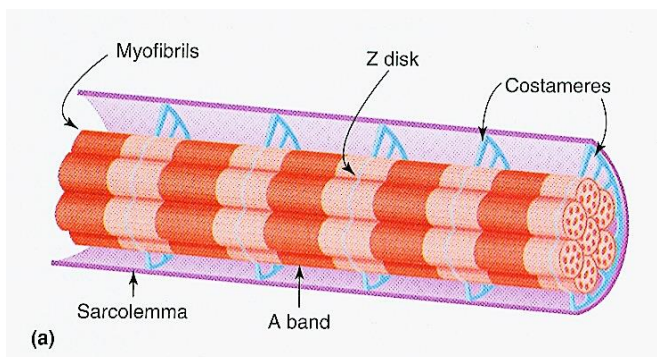
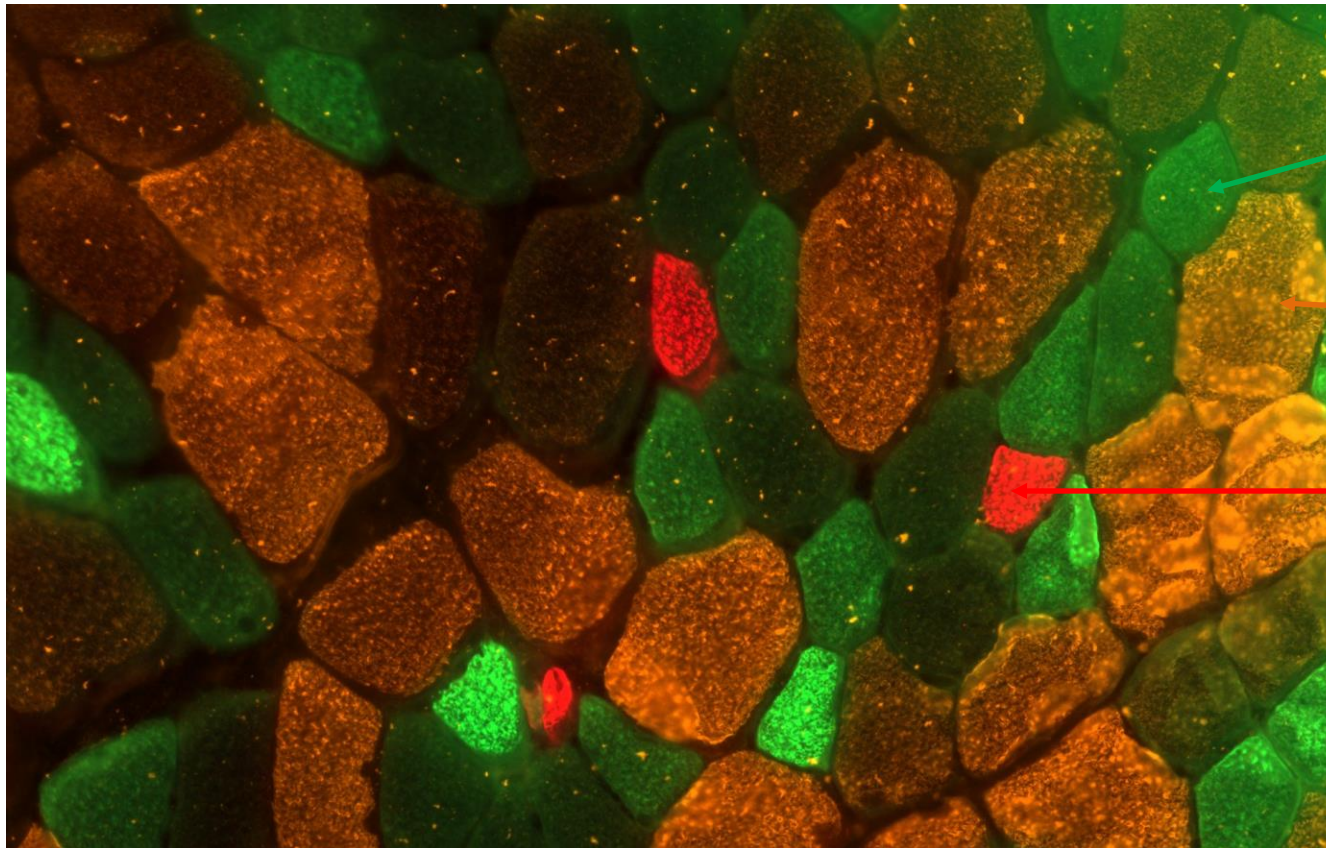


Photo : S. Koenig (Frieden's lab Unige)



Composition des muscles squelettiques: différents types de fibres

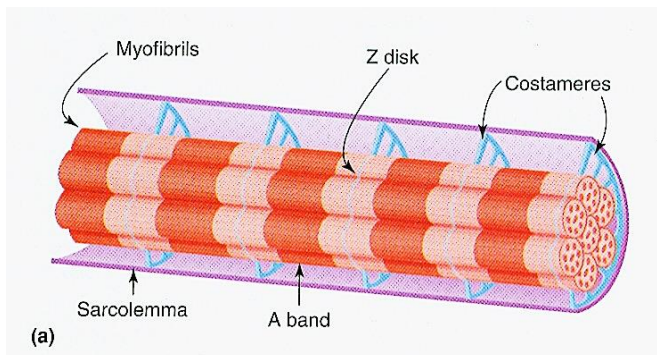


Fibre Rapide
(Type IIA)

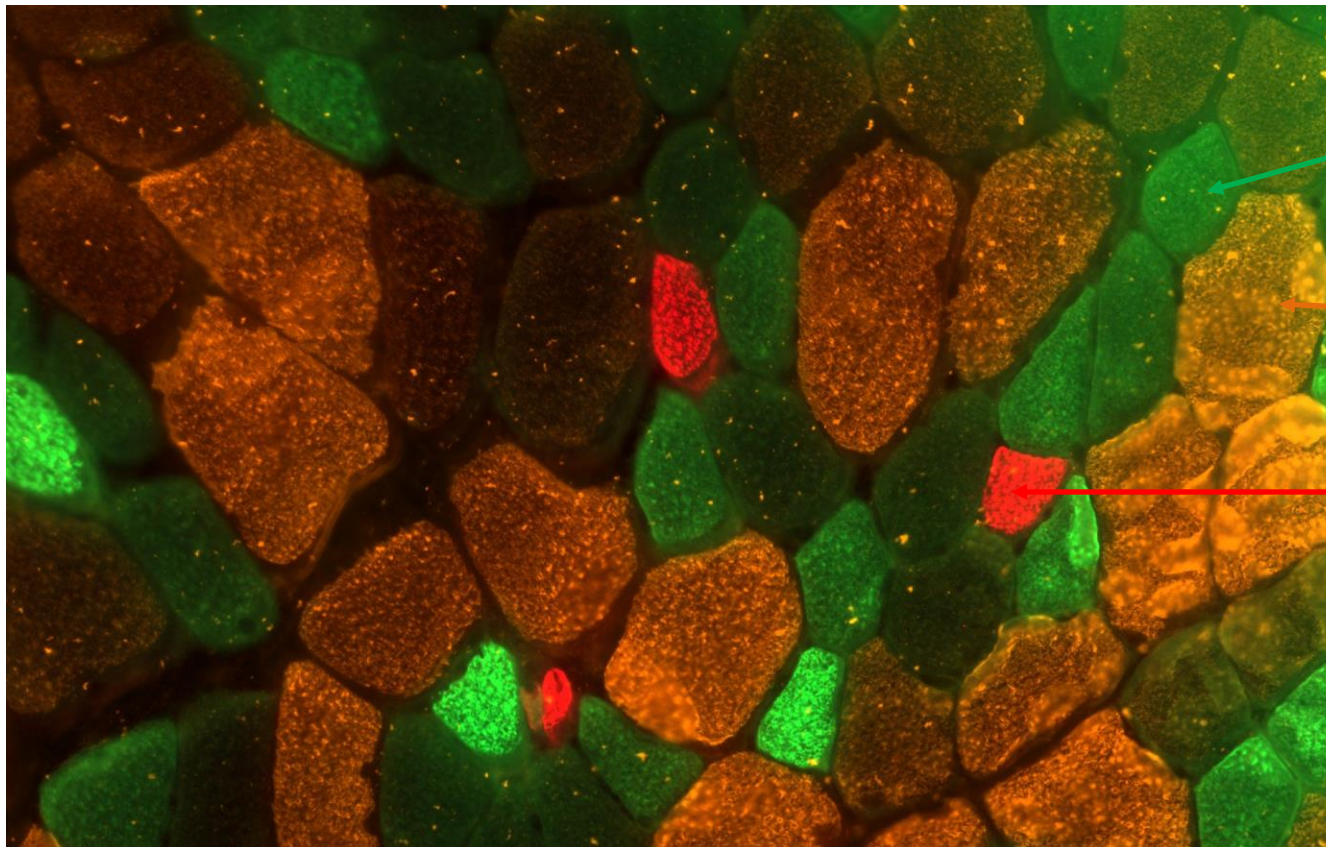
Fibre Très Rapide
(Type IIB)

Fibre Lente
(Type I)

Photo : S. Koenig (Frieden's lab Unige)



Composition des muscles squelettiques: différents types de fibres

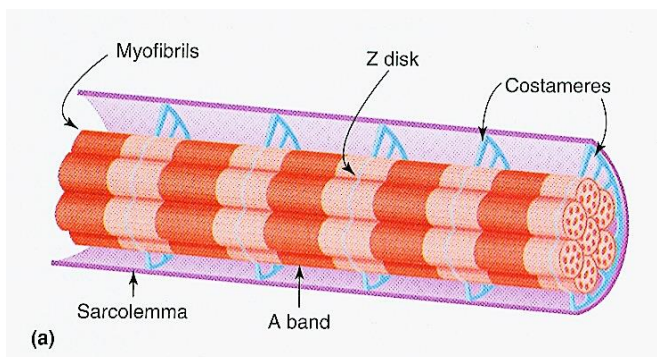


Fibre Rapide
(Type IIA)

Fibre Très Rapide
(Type IIB)

Fibre Lente
(Type I)

Photo : S. Koenig (Frieden's lab Unige)



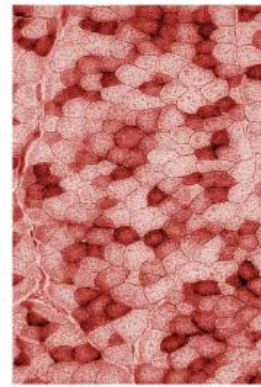
Diamètre Fibres Musculaires : IIB > IIA > I

Force : IIB > IIA > I

Composition des muscles squelettiques: différents types de fibres

- Fibres de type I (lentes):
 - Se contractent plus lentement
 - Se décontractent plus lentement
- Fibres de type II (rapides):
 - Se contractent plus rapidement
 - Se décontractent plus rapidement
- Ratio Type I/ Type II détermine la:
 - Vitesse de contraction d'un muscle donné
 - Un muscle qui contient beaucoup de fibres lentes se contracte lentement
 - Force de contraction
 - Types II ont un plus large diamètre que les type I

Types de fibres

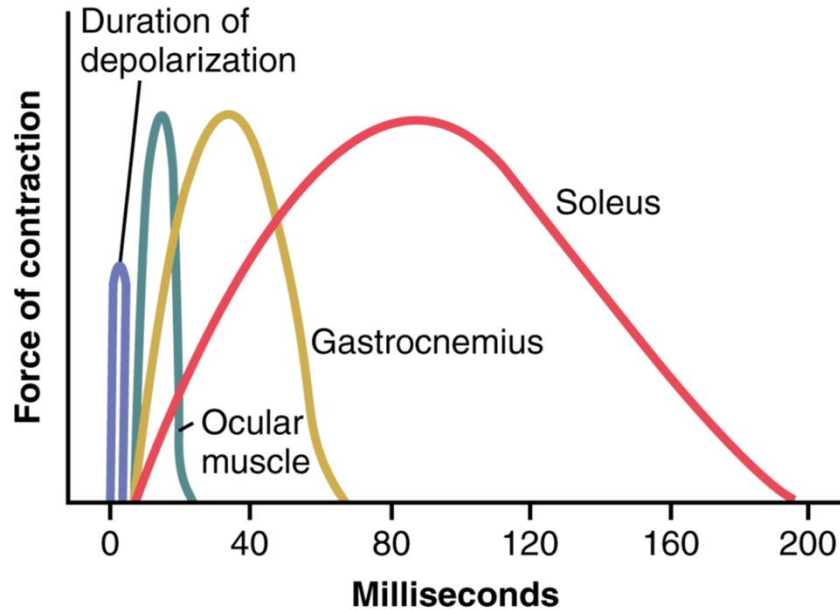


Human

	Type I (lente)	Type IIa (rapide)	Type IIb (rapide)
Métabolisme	Oxydatif	Oxydatif + Glycolytique	Glycolytique
Couleur	Rouge	Rouge -Rose	Blanche
Diamètre	Petit	Moyen	Grand
→ Vitesse de contraction	Lente	Rapide	Très rapide
→ Force de contraction	Faible	Moyenne	Elevée
Fatigabilité	Faible	Modérée	Elevée
Type d'activité	Posture Endurance	Sprints	Mouvements puissants très courts



Type de fibres: lentes ou rapides



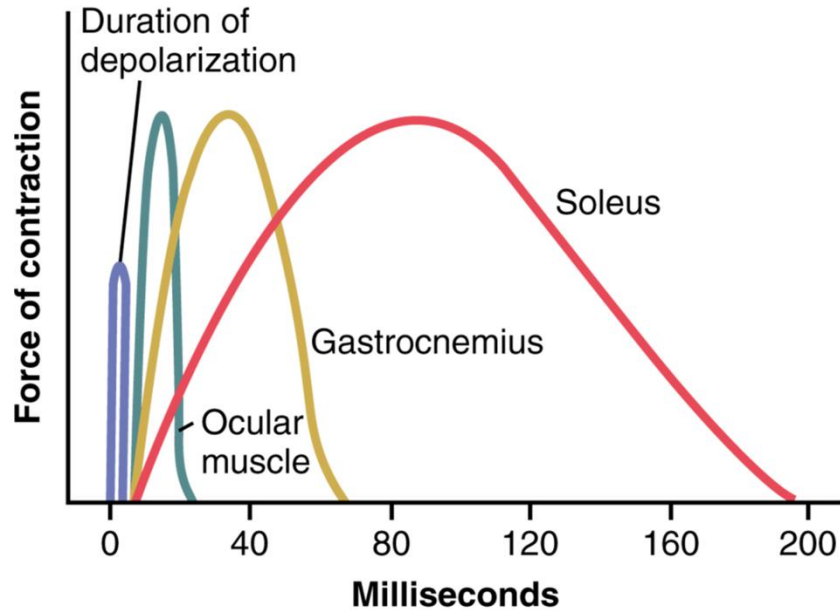
- Les muscles se contractent et se décontractent rapidement ou lentement selon leur composition en fibres musculaires

Soleus: Riche en fibres lentes (type I)

Gastrocnemius: Riche en fibres rapides (type II)

- Toutes les fibres d'une même unité motrice ont le même phénotype (lent ou rapide)

Type de fibres: lentes ou rapides



- Lente (type I) / Rapide (type II):
 - Contraction: Activité ATPase des tête globulaires des chaines lourdes des Myosines
 - Décontraction: Activité des SERCA

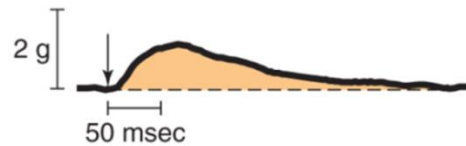
Fibres lentes (type I) sont très présentes dans les muscles permettant le maintien de la posture

Type de fibres: fatigables ou résistantes à la fatigue

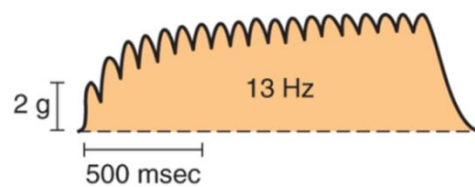
Type I

Lentes - oxydatives

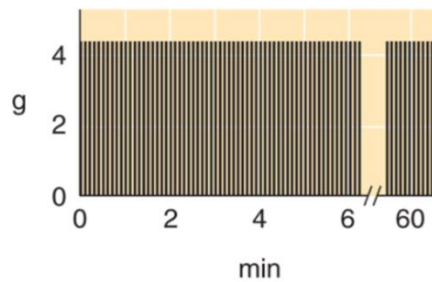
Twitch



Unfused tetanic force

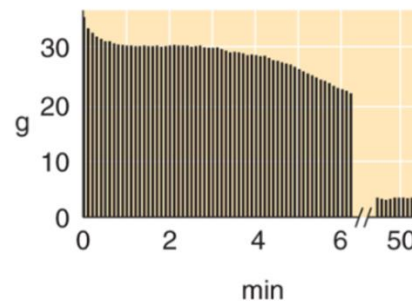
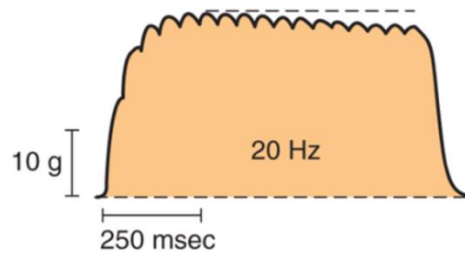
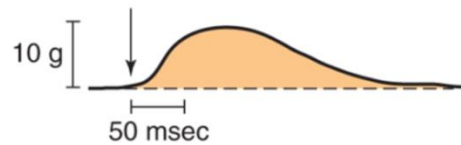


Fatigability

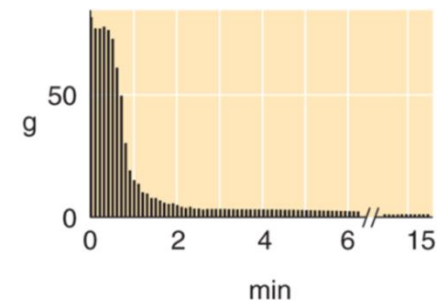
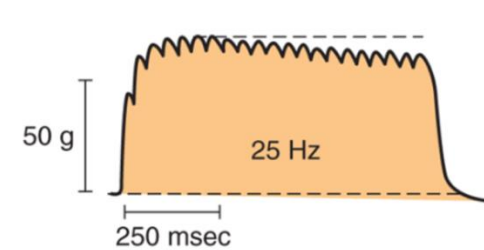
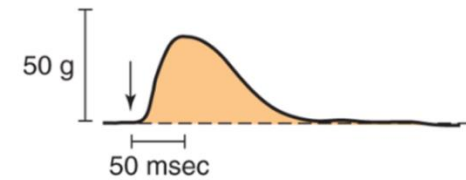


Type II

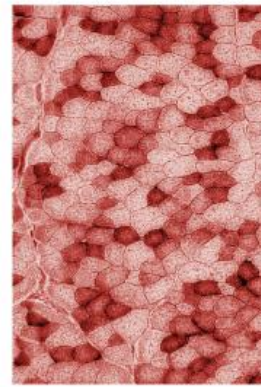
Rapides oxydatives - glycolytiques



Rapides - glycolytiques



Types de fibres



Human

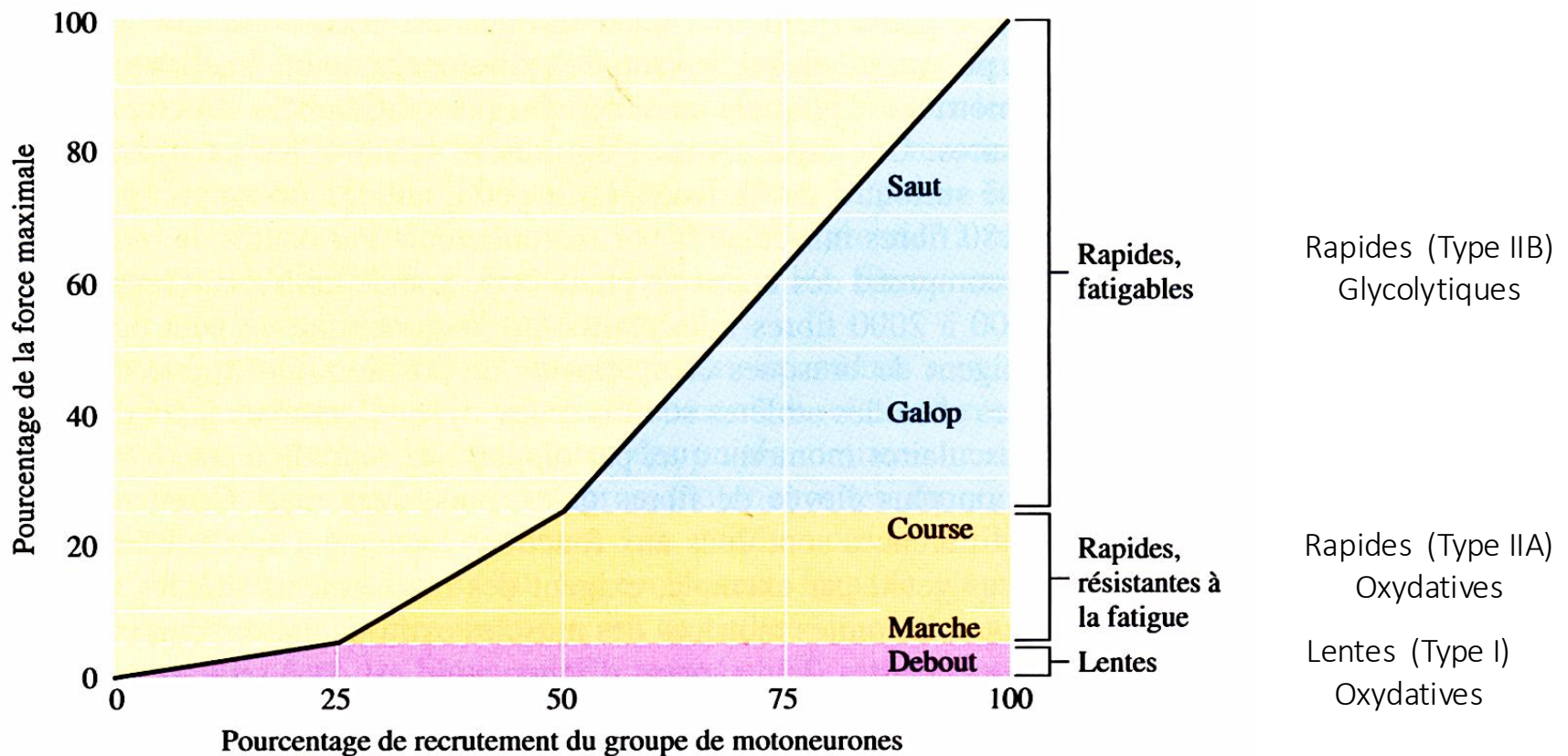
	Type I (lente)	Type IIa (rapide)	Type IIb (rapide)
Métabolisme	Oxydatif	Oxydatif + Glycolytique	Glycolytique
Couleur	Rouge	Rouge -Rose	Blanche
Diamètre	Petit	Moyen	Grand
Vitesse de contraction	Lente	Rapide	Très rapide
Force de contraction	Faible	Moyenne	Elevée
Fatigabilité	Faible	Modérée	Elevée
Type d'activité	Posture Endurance	Sprints	Mouvements puissants très courts

Modulation de la force musculaire?

- Fréquence de stimulation (tétanos)
- Taille des fibres (nombre de myofibrilles / cellules)
- Composition du muscle
- Nombre de fibres qui se contractent (Somme spatiale)

Sommation spatiale

Les unités motrices lentes sont recrutées avant les unités motrices rapides

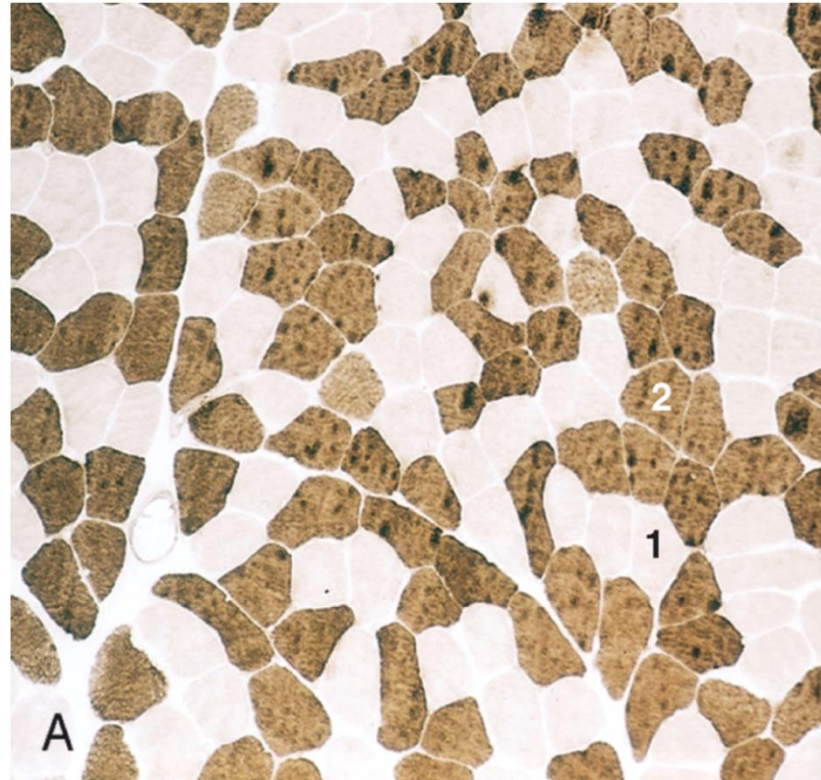
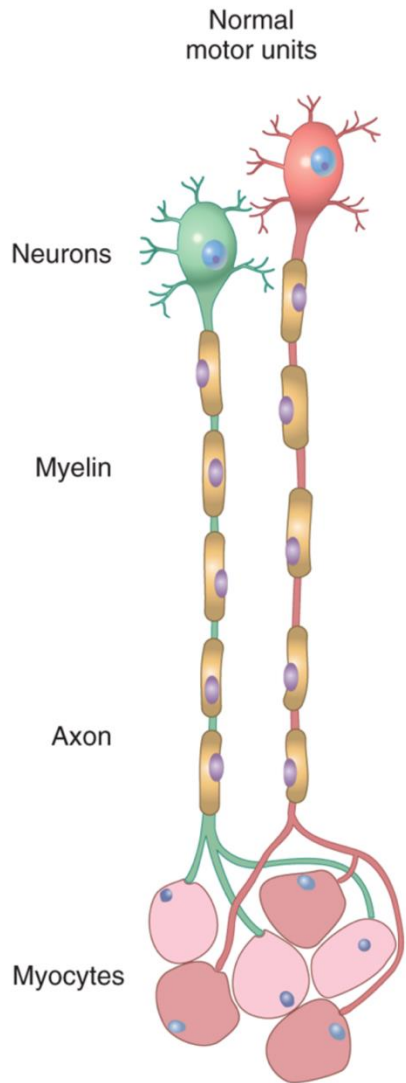


Différents types de fibres musculaires

TABLE 12-2 Properties of Motor Units

	<i>Type I</i>	<i>Type II</i>
Properties of Nerve		
Cell diameter	Small	Large
Conduction velocity	Fast	Very fast
Excitability	High	Low
Properties of Muscle Cells		
Number of fibers	Few	Many
Fiber diameter	Moderate	Large
Force of unit	Low	High
Metabolic profile	Oxidative	Glycolytic
Contraction velocity	Moderate	Fast
Fatigability	Low	High

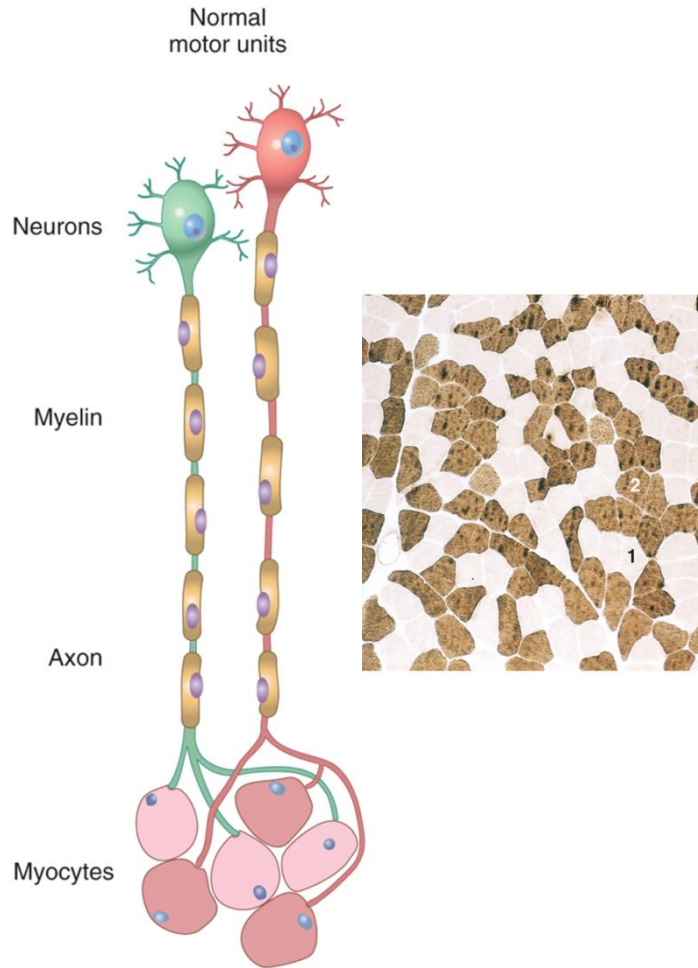
Unité motrice: Type de fibre



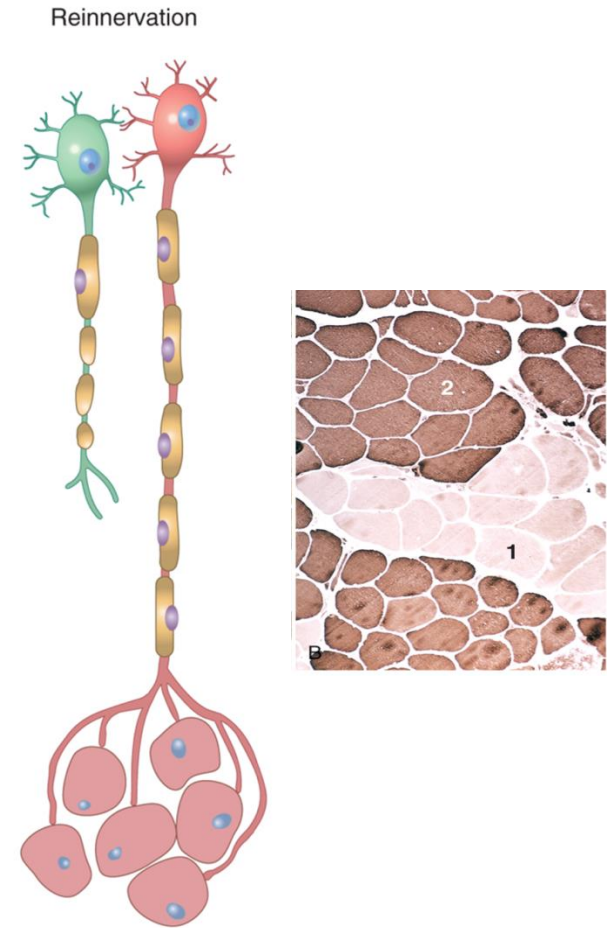
Chaque fibre musculaire est innervée par un seul motoneurone α

Toutes les fibres musculaires innervées par un motoneurone α sont du même type de fibre (lent ou rapide)

L'innervation définit le type de fibres



Physiologique



Pathologique

Type de fibres: résistantes ou sensibles à la fatigue

Rôle du métabolisme dans la resistance à la fatigue

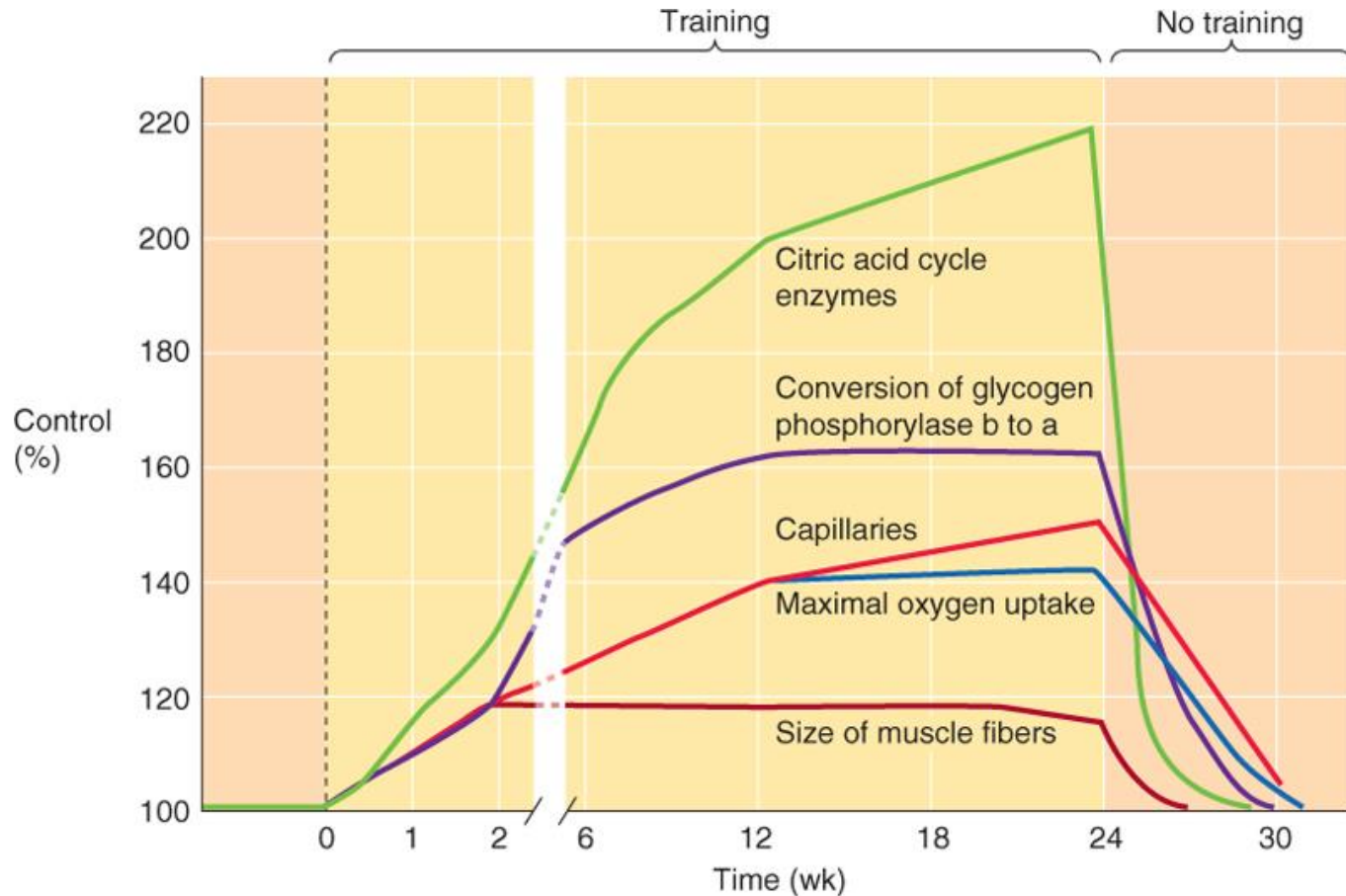
Lentes - oxydatives

Rapides oxydatives - glycolytiques

Rapides – glycolytiques

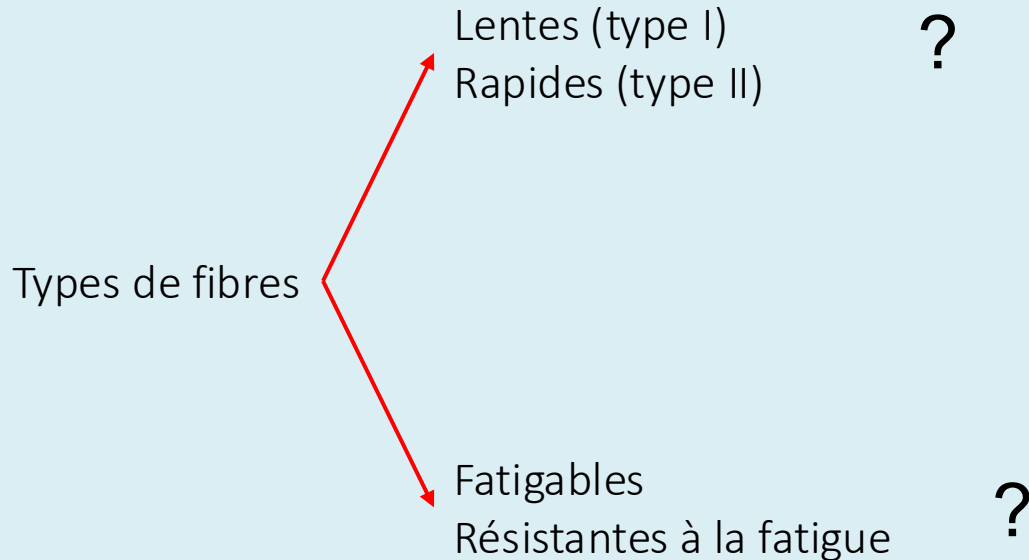
	Slow Twitch	Fast Twitch	Fast Twitch
Synonym	Type I	Type IIa	Type IIb
Fatigue	Resistant	Resistant	Fatigable
Color	Red (myoglobin)	Red (myoglobin)	White (low myoglobin)
Metabolism	Oxidative	Oxidative	Glycolytic
Mitochondria	High	Higher	Fewer
Glycogen	Low	Abundant	High

Plasticité des muscles!



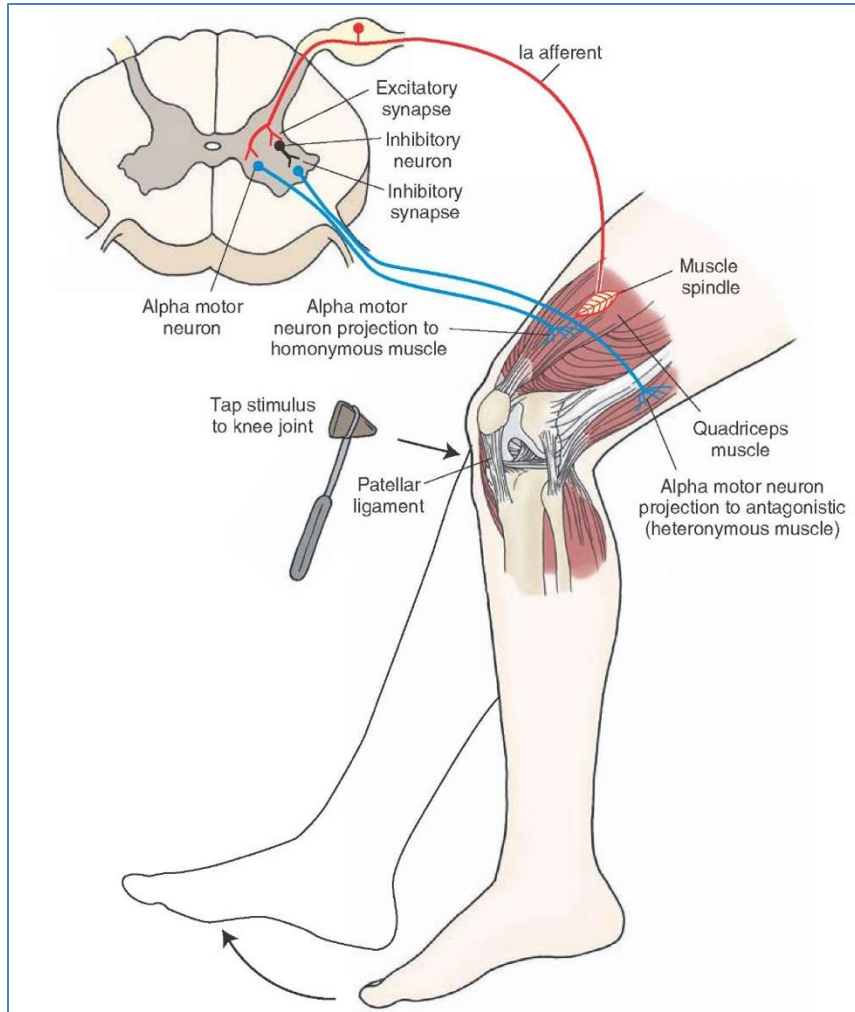
Boron & Boulpaep: Medical Physiology, 2nd Edition.
Copyright © 2009 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

Contrôle des connaissances

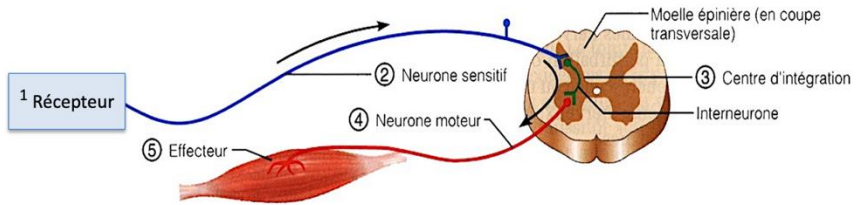


Lien avec la notion d'unité motrice ?

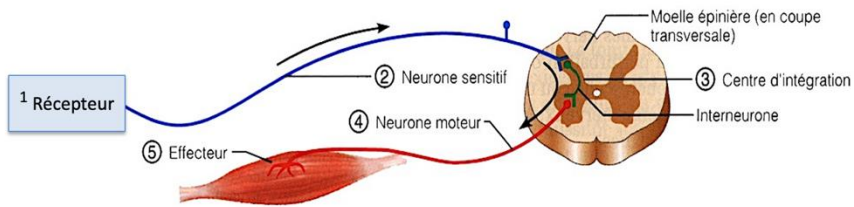
Reflexe Myotatique



Arc réflexe : un exemple



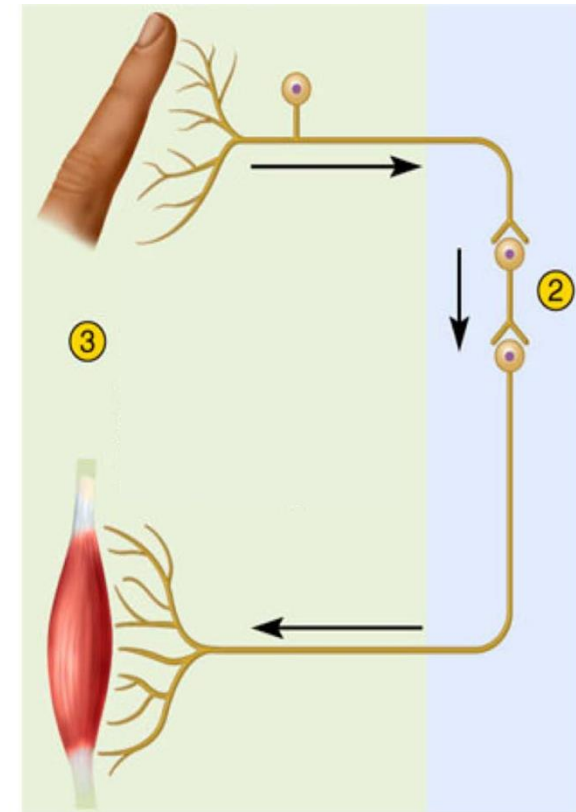
Arc réflexe : un exemple



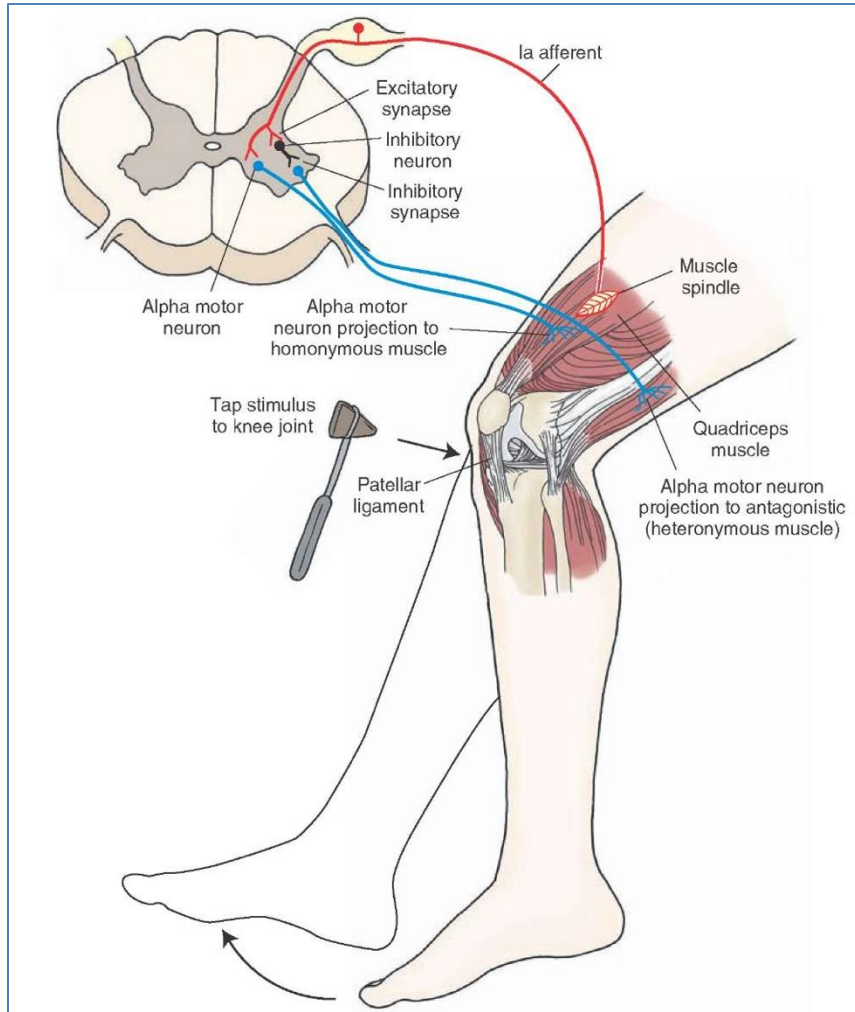
Cours Prof Denis Jabaudon

Classification fonctionnelle

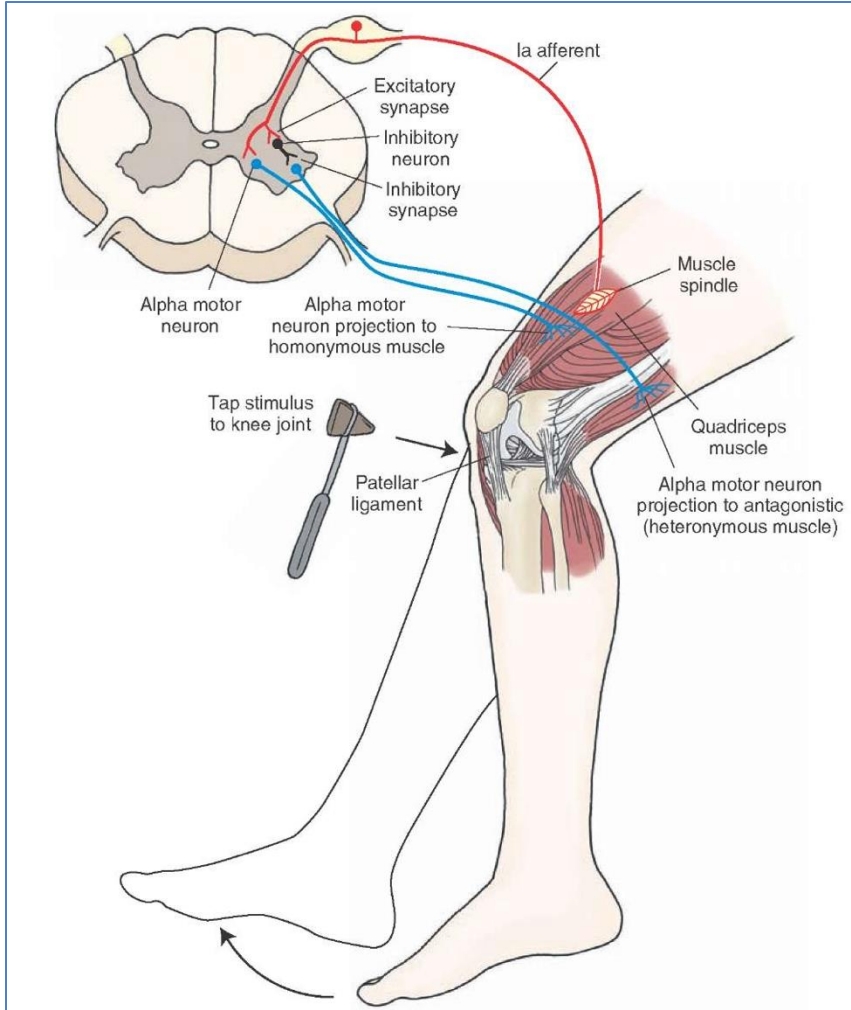
- Neurones sensoriels (afférents)
 - Détectent modifications de l'environnement (stimuli)
 - Transmettent l'information au SNC
 - Bipolaires, pseudo-unipolaires
- « Interneurones »
 - Entre voies sensibles et motrices du SNC
 - Constituent 90% des neurones
 - Traitement, stockage et distribution de l'information
 - Multipolaires
- Neurones efférents (moteurs)
 - Envoient signaux vers les organes effecteurs (muscles, glandes)
 - Multipolaires



Reflexe Myotatique

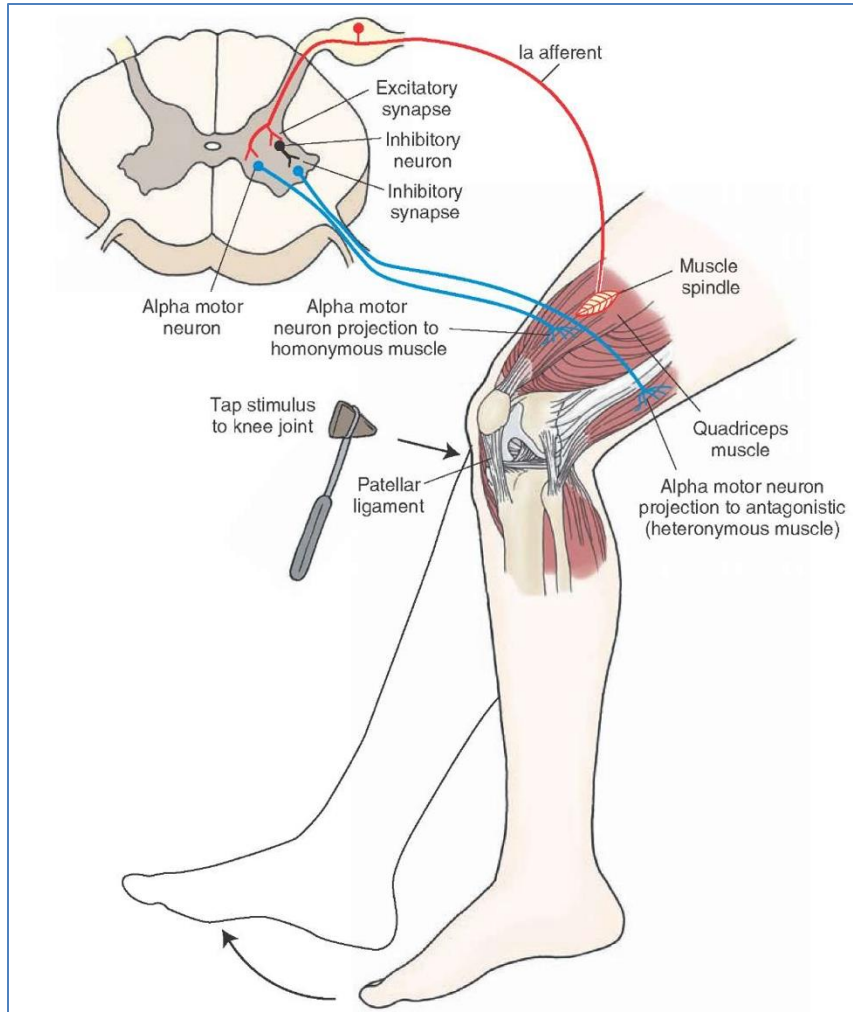


Reflexe Myotatique



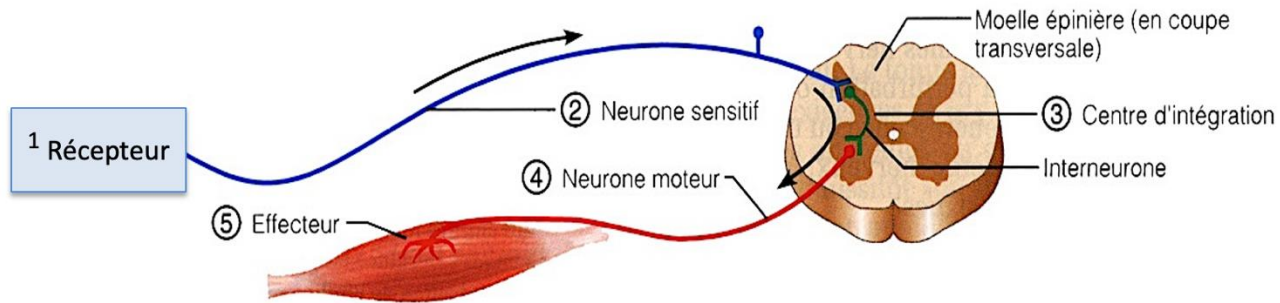
- Muscle squelettique?
- Comment se contracte un muscle squelettique?
- Qu'est-ce qui contrôle la contraction des muscles squelettiques?
- Récepteurs sensoriels capables de détecter le stimulus?
- Fibres nerveuses afférentes?
- Fibres nerveuses efférentes?

Reflexe Myotatique



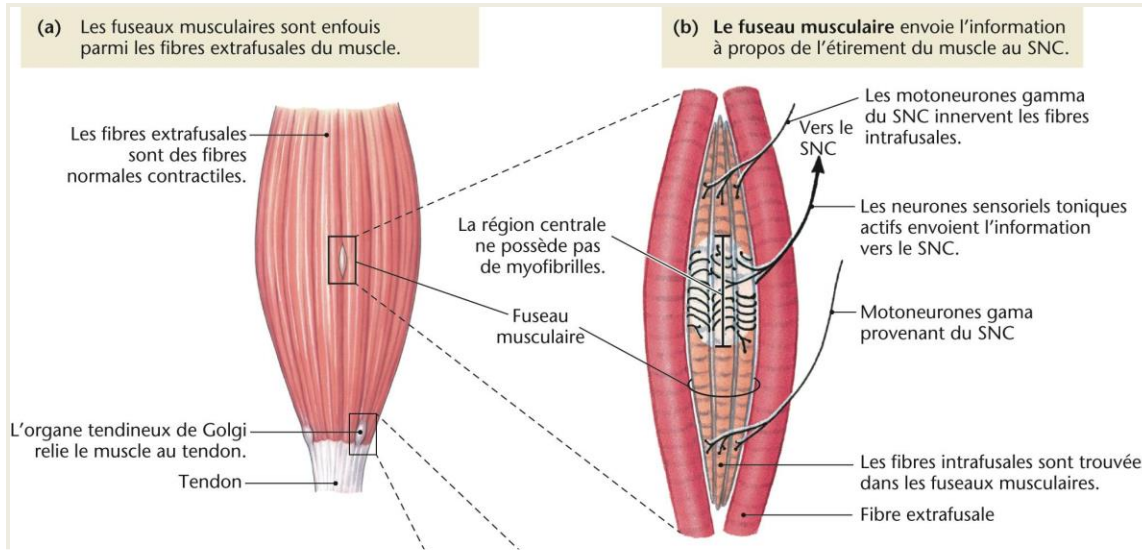
- Muscle squelettique? ✓
- Comment se contracte un muscle squelettique? ✓
- Qu'est-ce qui contrôle la contraction des muscles squelettiques? ✓
- Récepteurs sensoriels capables de détecter le stimulus?
- Fibres nerveuses afférentes?
- Fibres nerveuses efférentes?

Circuits réflexes : Reflexe Myotathique



Recepteurs?

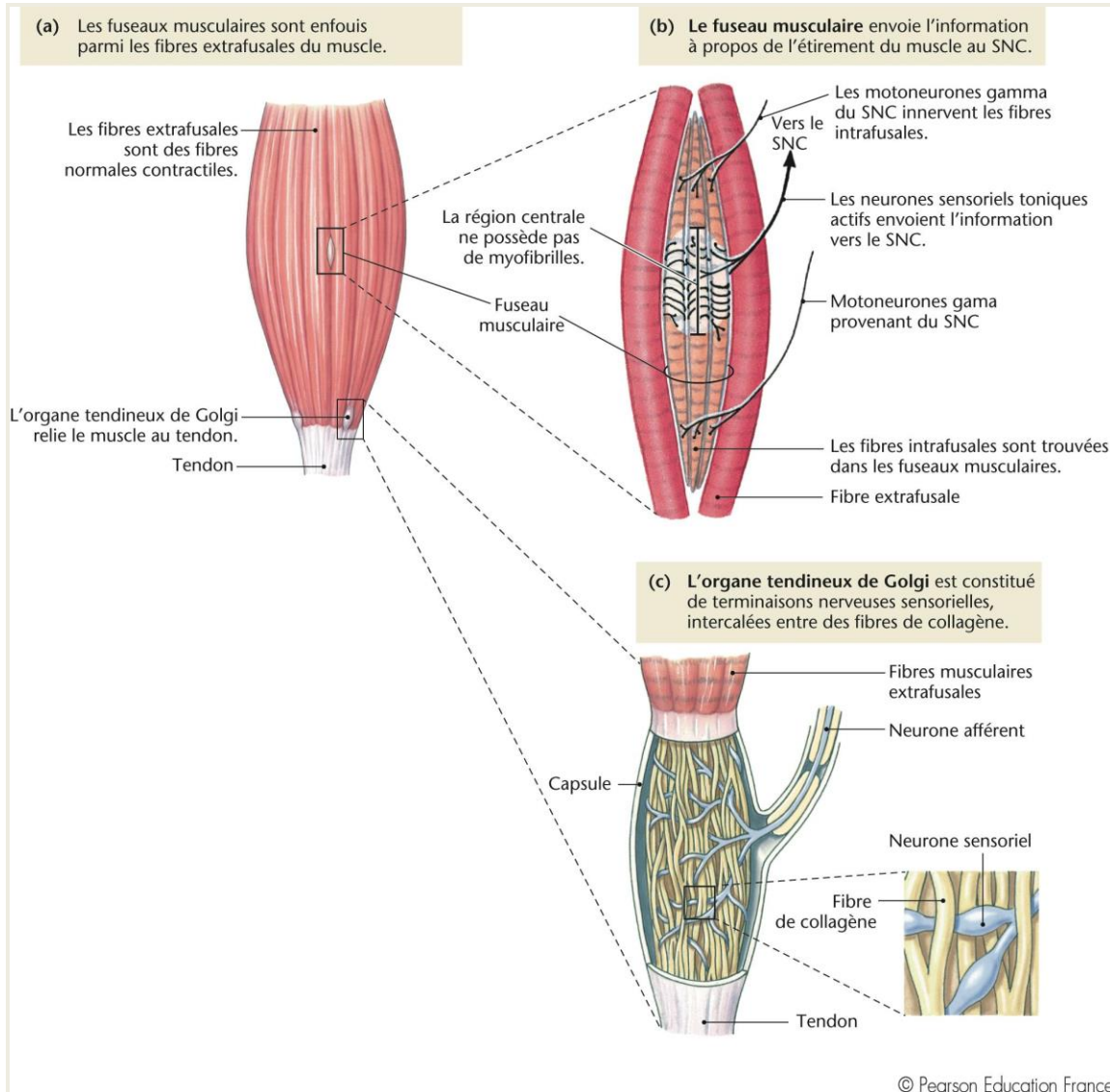
Mécanorécepteurs proprioceptifs



Fuseau neuromusculaire:

Cellules musculaires (4 à 8) modifiées, entourées d'une capsule conjonctive. Détecte des variations de la longueur du muscle.

Mécanorécepteurs proprioceptifs



Fuseau neuromusculaire:

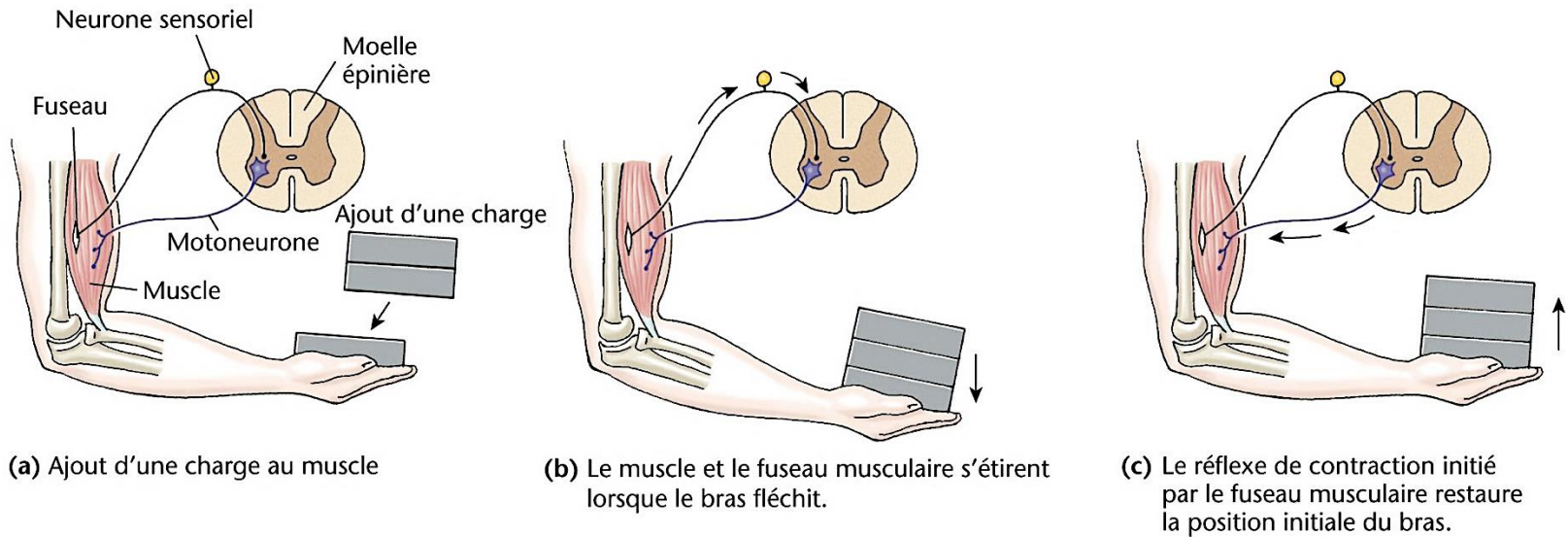
Cellules musculaires (4 à 8) modifiées, entourées d'une capsule conjonctive. Détecte des variations de la longueur du muscle.

Organe tendineux de Golgi:

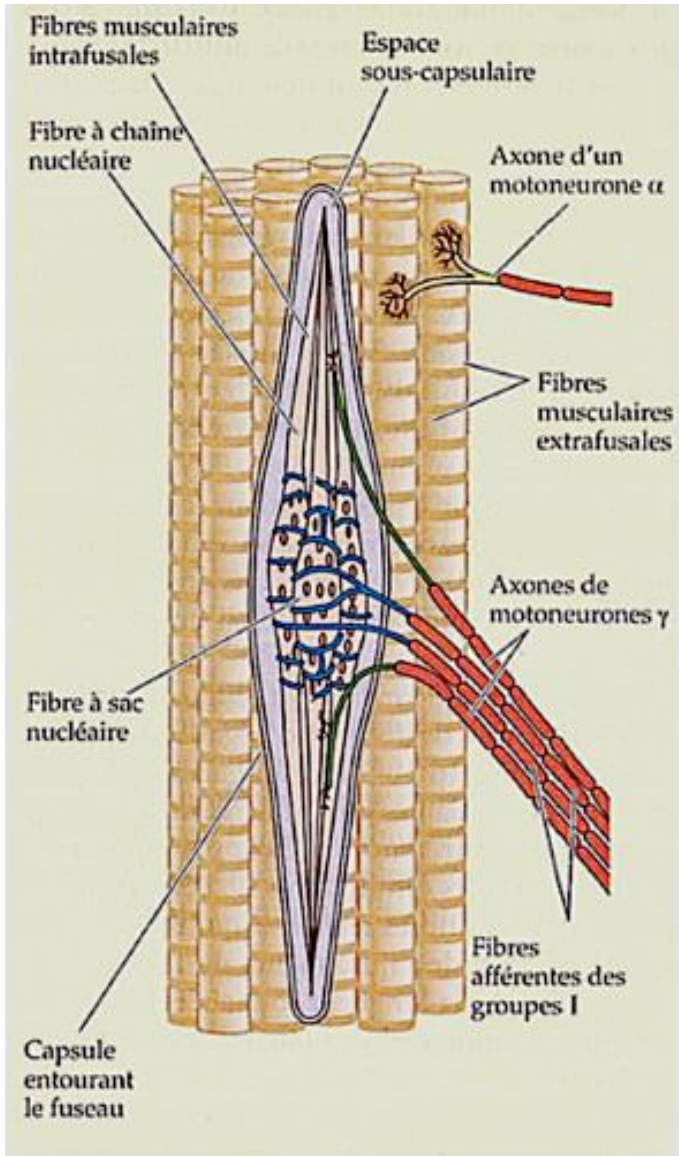
Terminaisons nerveuses encapsulées à la jonction entre le muscle et le tendon. Détecte des changements de tension.

Reflex : Rôle du fuseau neuromusculaire

Réflexe du fuseau musculaire : l'ajout d'une charge étire le muscle et les fuseaux, créant un réflexe de contraction.



Fuseau neuromusculaire: Fibres intra-fusales



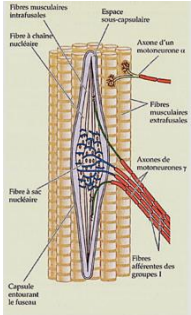
Afférences:

Fibres Ia, fréquence des PA augmente avec le degré d'étirement

Efférences:

Innervation γ , qui permet la contraction des éléments contractiles du fuseau neuromusculaire

Fuseau neuromusculaire: Fibres intra-fusales

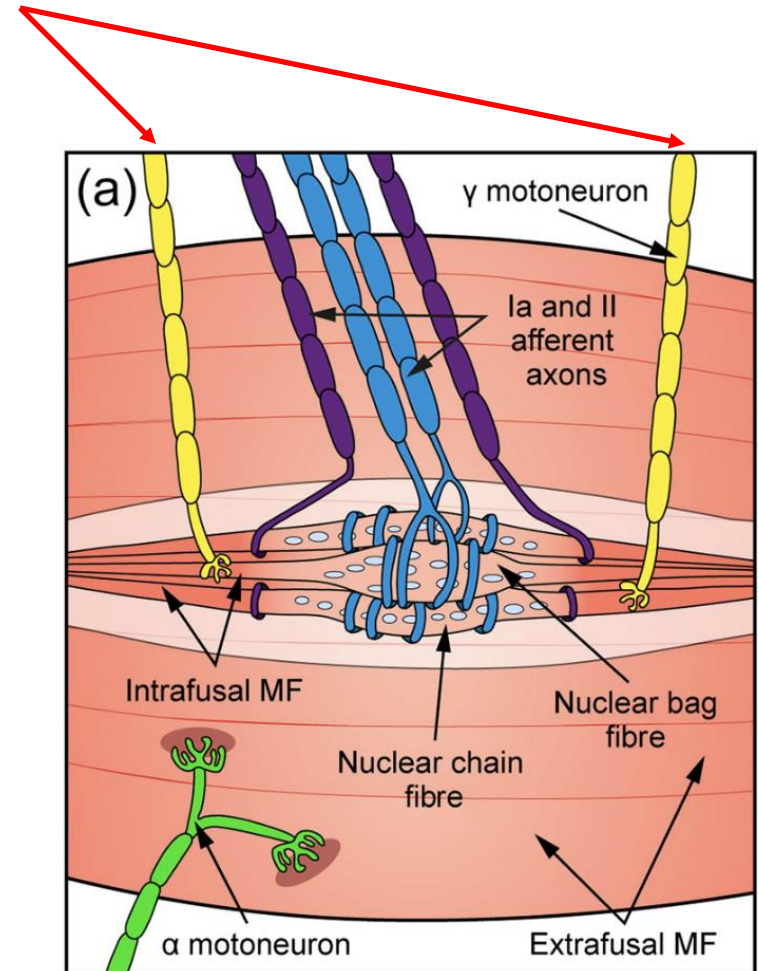


Afférences:

Fibres Ia, stimulées par le degré d'étirement

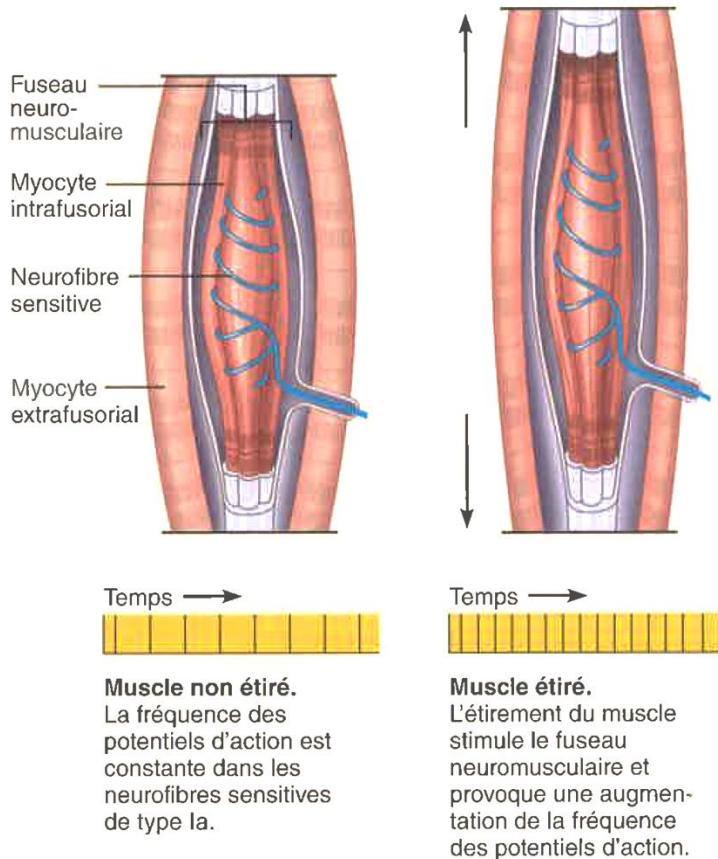
Efférences:

Innervation γ , qui permet la contraction des éléments contractiles du fuseau neuromusculaire



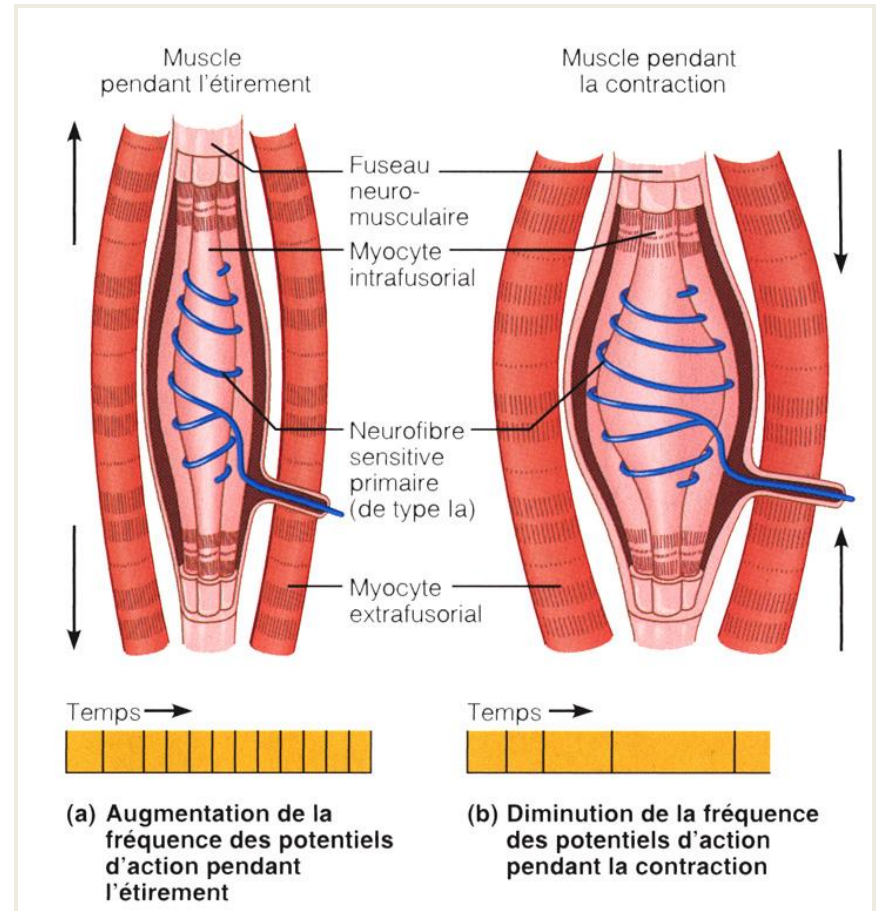
Fonctionnement du fuseau neuromusculaire

(a) Détection d'un muscle étiré



L'étirement du muscle augmente la fréquence de décharge du fuseau neuromusculaire

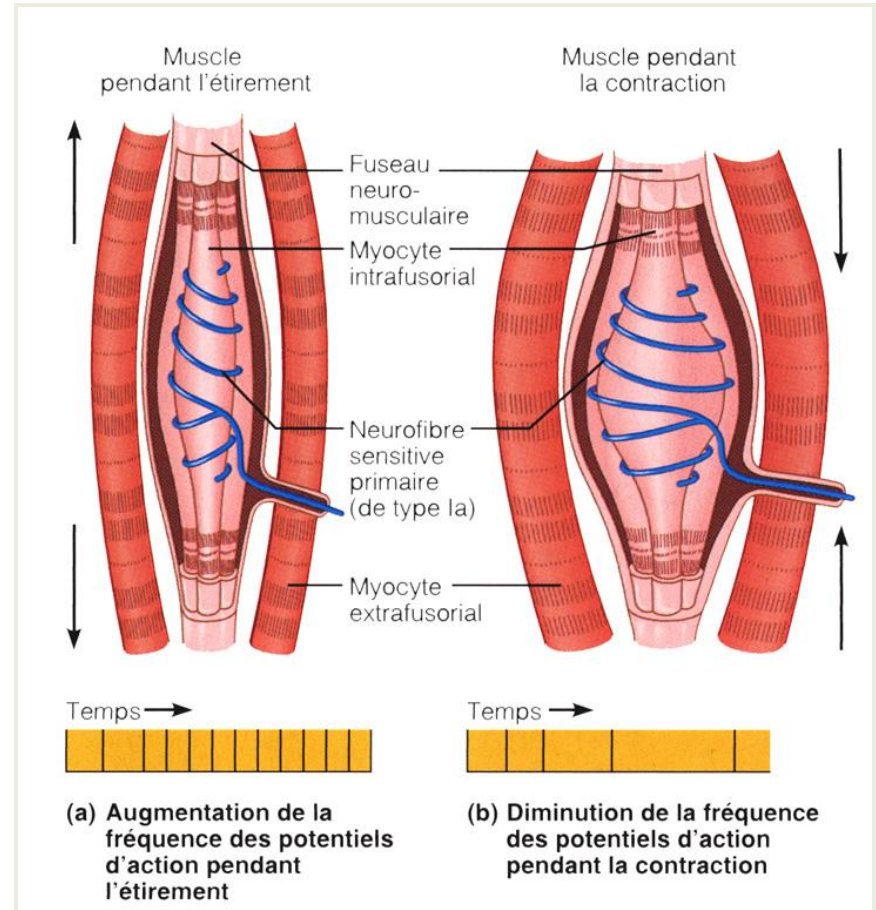
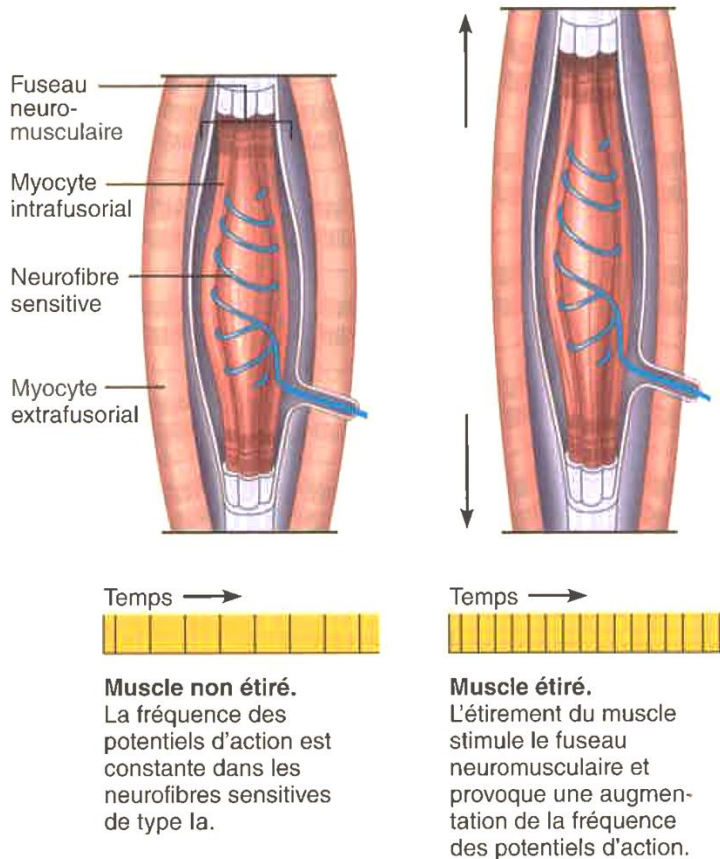
Fonctionnement du fuseau neuromusculaire



L'étirement du muscle augmente la fréquence de décharge du fuseau neuromusculaire
La contraction du muscle diminue la fréquence de décharge du fuseau neuromusculaire

Fonctionnement du fuseau neuromusculaire

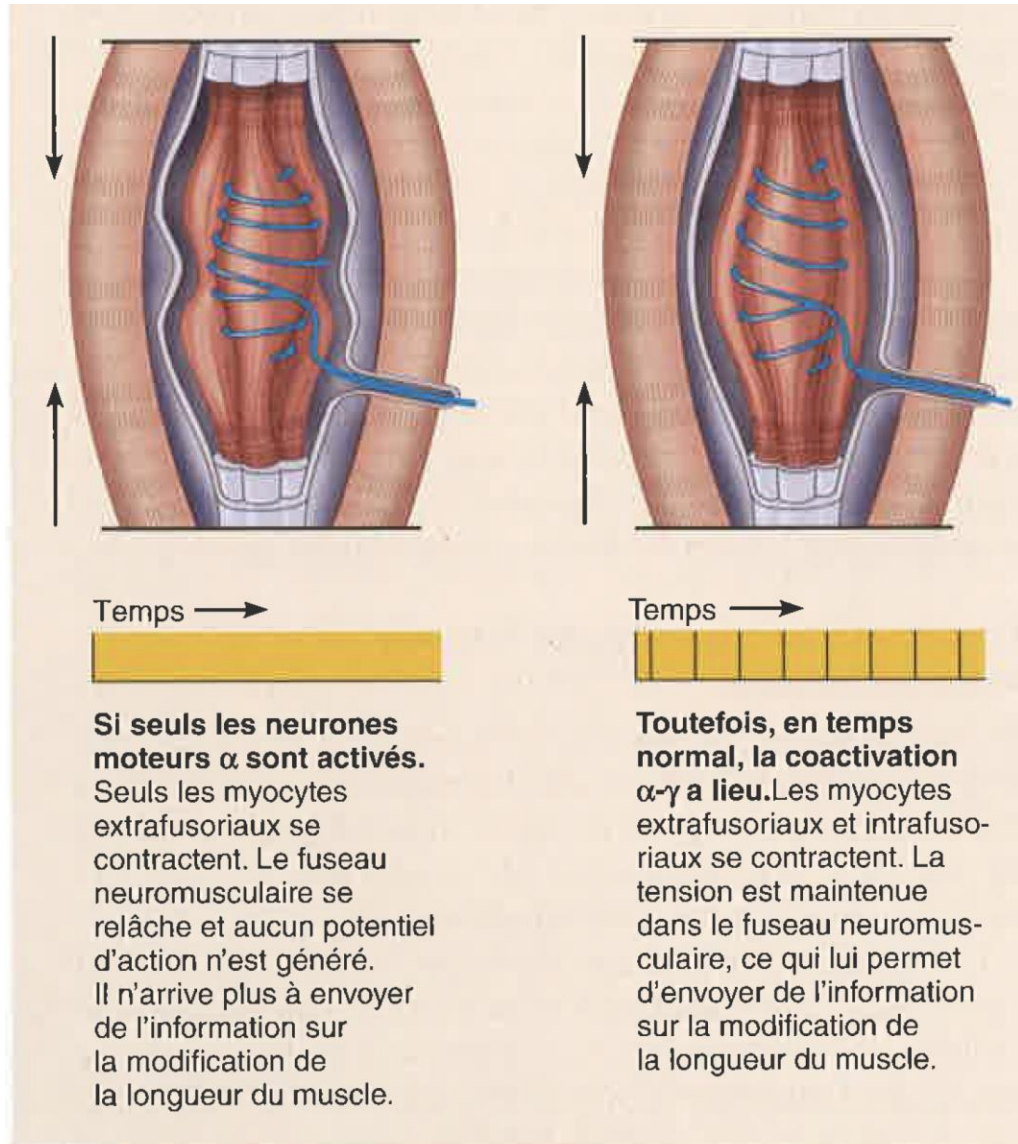
(a) Détection d'un muscle étiré



L'étirement du muscle augmente la fréquence de décharge du fuseau neuromusculaire
La contraction du muscle diminue la fréquence de décharge du fuseau neuromusculaire

Rôle du motoneurone gamma

Sans action du motoneurone gamma



Temps →



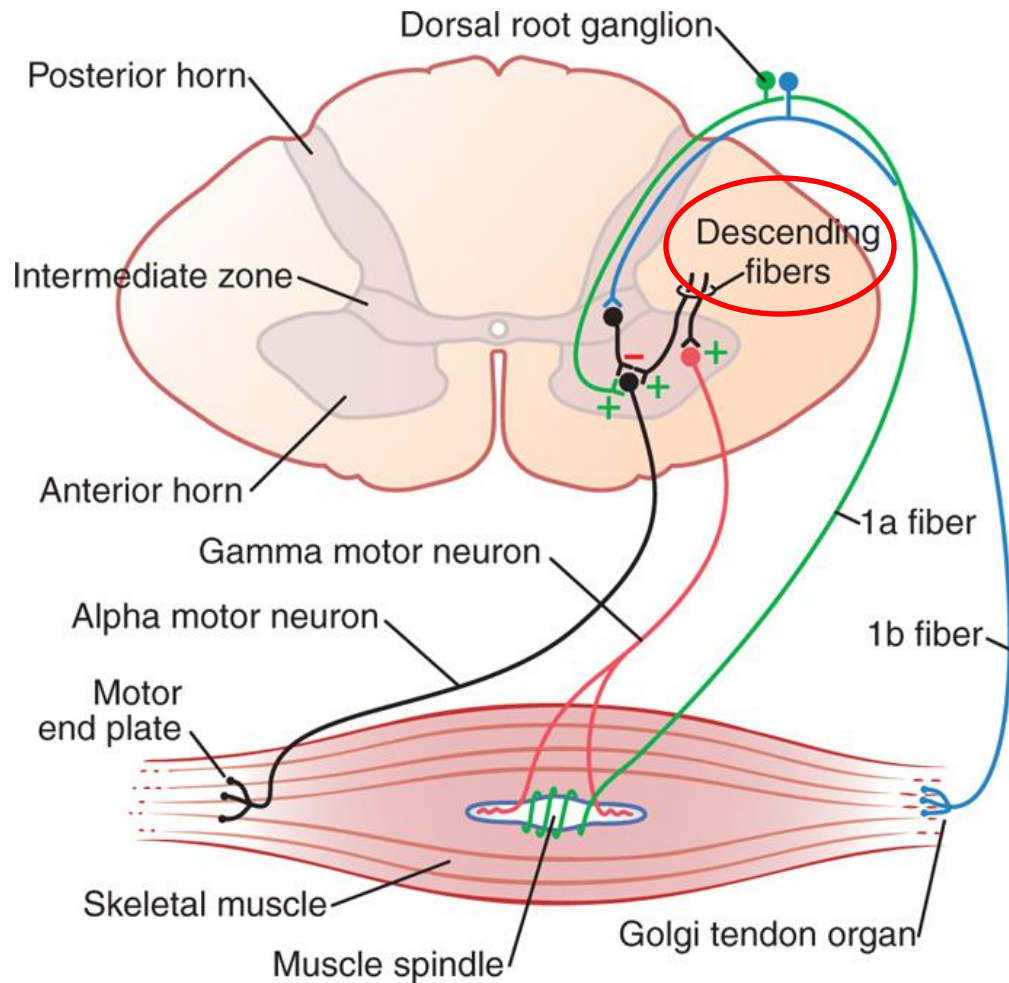
Si seuls les neurones moteurs α sont activés. Seuls les myocytes extrafusoriaux se contractent. Le fuseau neuromusculaire se relâche et aucun potentiel d'action n'est généré. Il n'arrive plus à envoyer de l'information sur la modification de la longueur du muscle.

Temps →

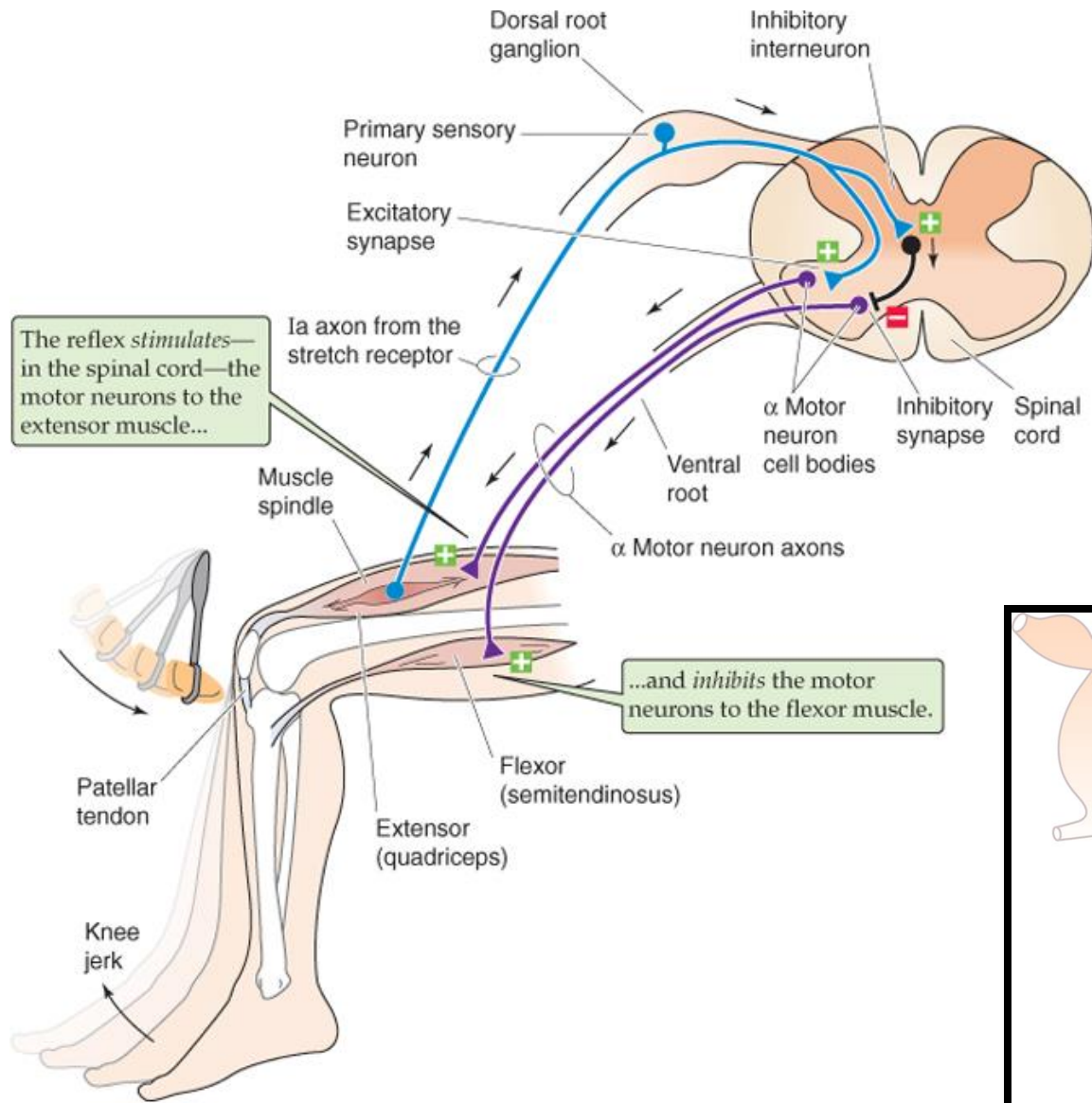


Toutefois, en temps normal, la coactivation α - γ a lieu. Les myocytes extrafusoriaux et intrafusoriaux se contractent. La tension est maintenue dans le fuseau neuromusculaire, ce qui lui permet d'envoyer de l'information sur la modification de la longueur du muscle.

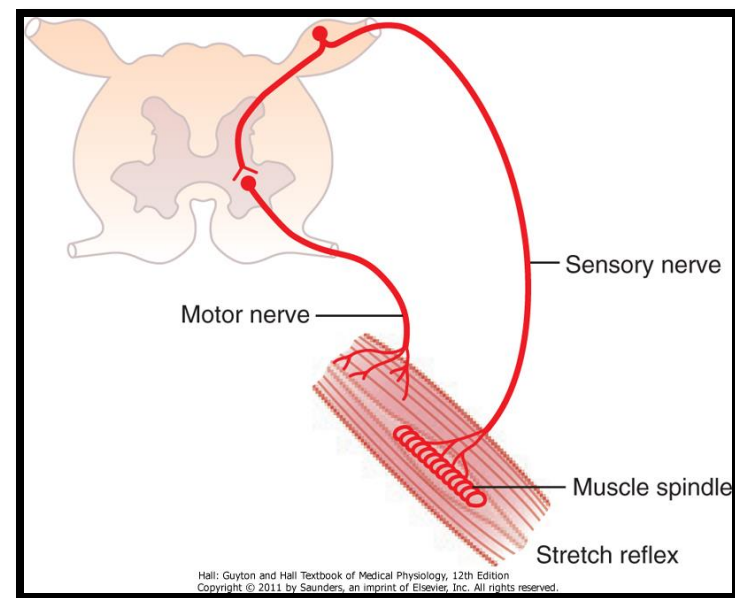
Voies descendantes: Co-stimulation alpha-gamma



Le réflexe d'étirement: reflexe myotatique

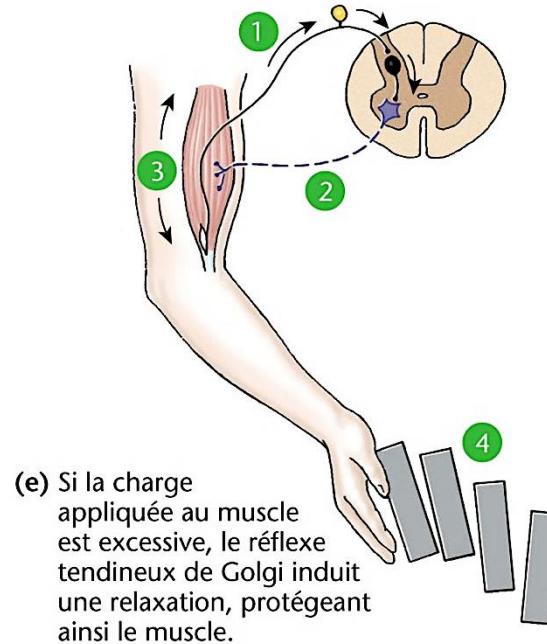
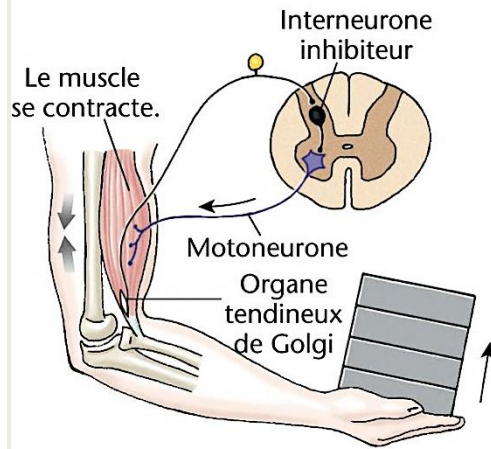


reflexe mono-synaptique !



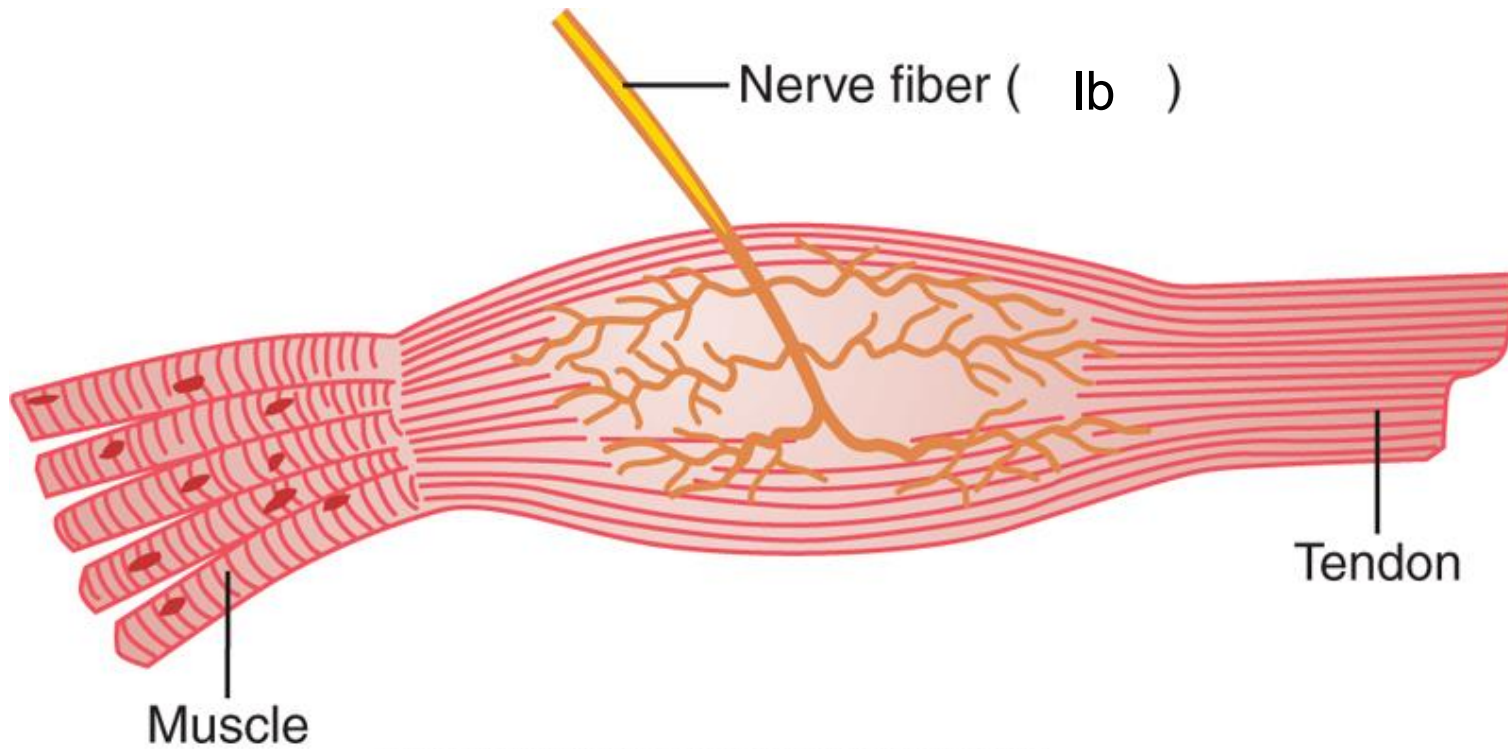
Le réflexe tendineux

Le réflexe tendineux de Golgi protège le muscle d'une charge trop lourde, en induisant sa relaxation et la chute de la charge.



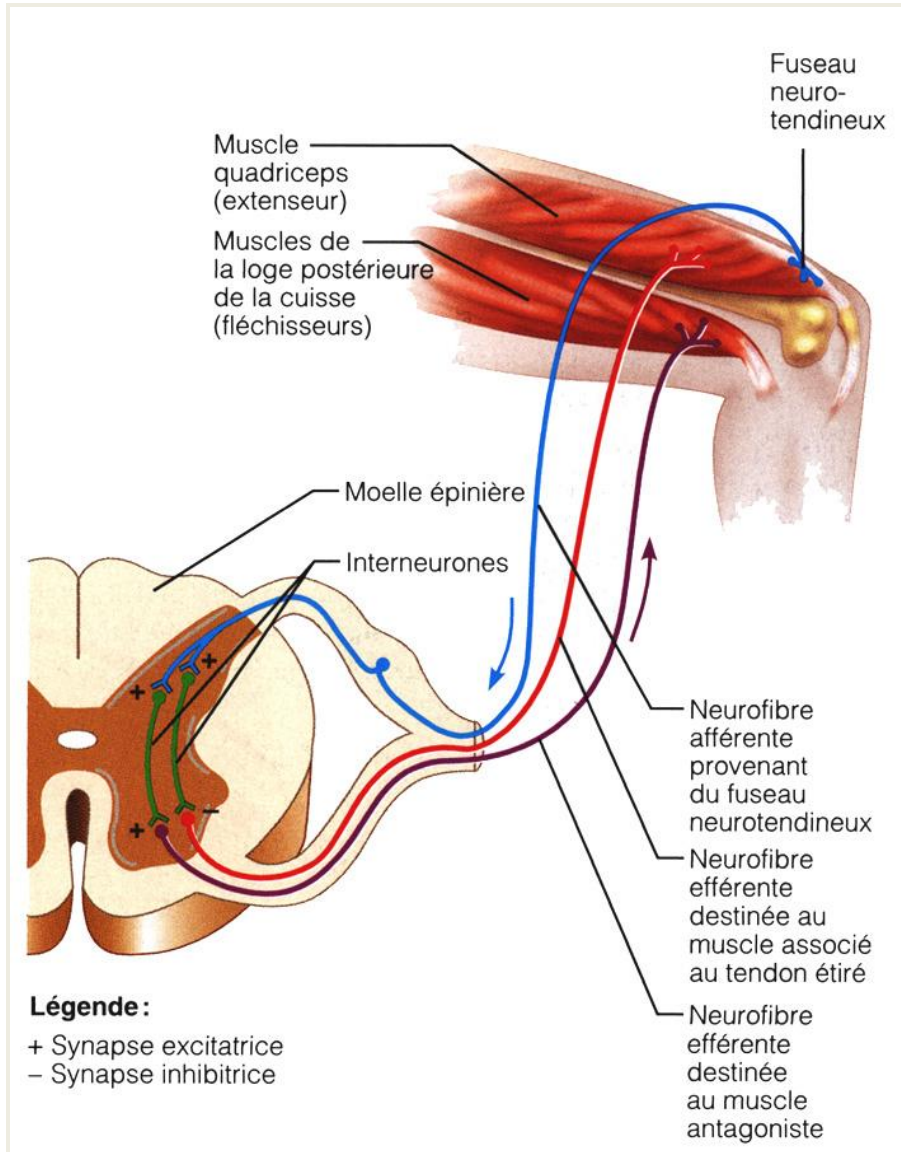
- 1 Le neurone de l'organe tendineux de Golgi est actif.
- 2 Le motoneurone est inhibé.
- 3 Le muscle se relâche.
- 4 La charge tombe.

Appareil tendineux de Golgi



Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

Le réflexe tendineux

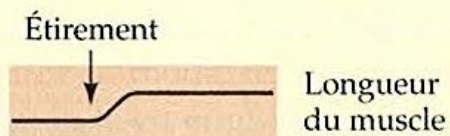
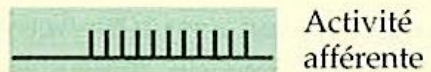
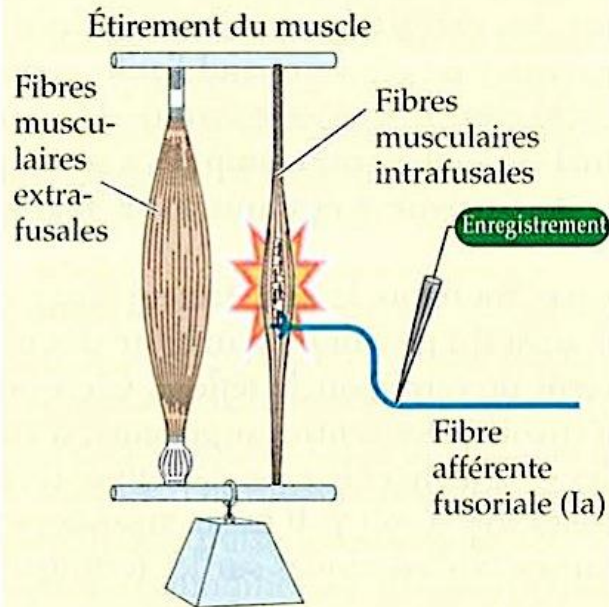


- Terminaisons encapsulées
- Associée à une fibre nerveuse sensitive Ib
- Disposé en série avec le muscle squelettique
- Sensible aux tensions actives du muscle
- Fibres Ib en contact avec des interneurones inhibiteurs

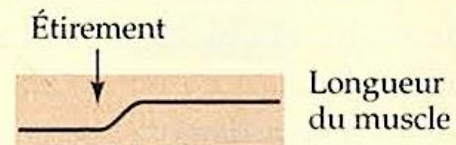
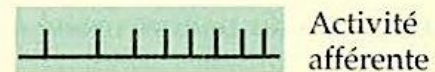
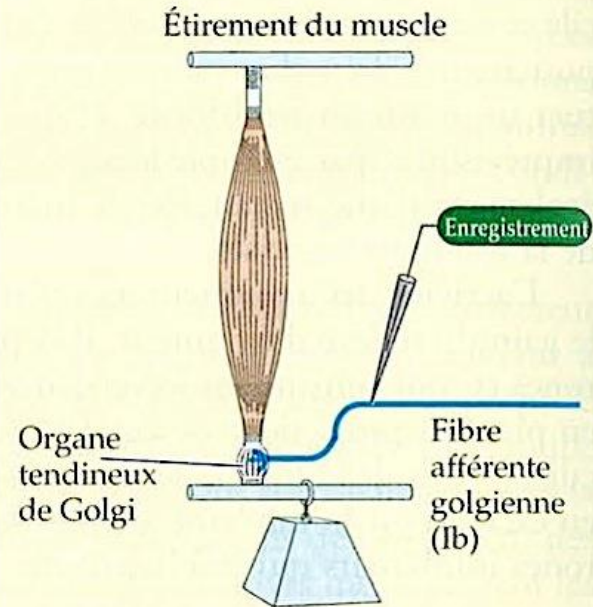
Étirement passif du muscle

(B) ÉTIREMENT PASSIF DU MUSCLE

(1) Fuseaux neuromusculaires



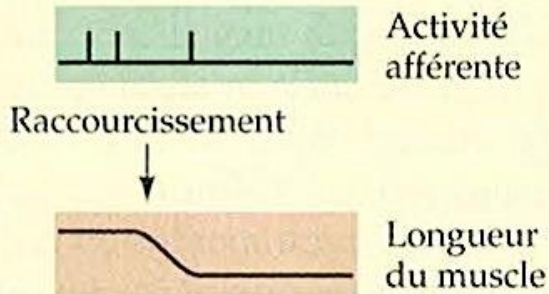
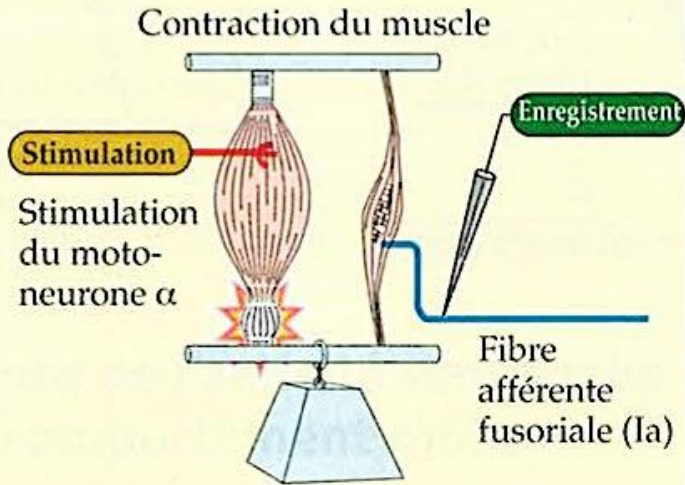
(2) Organes tendineux de Golgi



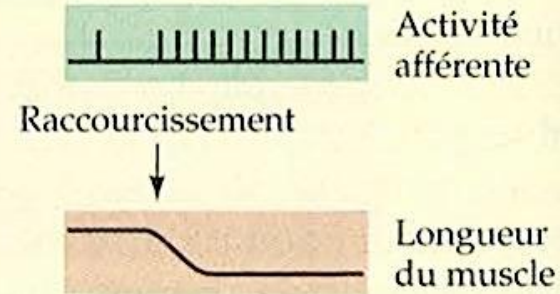
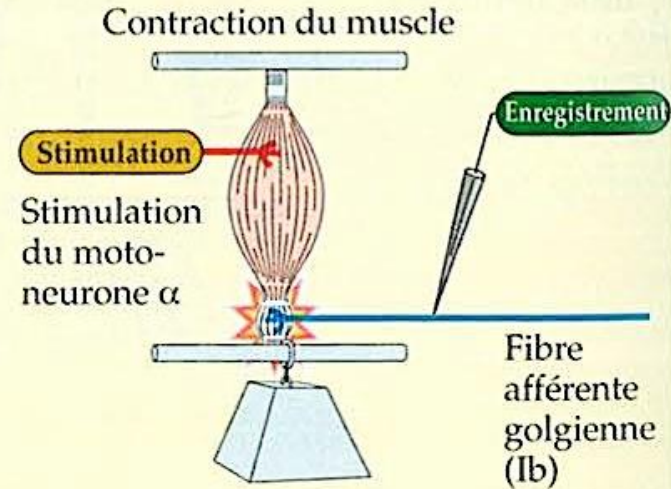
Contraction active du muscle

CONTRACTION ACTIVE DU MUSCLE

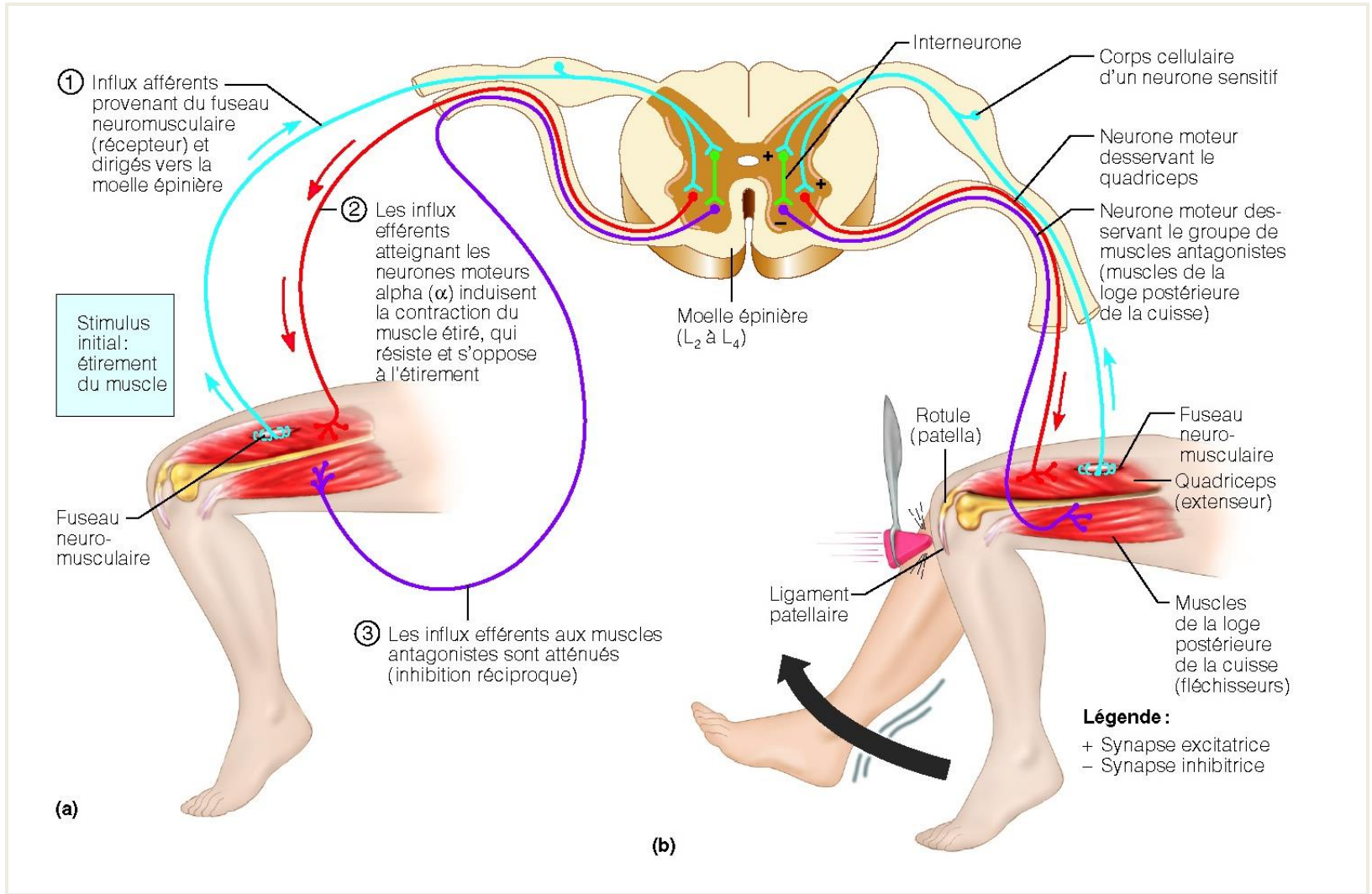
(1) Fuseaux neuromusculaires



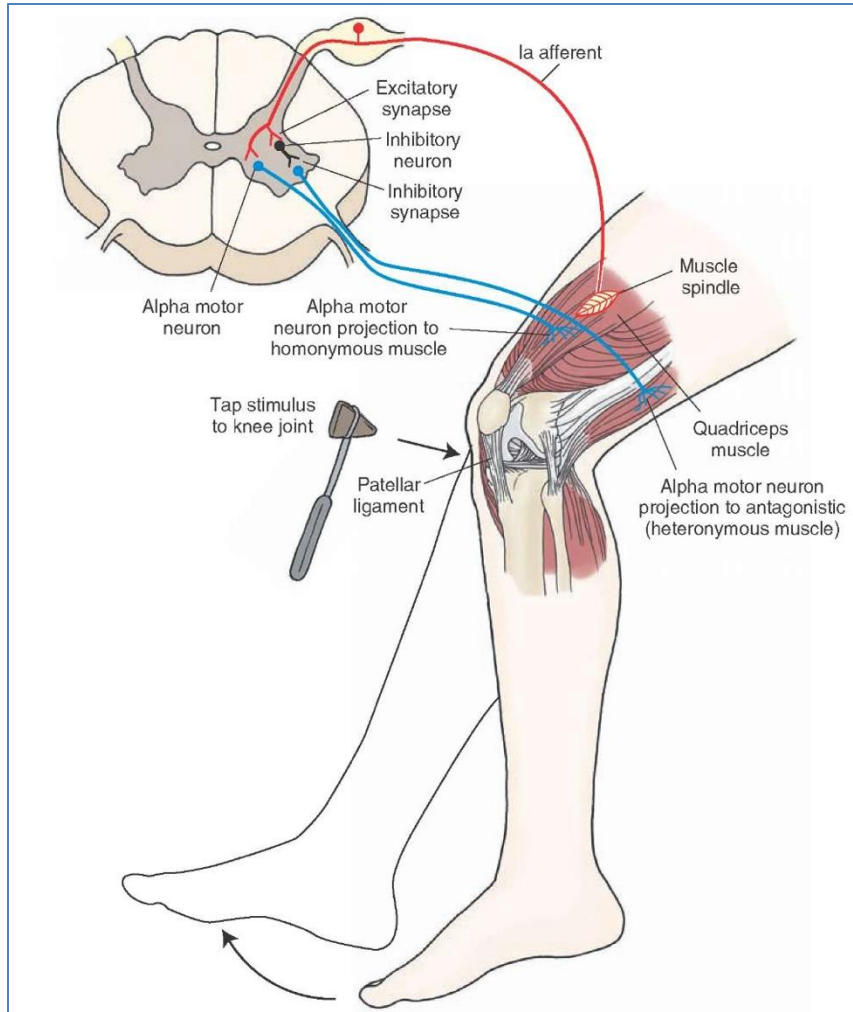
(2) Organes tendineux de Golgi



Le réflexe d'étirement: reflexe mono-synaptique



Reflexe Myotatique



- Muscle squelettique? ✓
- Comment se contracte un muscle squelettique? ✓
- Qu'est-ce qui contrôle la contraction des muscles squelettiques? ✓
- Récepteurs sensoriels capables de détecter le stimulus? ✓
- Fibres nerveuses afférentes? ✓
- Fibres nerveuses efférentes? ✓

Contrôle des connaissances

Expliquer un reflexe

?

Décrire concernant le réflexe myotatique:

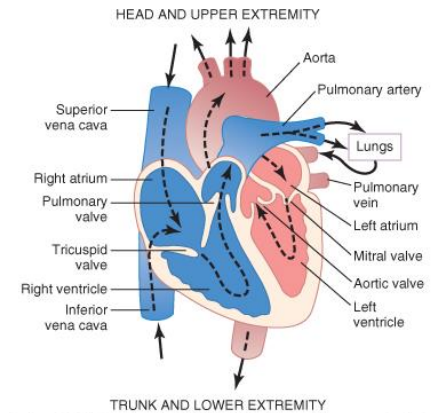
- Fuseau neuromusculaire et son rôle
- Fibre Ia
- Co-stimulation alpha-gamma
- Les événements dans l'ordre
- Interneurone
- Motoneurone alpha

?

Décrire l'appareil tendineux de Golgi et son rôle

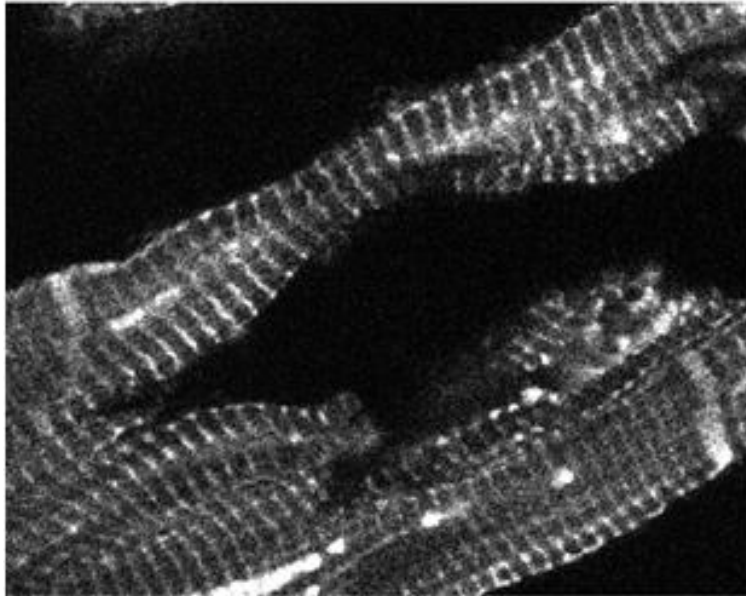
?

Muscle Cardiaque

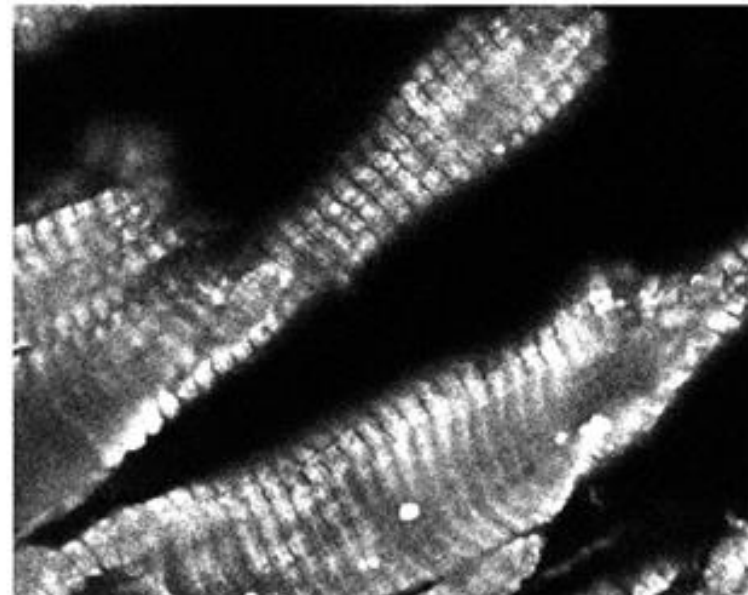


© Elsevier, Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Anti-desmin



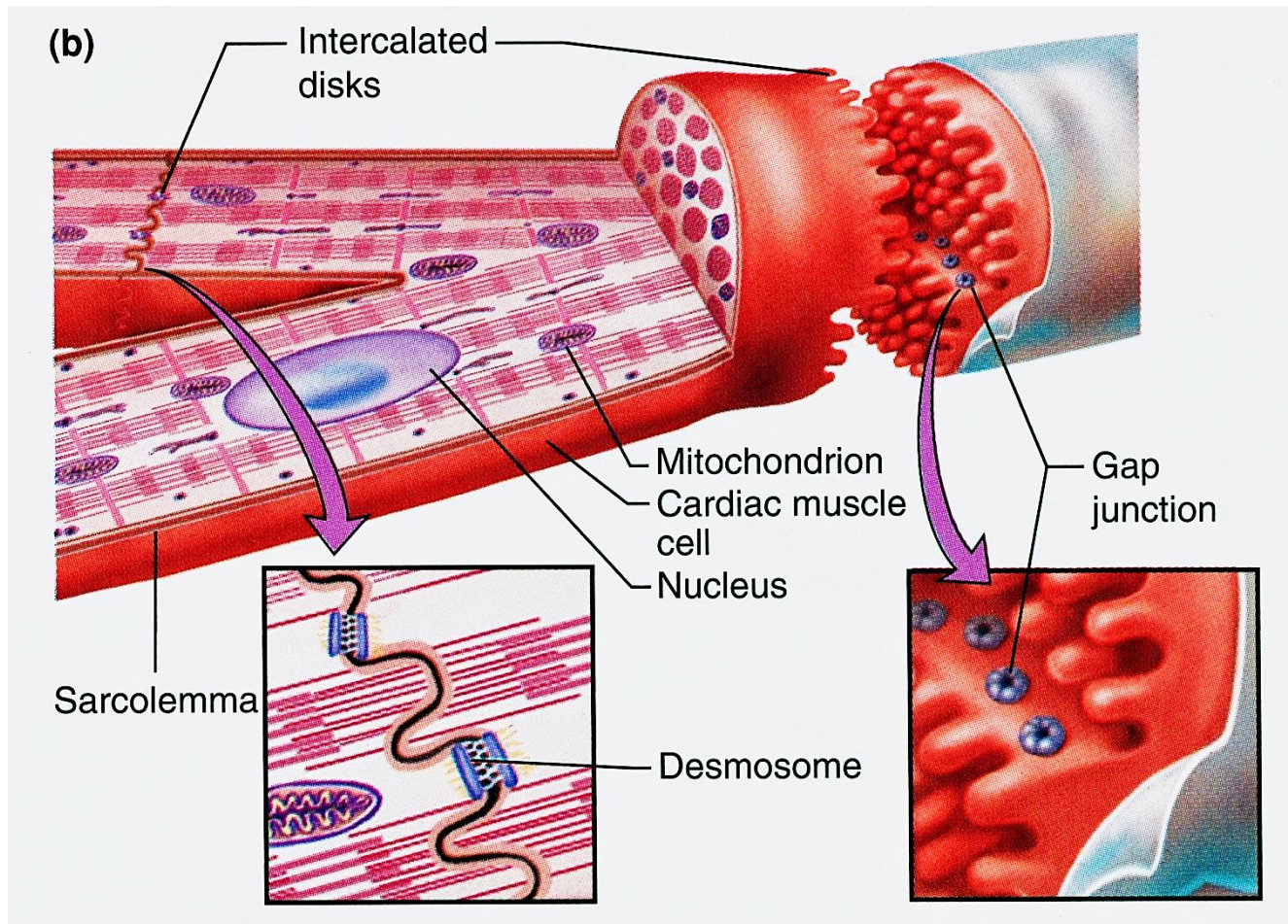
Anti-myosin



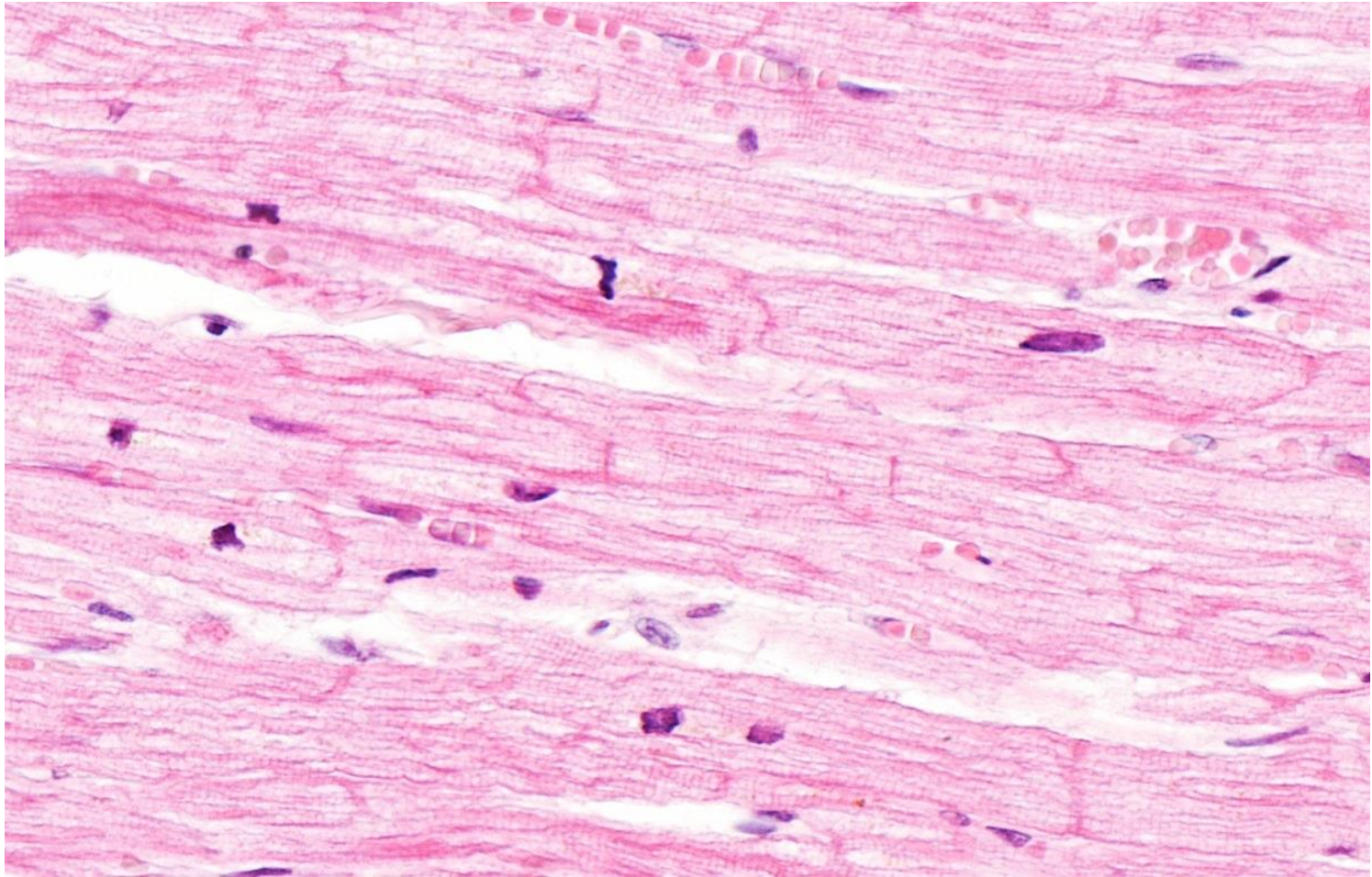
Immunostaining of proteins in human myocardium.

Vandeput F et al. J. Biol. Chem. 2007;282:32749-32757

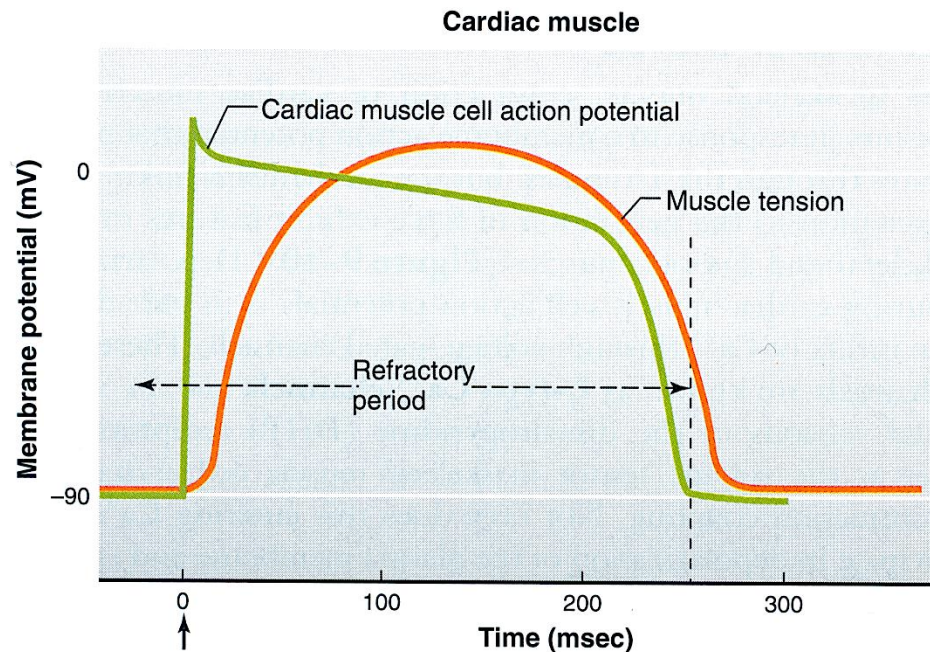
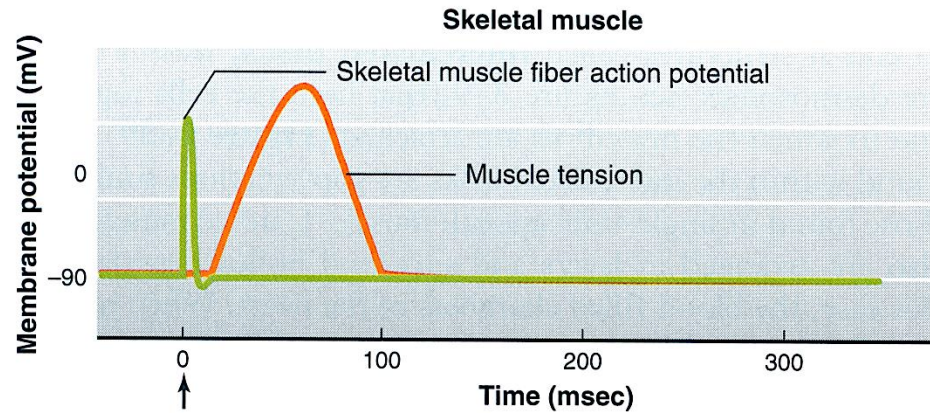
Cellule Cardiaque



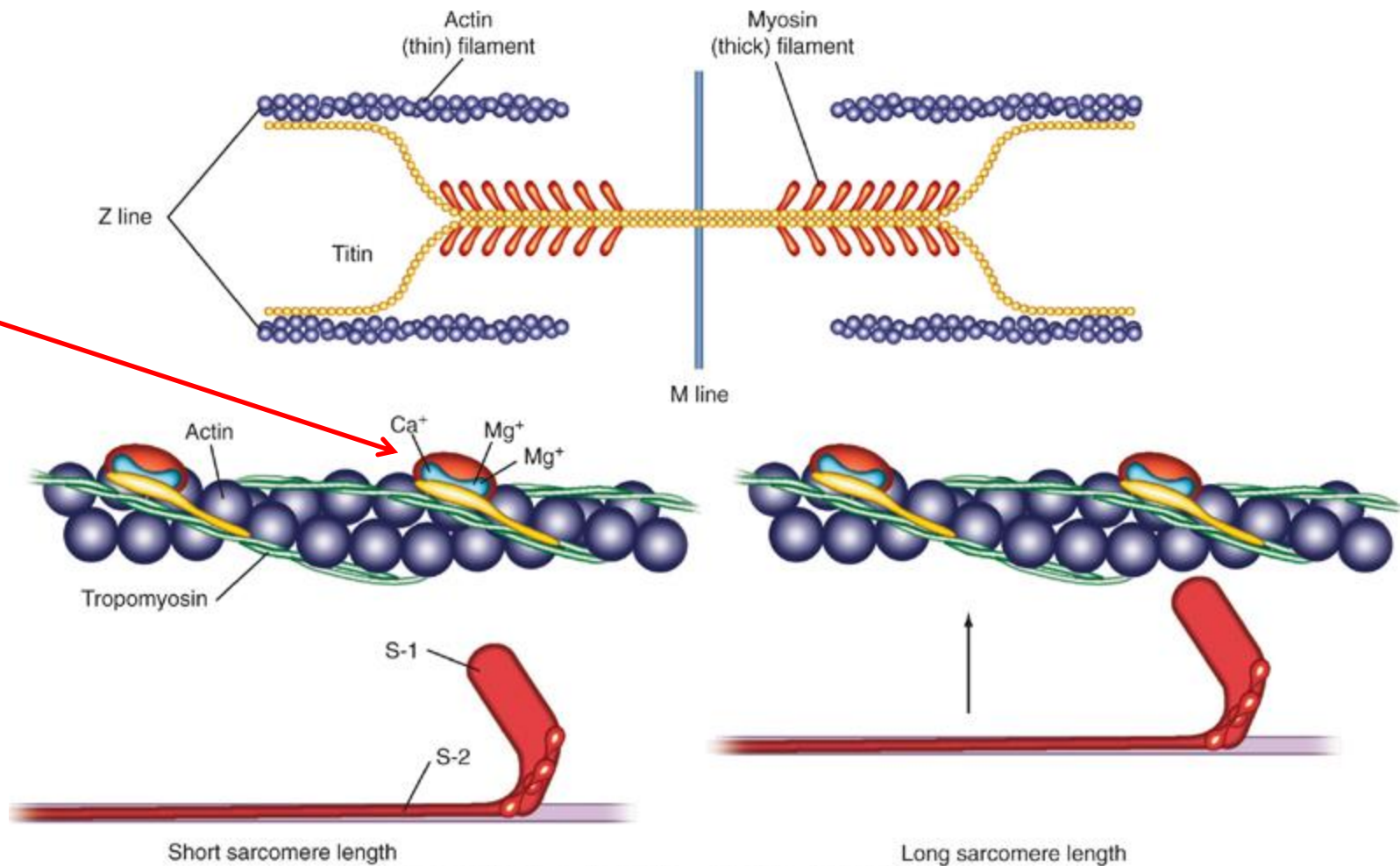
Muscle Cardiaque



Période réfractaire

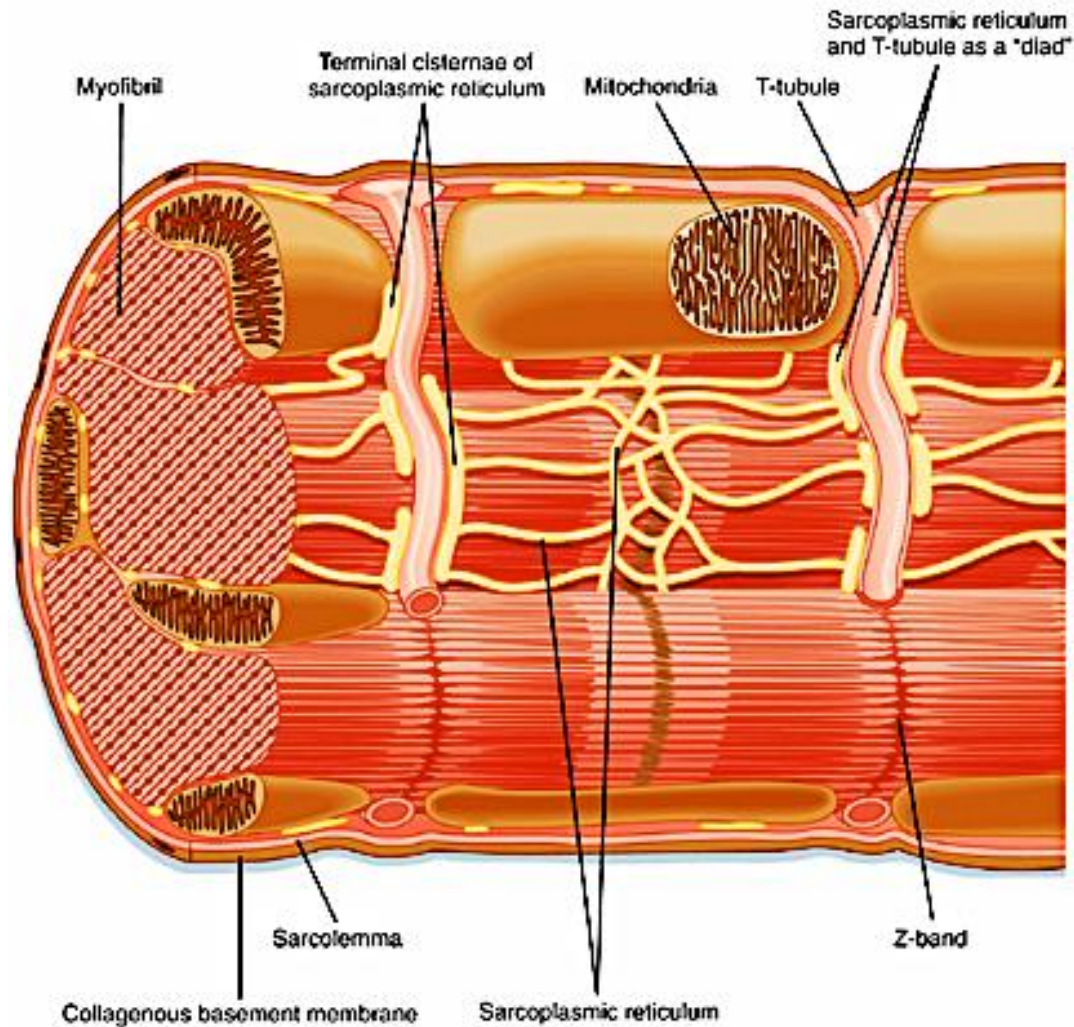


Troponin



Koeppen and Stanton: Berne & Levy Physiology, 6th Edition.
Copyright © 2010 by Mosby, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

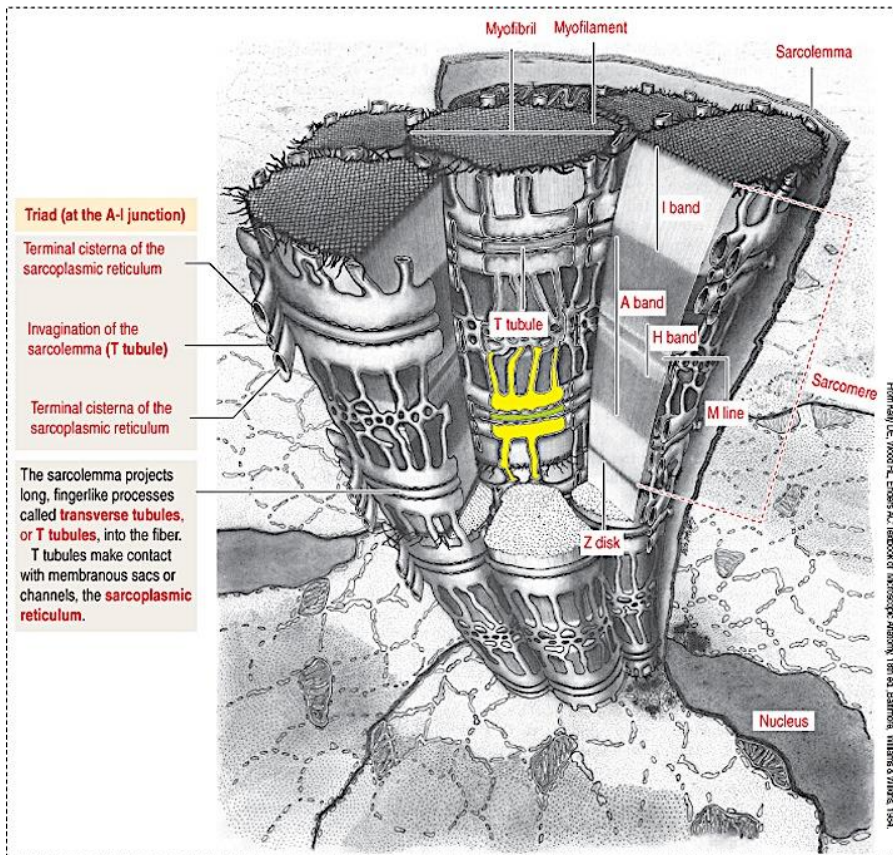
Représentation schématique des tubules T dans les cellules cardiaques



Triade/Diade

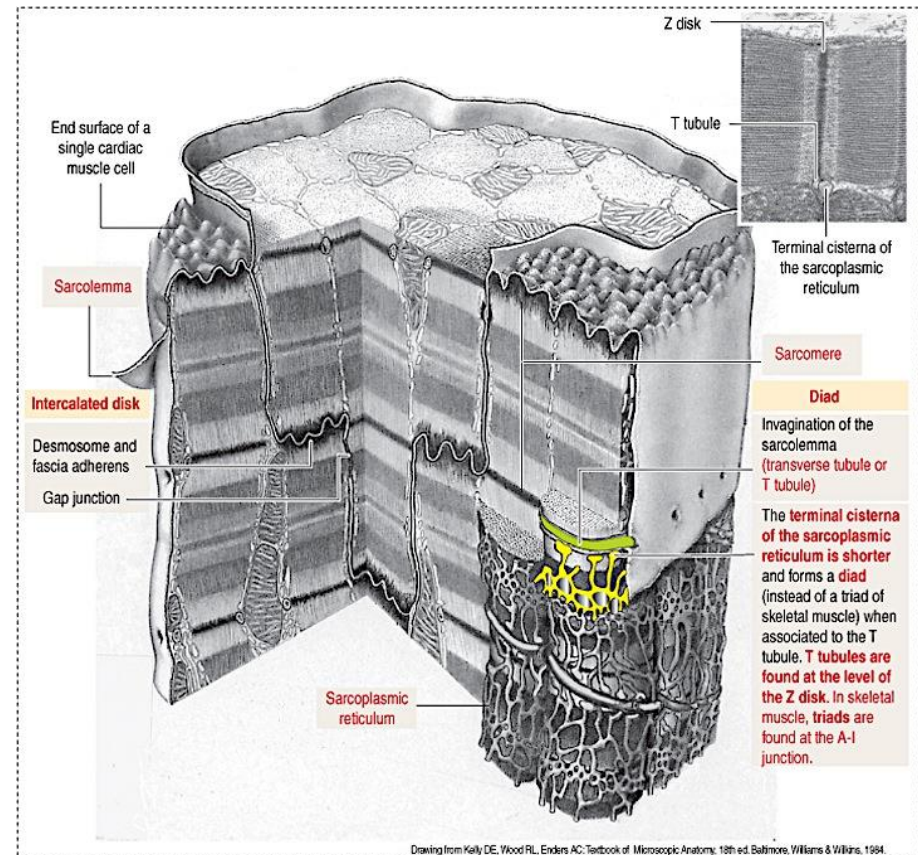
Muscle squelettique: Triade

Tubules T se situent à la jonction des bandes A-I

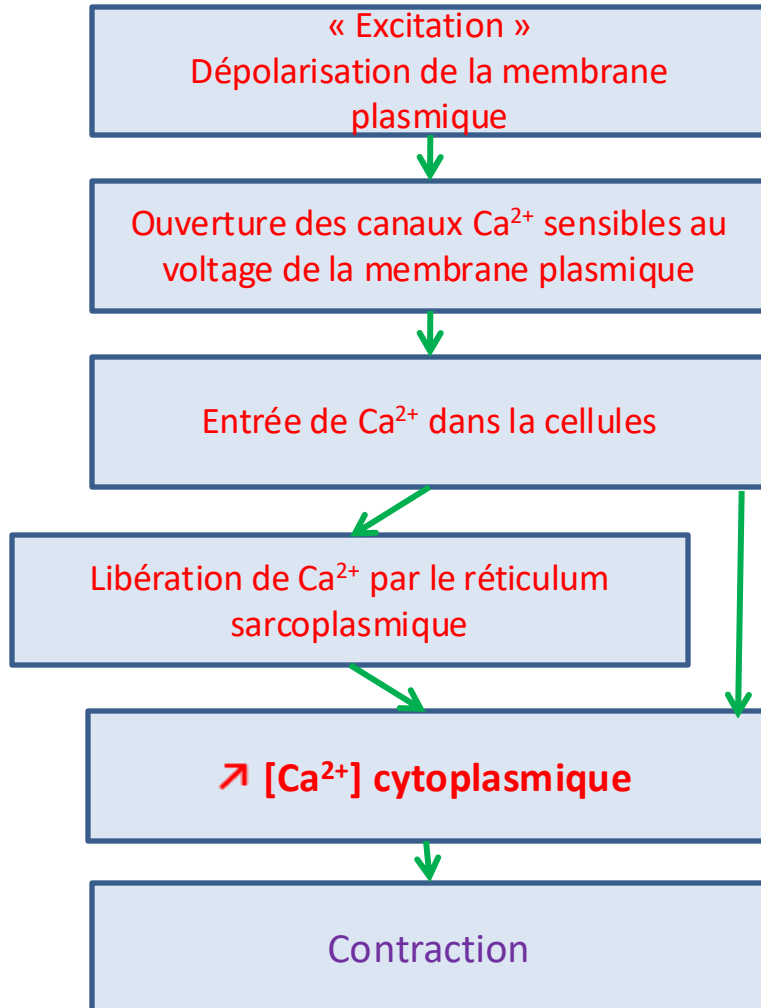


Muscle cardiaque: Diade

Tubules T se situent au niveau du disque Z



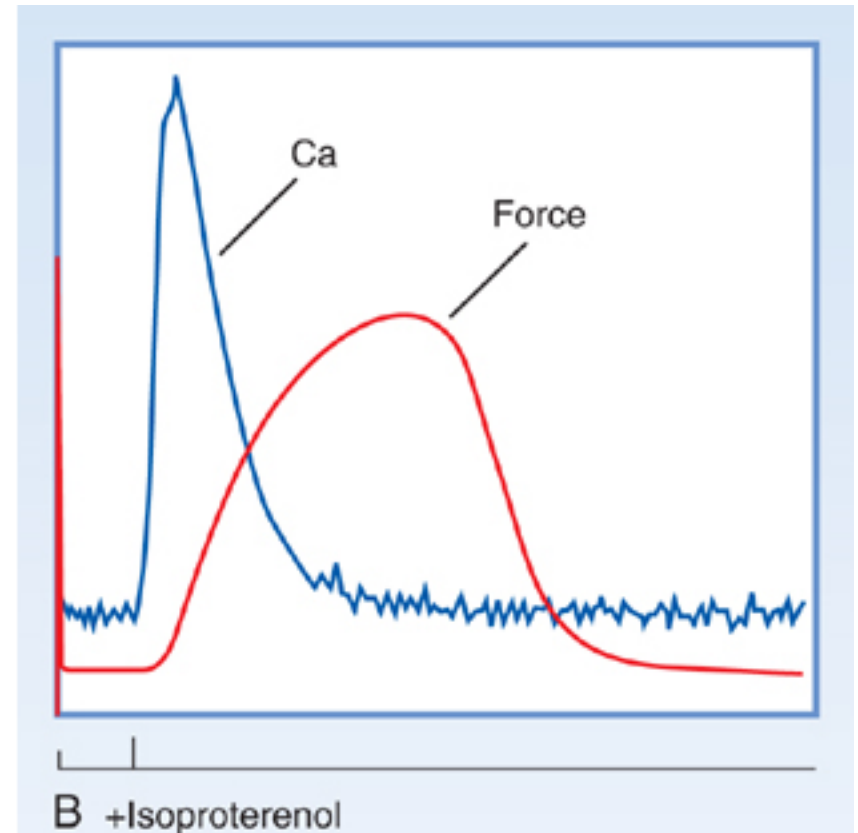
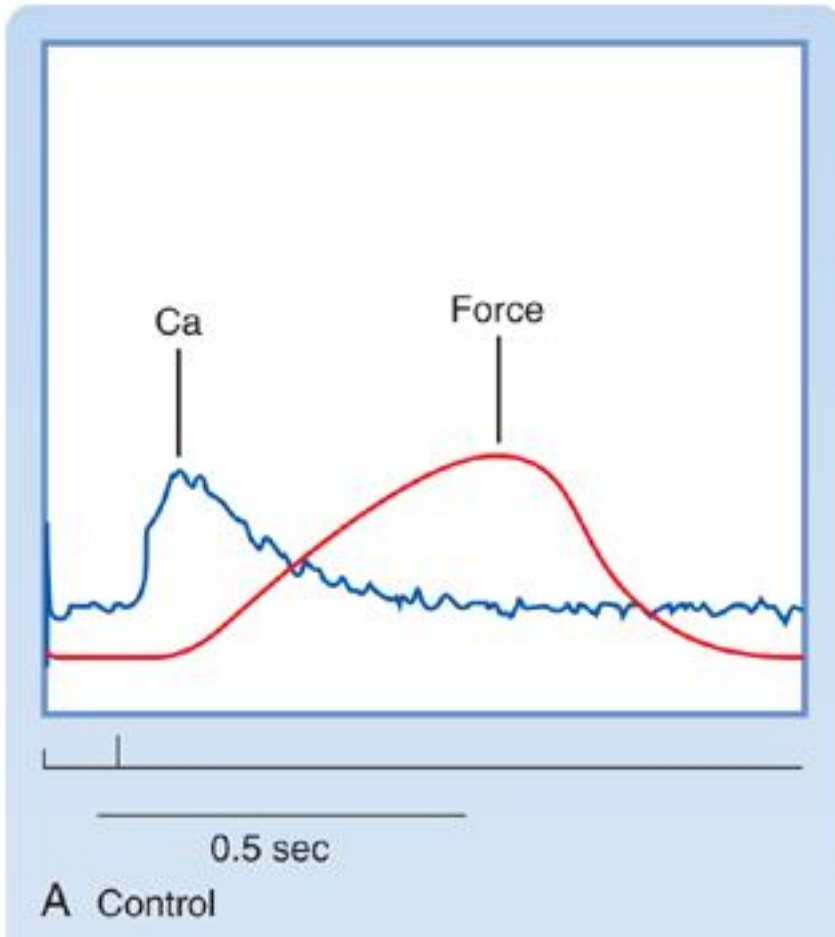
Couplage Excitation-Contraction dans le muscle cardiaque



L'entrée de calcium (influx) dans les cardiomyocytes contribue à la contraction.

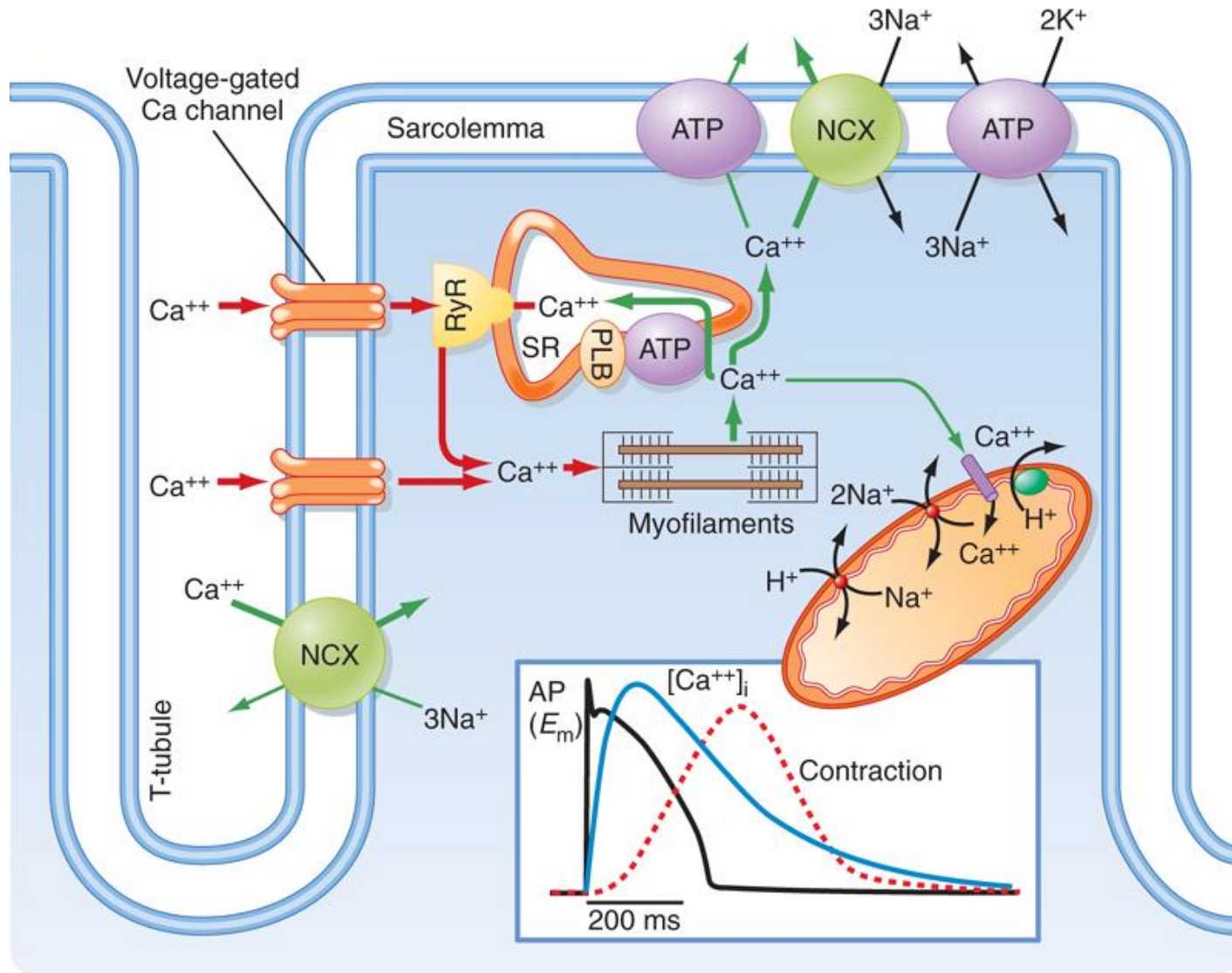
Cet influx peut être modulé dans les cardiomyocytes!

Muscle cardiaque: Calcium-trigger



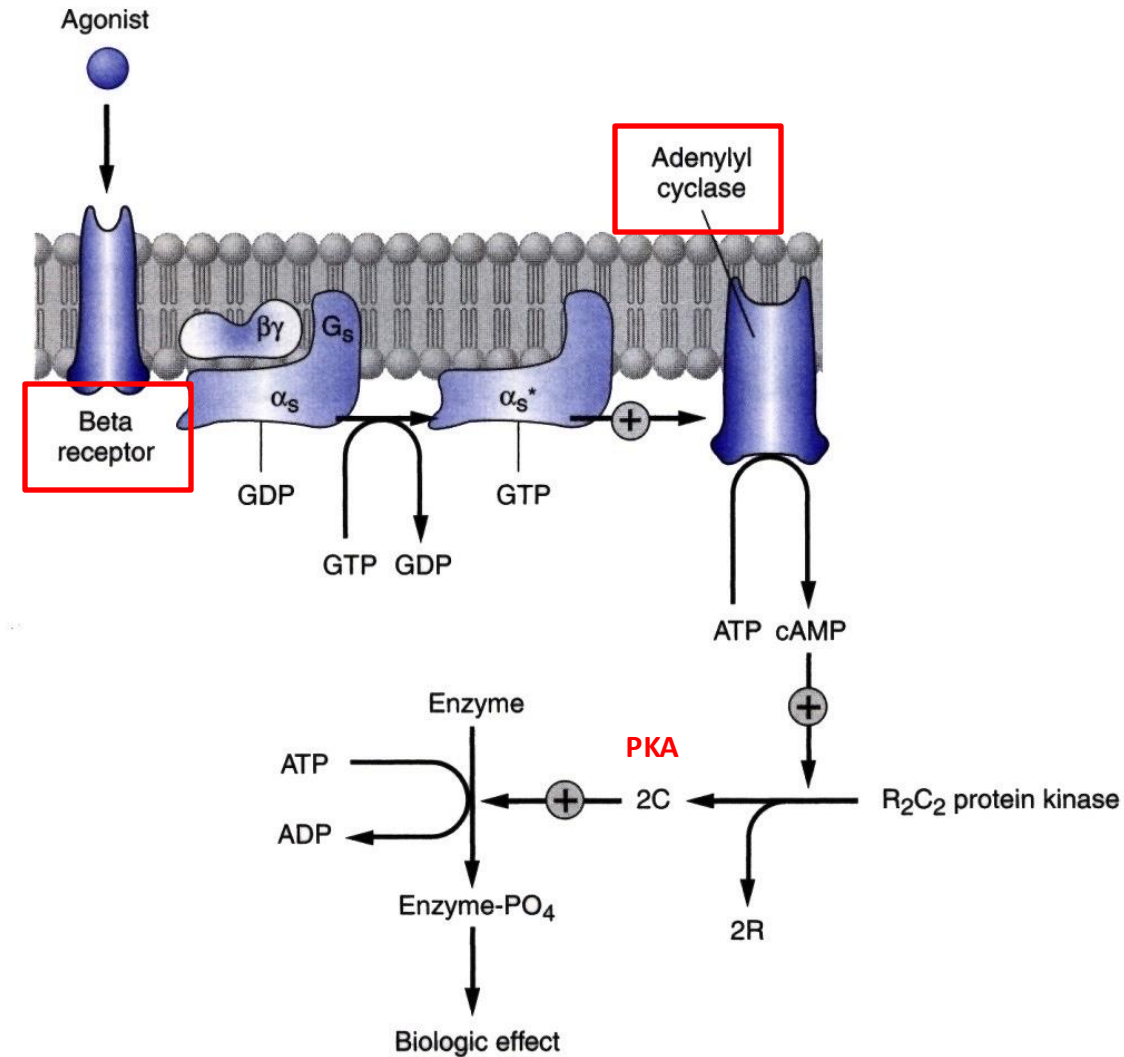
Isoproterenol: Agoniste beta-adrénergique

Muscle cardiaque: Calcium-trigger

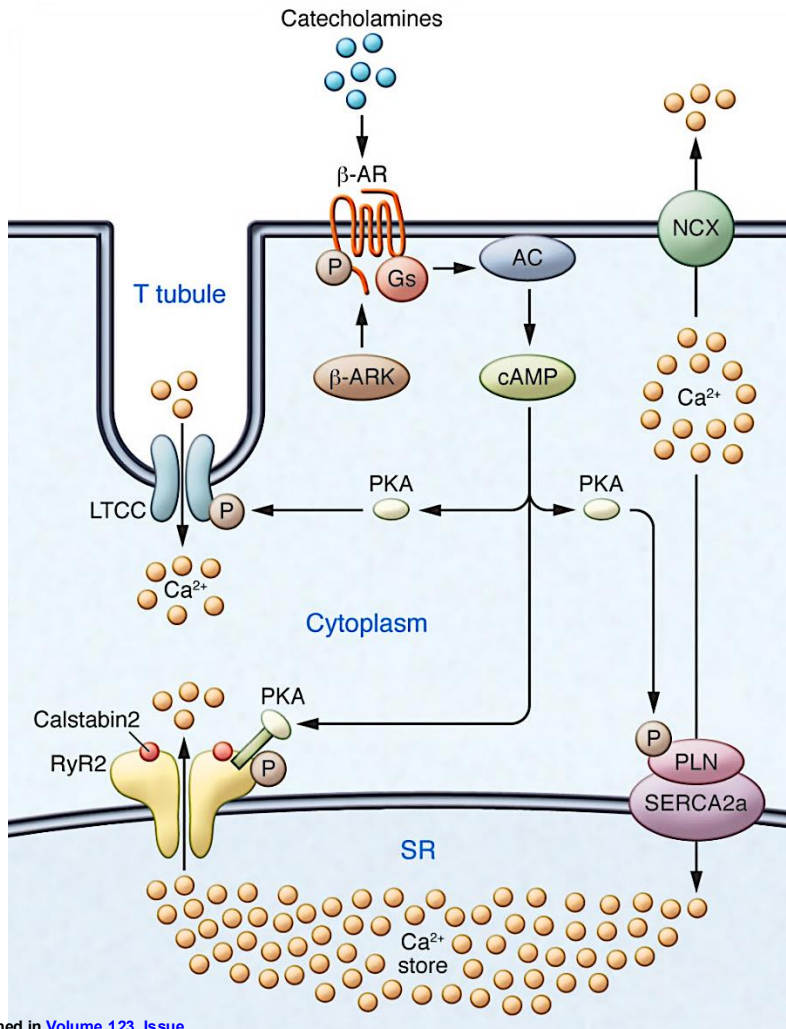


Agonistes β 1-adrénergiques

Adrénaline
Noradrénaline



Agonistes β 1-adrénergiques

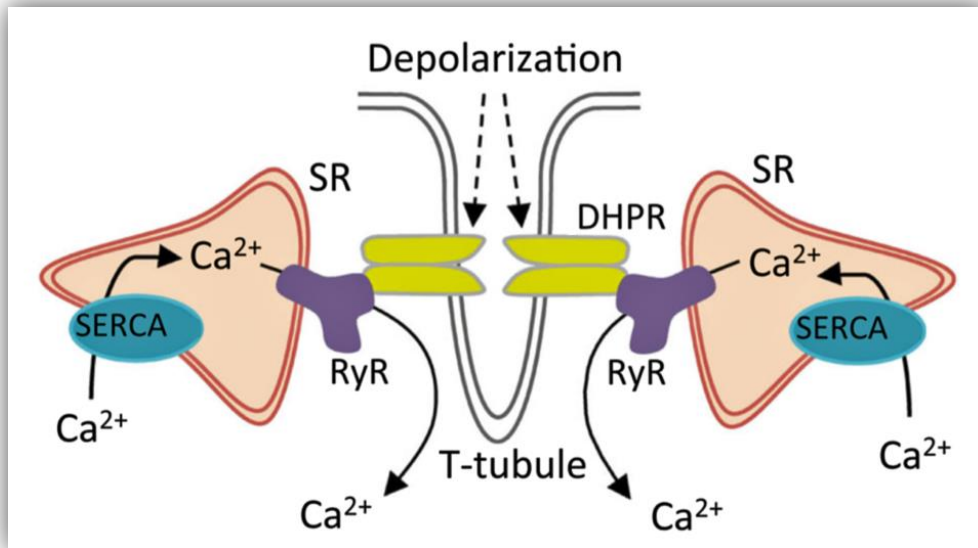


- Effets sur le cœur de la stimulation β 1-adrénergique:

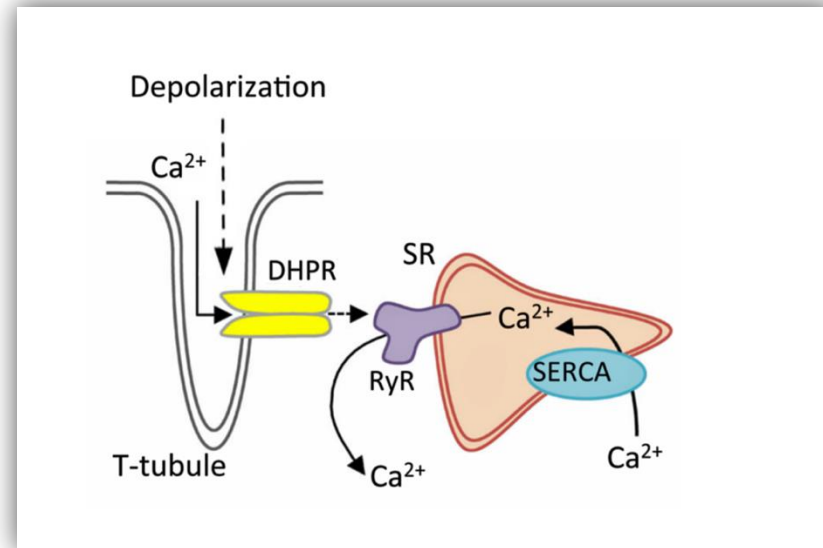
- ↗ adénylate cyclase
- ↗ AMPc
- ↗ Activités des protéines kinases dépendantes de l'AMPc (Protéine kinase A = PKA)
- ↗ **Phosphorylations**
- ↗ **de Ca^{2+} cytoplasmique**
- ↗ contraction

Muscle Squelettique/ Muscle Cardiaque

Muscle Squelettique



Muscle Cardiaque



Gradation de la force de contraction:
Somation spatiale
Somation temporelle

Gradation de la force de contraction
par la modulation du calcium
cytoplasmique

Contrôle des connaissances

Couplage excitation contraction cardiaque

?

Décrire le rôle du calcium dans la contraction des cardiomyocytes

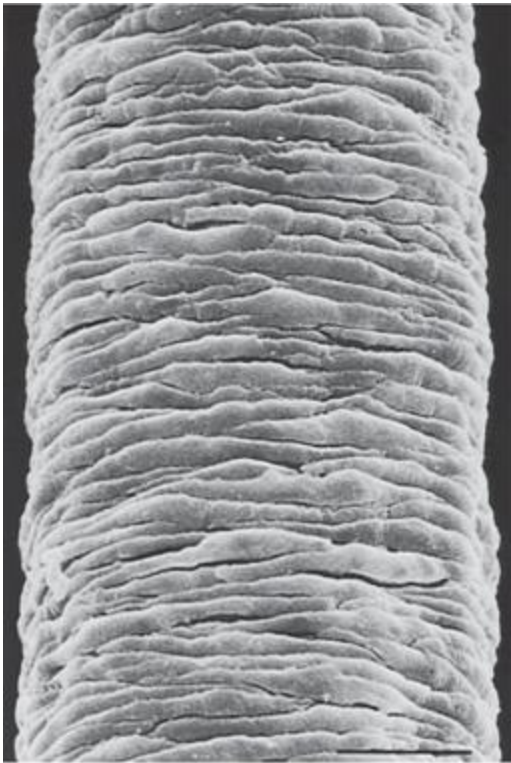
?

Origine du calcium et sa modulation.
Différences avec le muscle squelettique

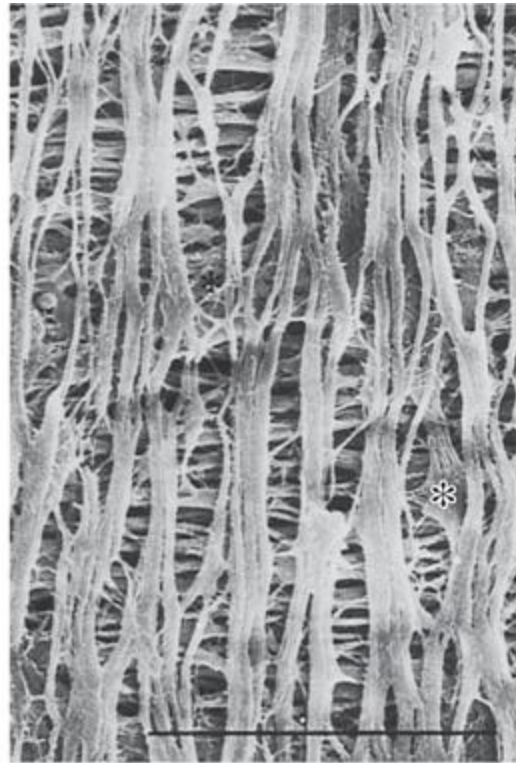
Effet des agonistes adrénergiques dans la contraction des cardiomyocytes

?

Muscle Lisse



A



B



C

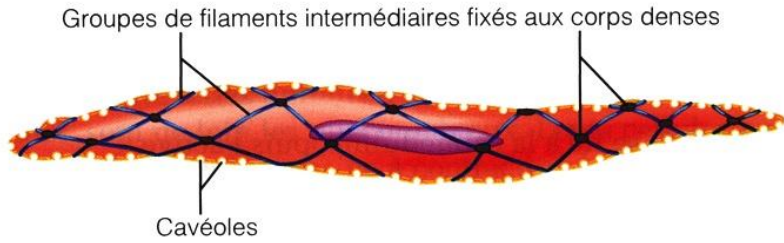
Koeppen and Stanton: Berne & Levy Physiology, 6th Edition.
Copyright © 2010 by Mosby, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

Le muscle lisse

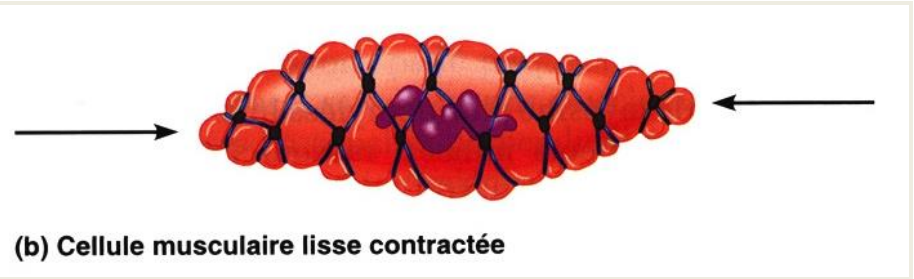
Vaisseaux sanguins, système respiratoire, tube digestif, système urinaire, système génital, œil.

Cellule musculaire lisse:

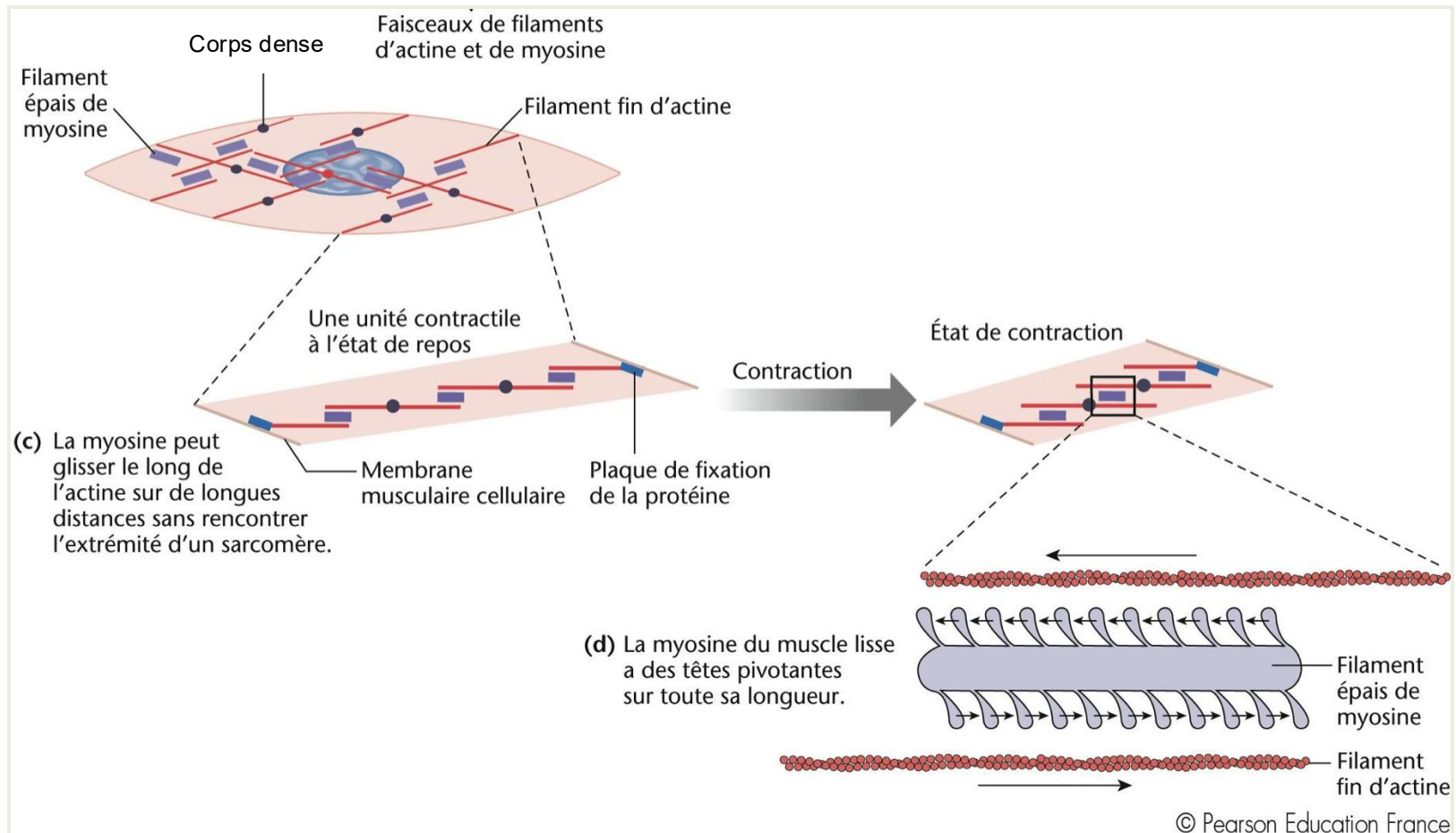
- Ne possède qu'un noyau en son centre
- Est beaucoup plus petite que la cellule musculaire squelettique
- Est innervée par le système nerveux autonome
- Présence de jonctions neuromusculaires diffuses
- Pas de sarcomères
- Pas de tubules transverses
- Filaments d'actine et de myosine
- Pas de troponine mais de la calmoduline



(a) Cellule musculaire lisse détendue



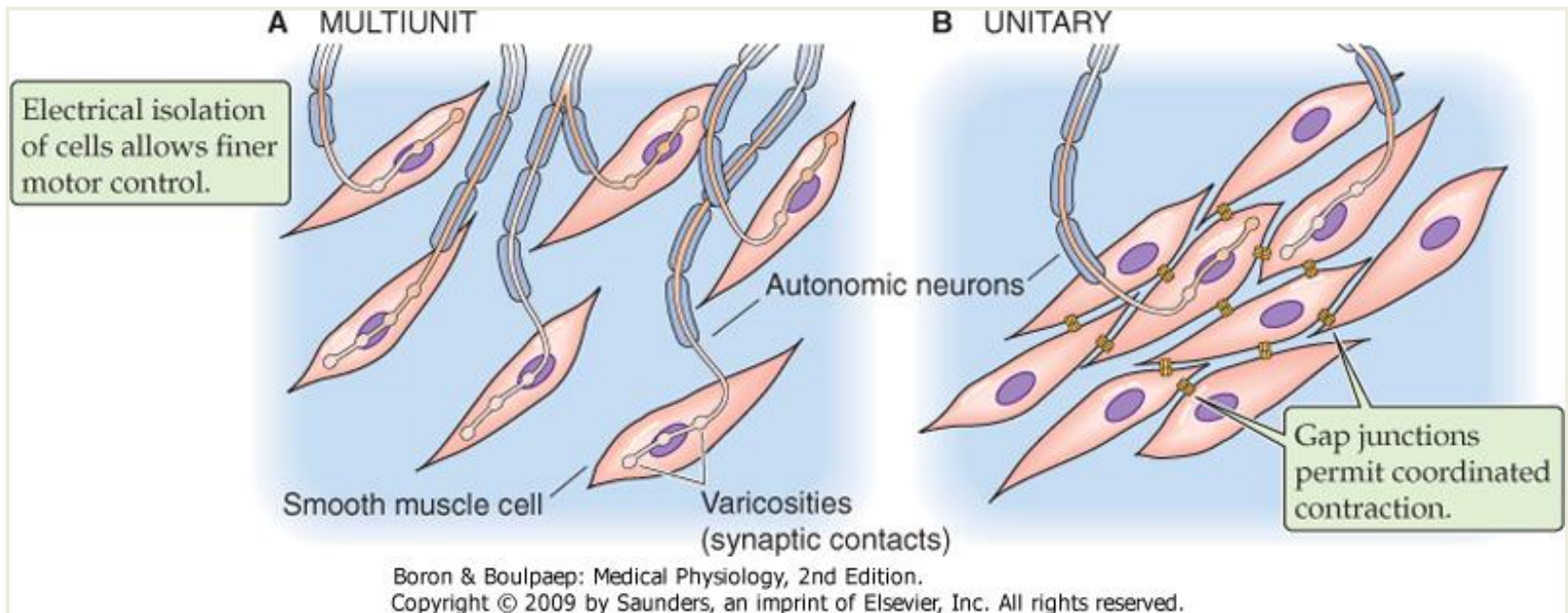
(b) Cellule musculaire lisse contractée



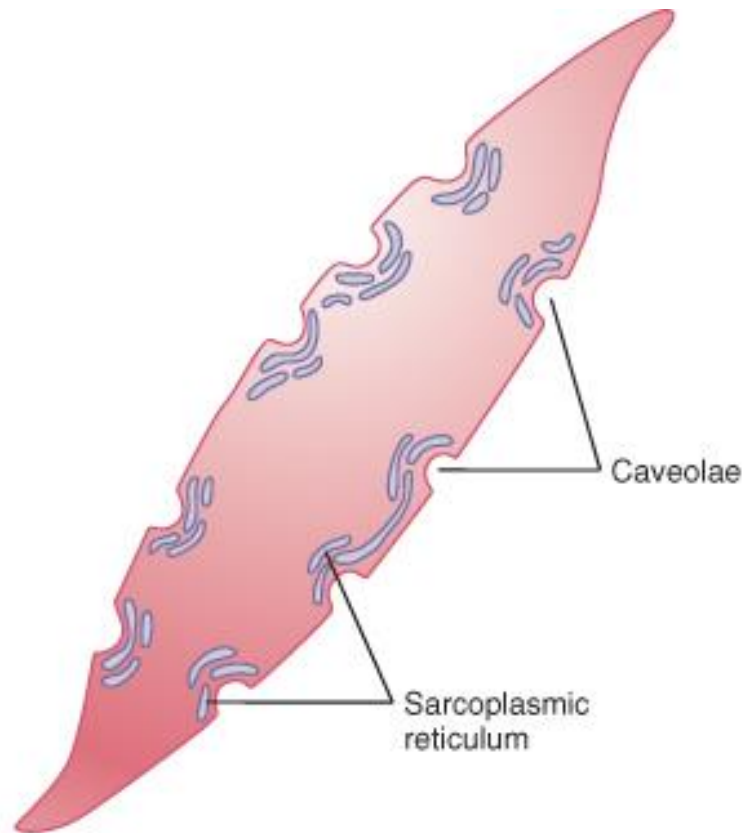
2 types de muscles:

Muscles lisses unitaires: les plus nombreux. Les cellules sont couplées électriquement par des jonctions communicantes (gap). Toutes les cellules ne reçoivent pas d'innervation.

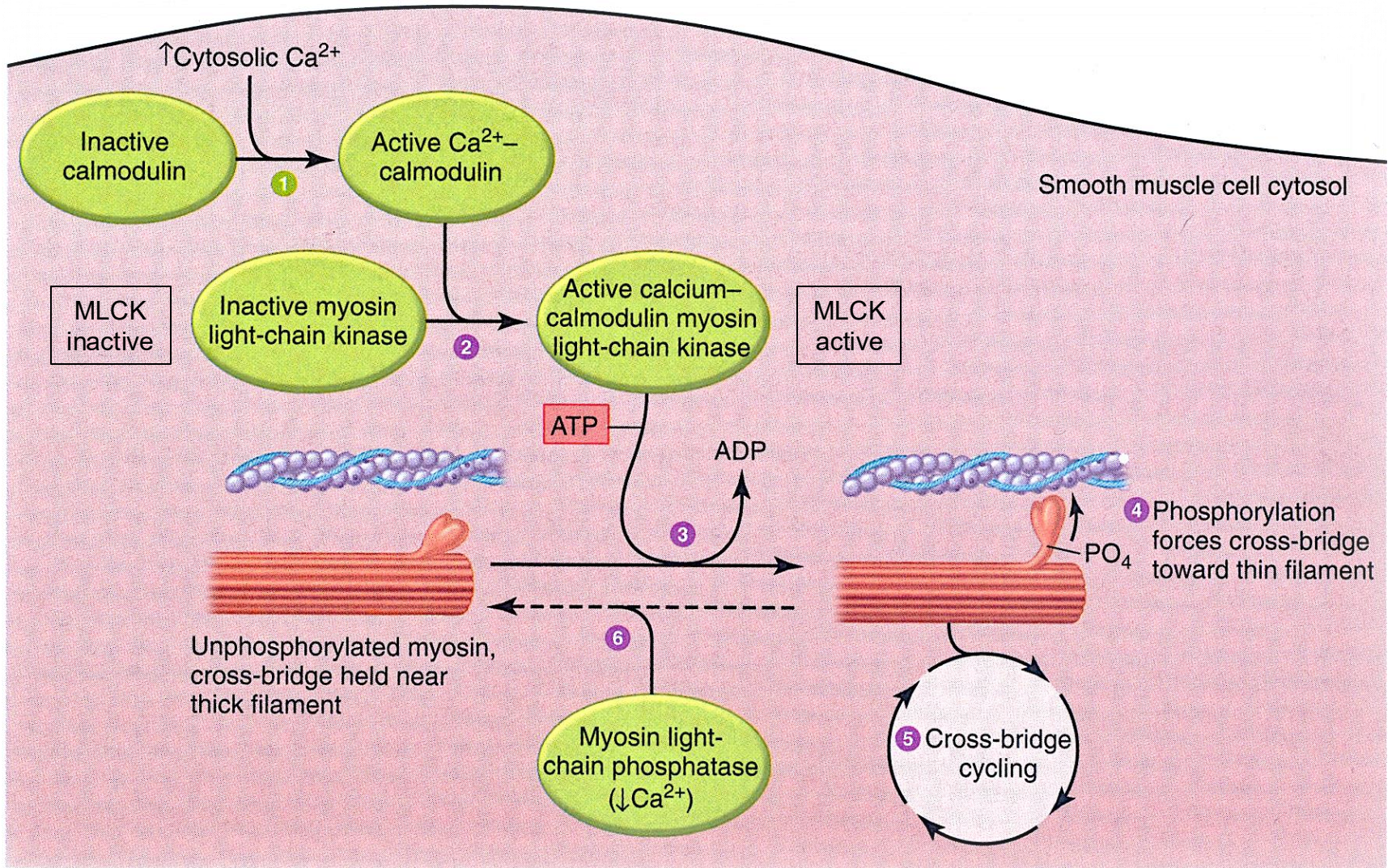
Muscles lisses multi-unitaires: chaque cellule musculaire reçoit une innervation, peu de gap jonctions. Permet des mouvements plus précis.



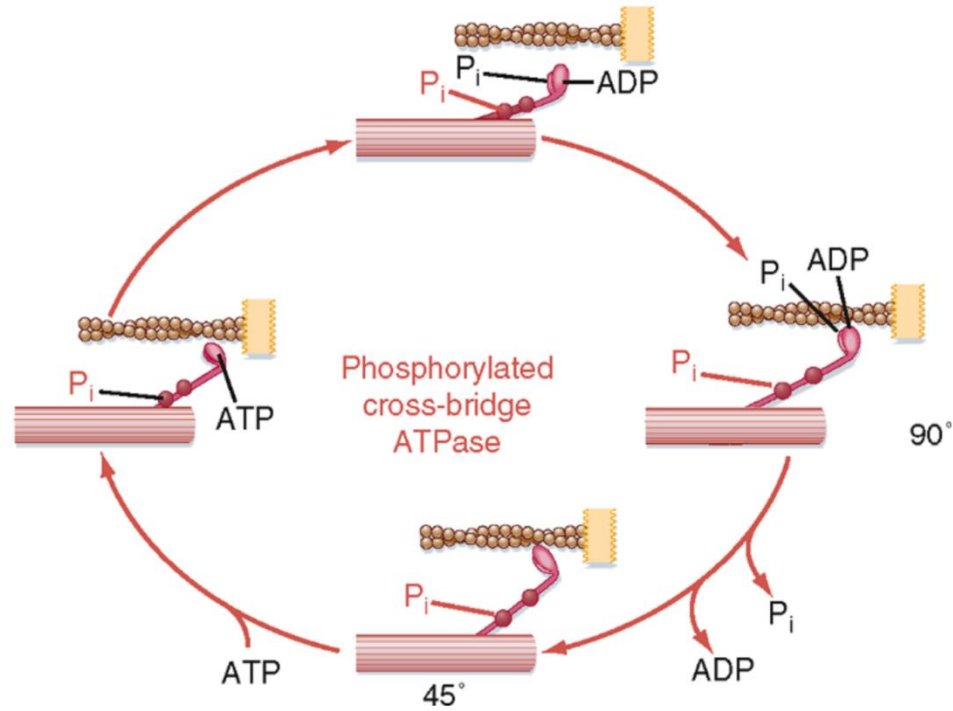
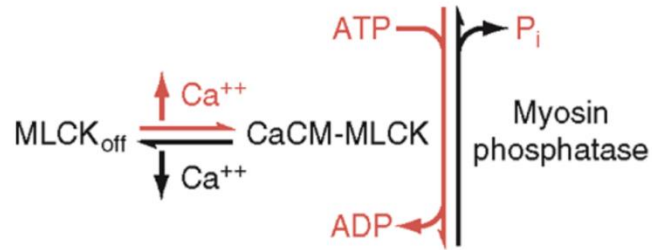
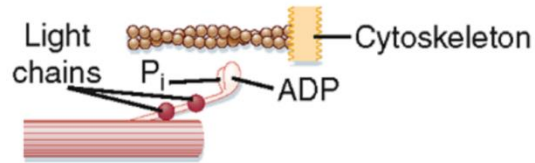
Reticulum Sarcoplasmique

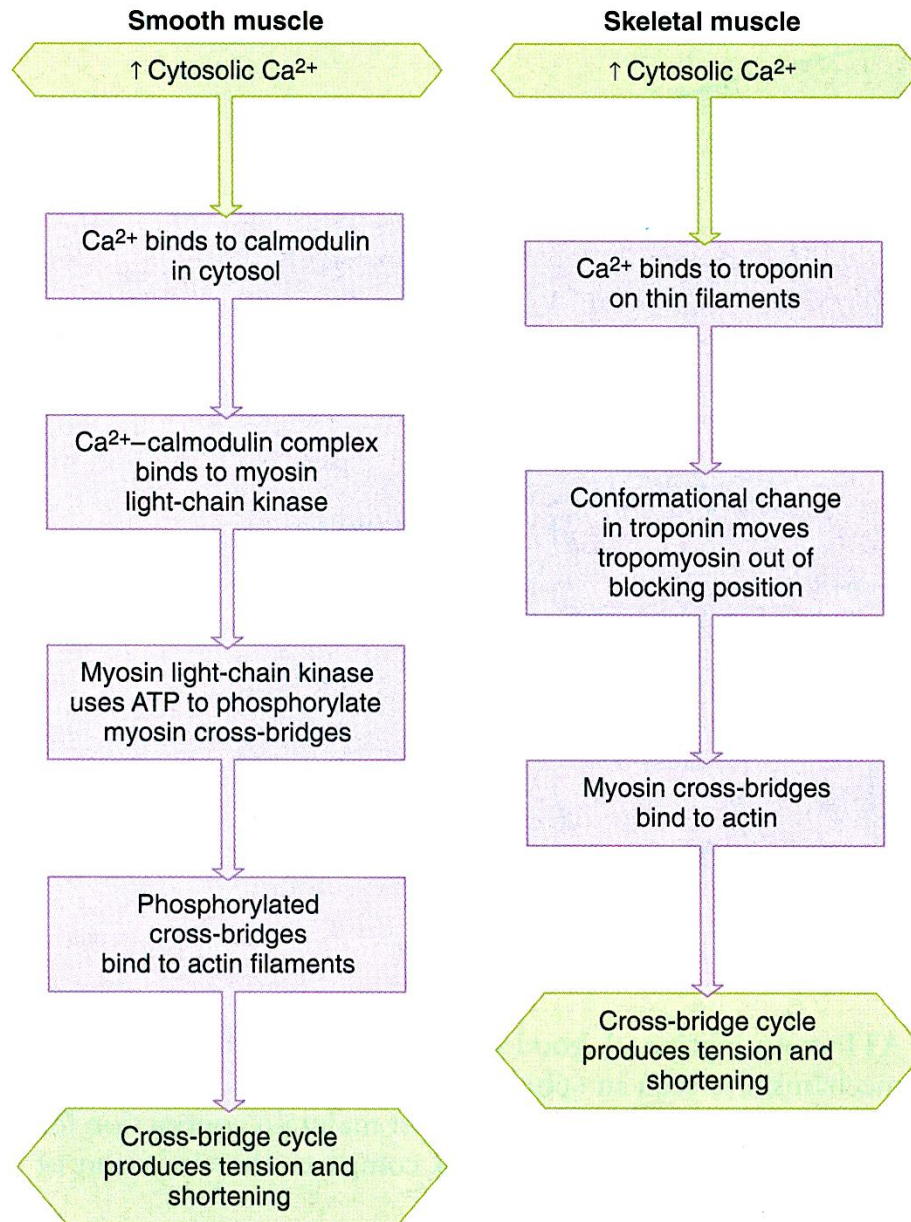


Contraction des muscles lisses

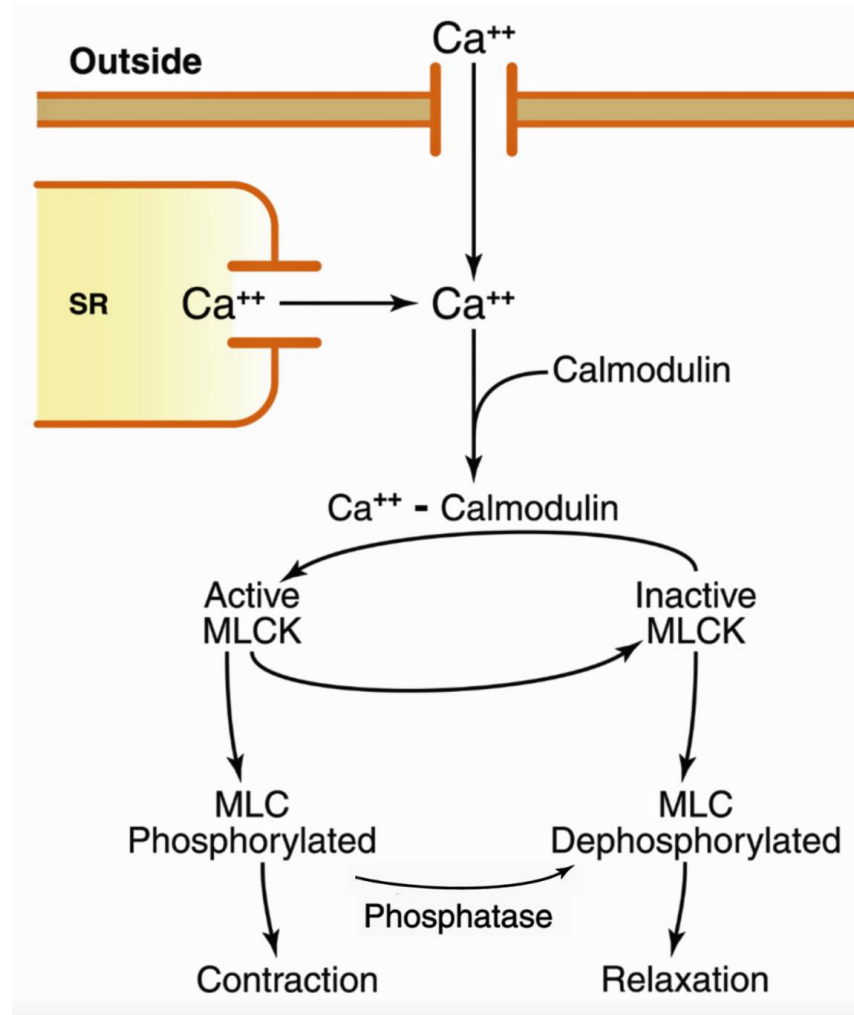


Noncycling

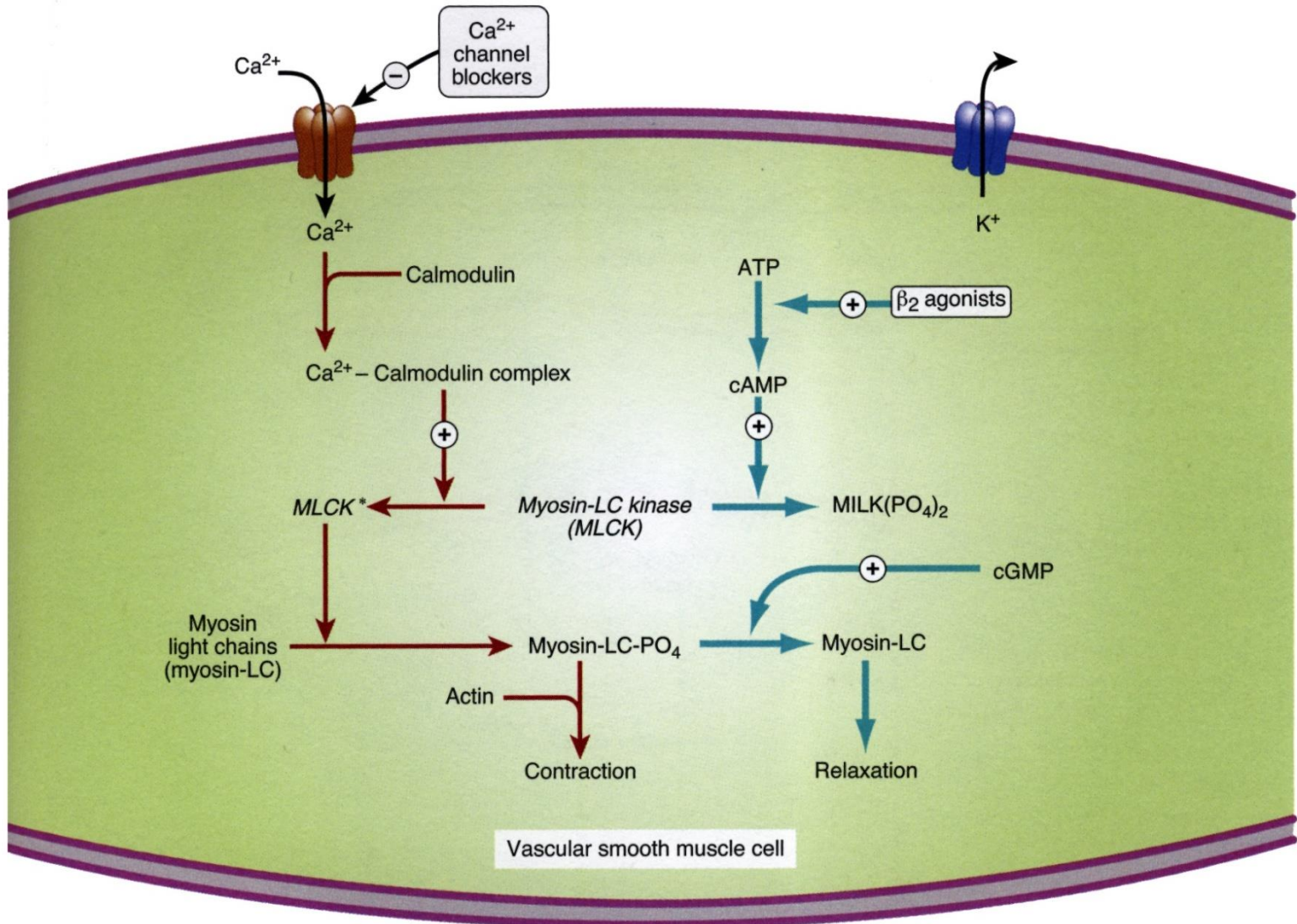




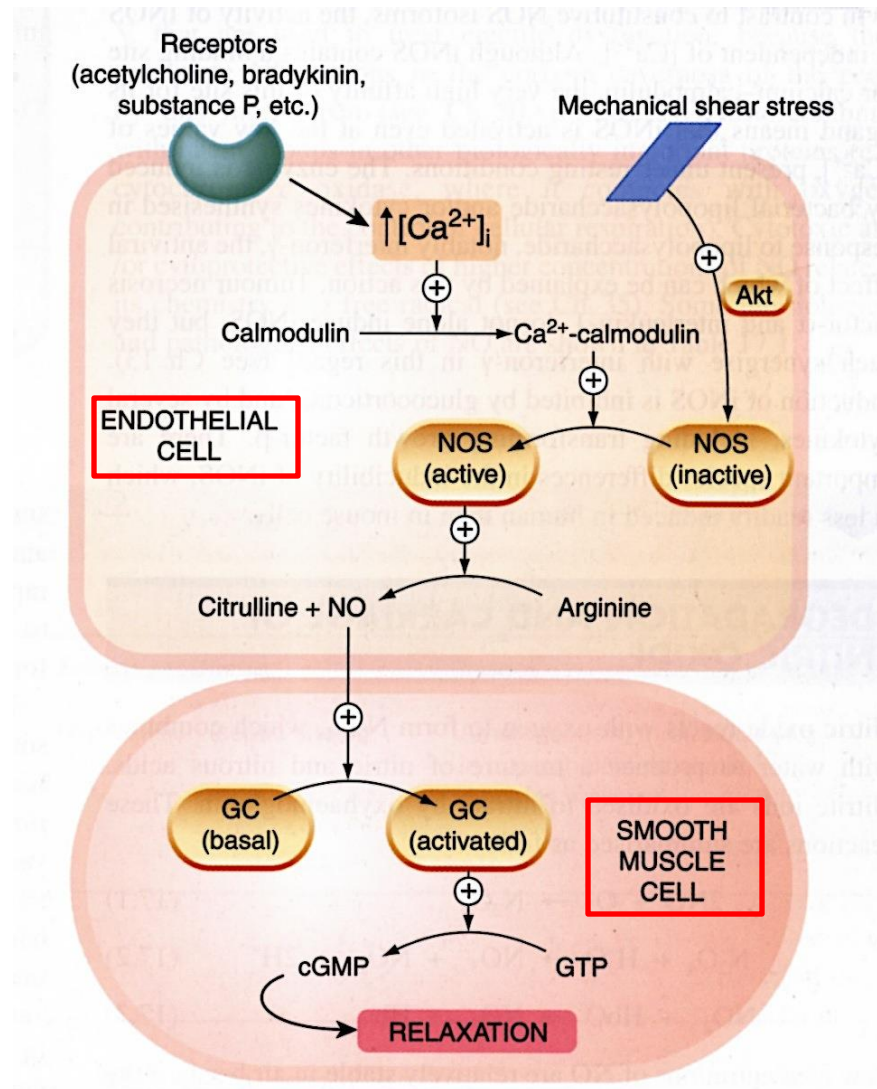
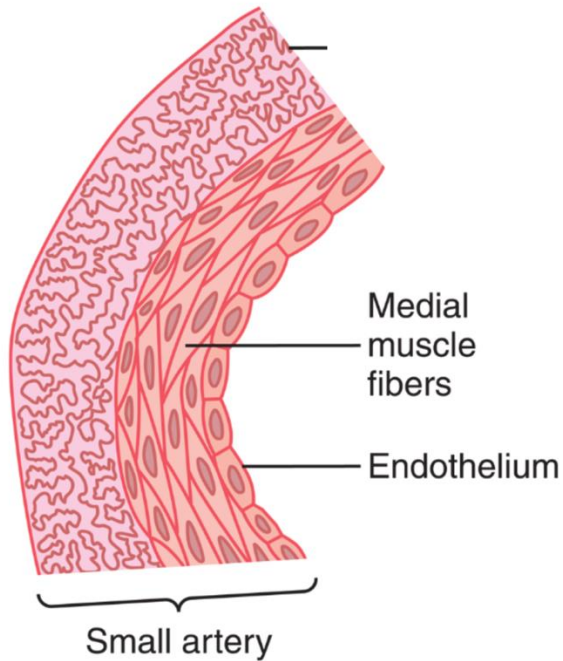
Induction de la relaxation



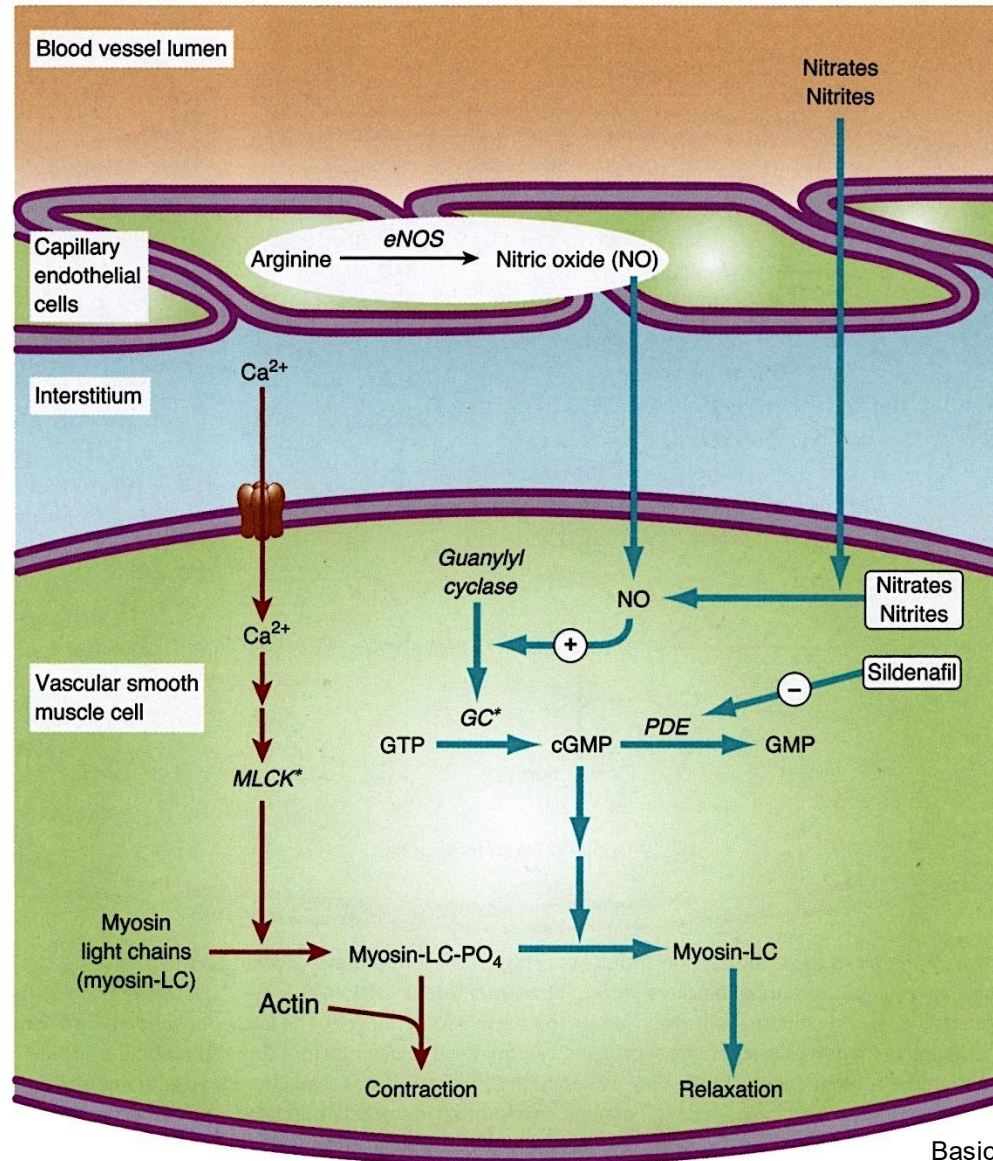
Induction de la relaxation



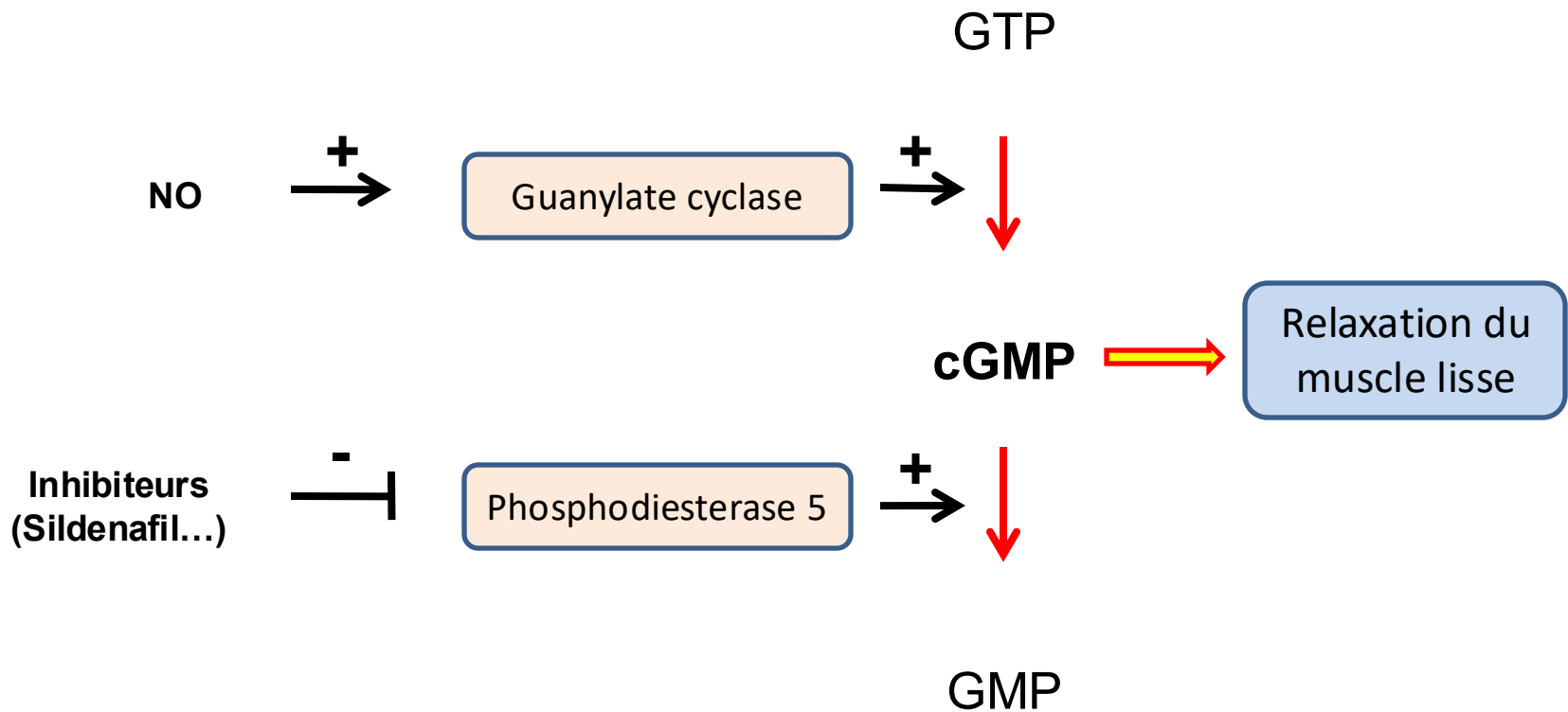
Synthèse du NO / Cellules endotheliales



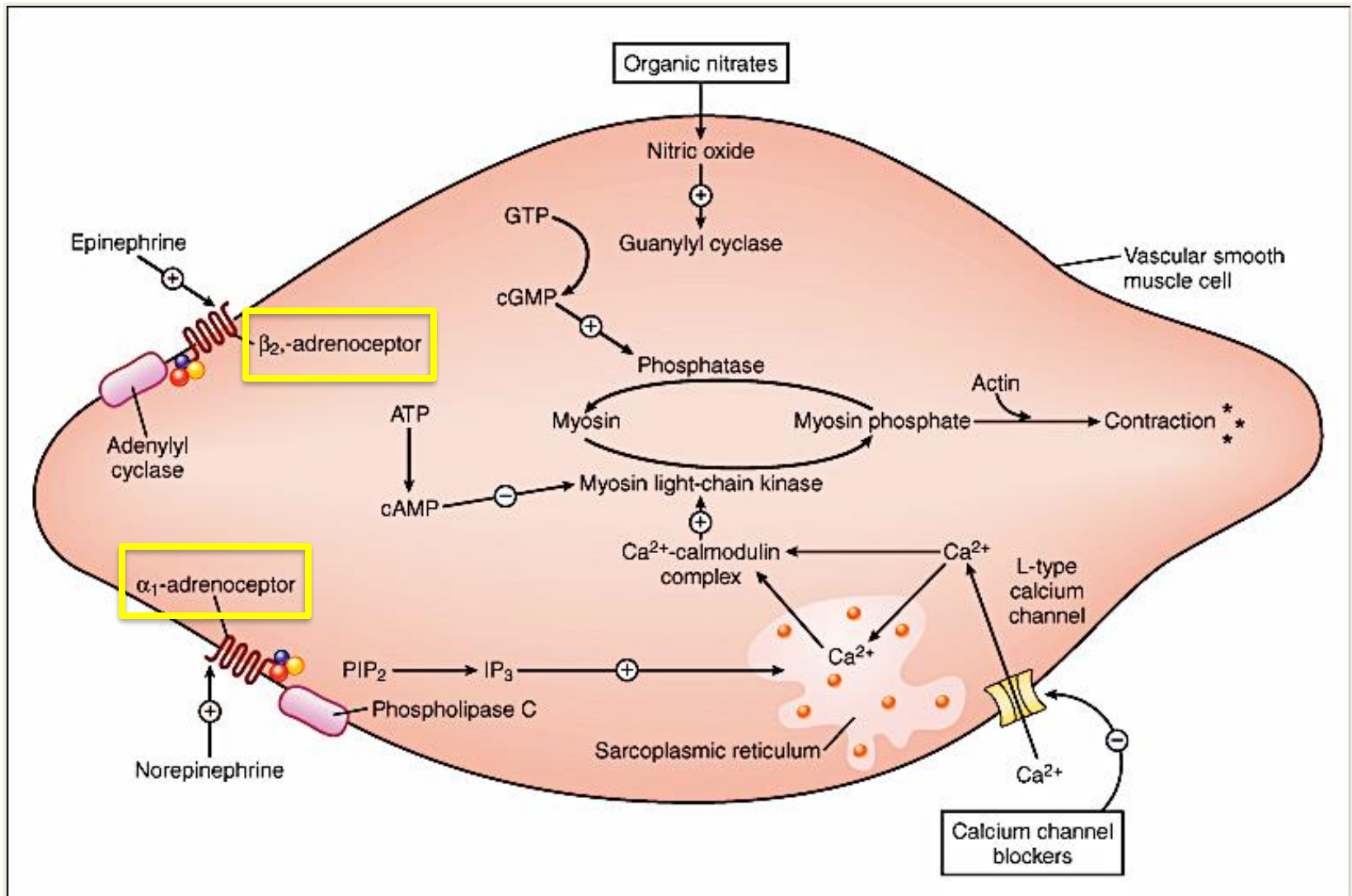
Induction de la relaxation: rôle NO



Induction de la relaxation: rôle NO

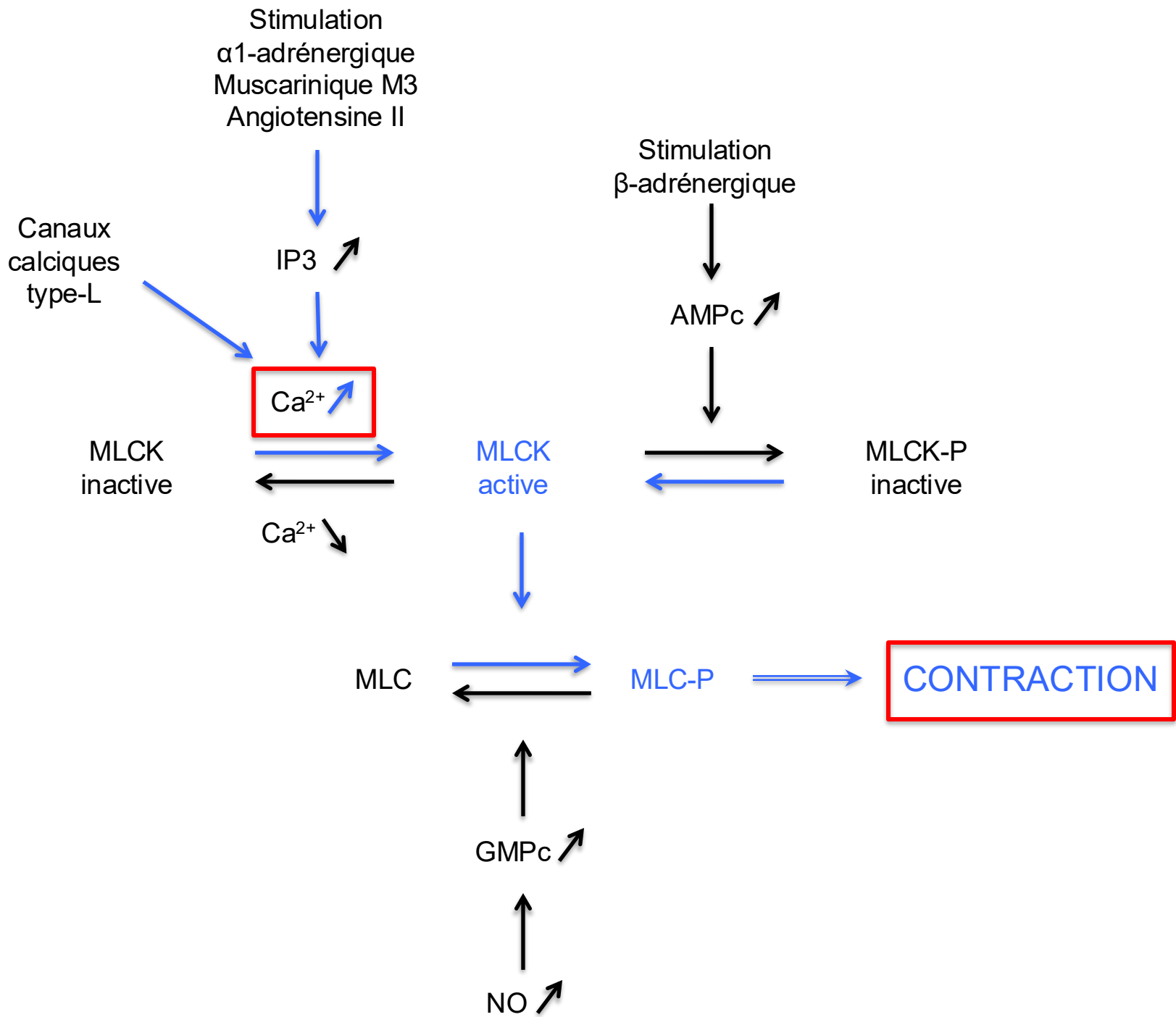


Régulation de la contraction



Brenner & Stevens: Pharmacology, 3rd Edition.
Copyright (c) 2009 by Saunders, an Imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

IP₃: contraction
cAMP ou cGMP: relaxation



Modulation de la contraction du muscle lisse

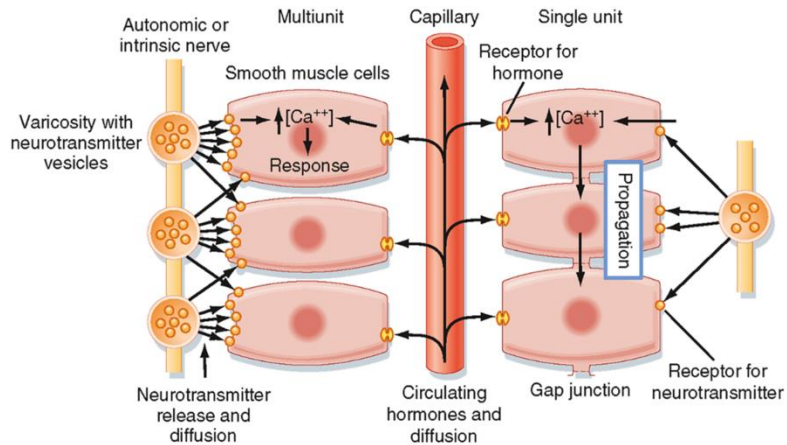


TABLE 14-1 Modulation of Smooth Muscle Activity by Neurotransmitters, Hormones, and Local Factors

Agonist	Response	Receptor	Second Messenger
Norepinephrine and epinephrine from sympathetic stimulation	Contraction* (predominant)	α_1 -AR	InsP3
	Relaxation†	β_2 -AR	cAMP
Acetylcholine from parasympathetic stimulation	Contraction‡ (direct)	Muscarinic receptor on SMC	
	Relaxation‡ (indirect)	Muscarinic receptor on EC	
Angiotensin II	Contraction§	AT-II receptor	InsP3
Vasopressin	Contraction§	Vasopressin receptor	InsP3
Endothelin	Contraction§	Endothelin receptor	InsP3
Adenosine	Relaxation	Adenosine receptor	cAMP

AR, adrenergic receptor; EC, endothelial cell; InsP3, inositol 1,4,5-trisphosphate; SMC, smooth muscle cell.

Contrôle des connaissances

Décrire les mécanismes de contraction/décontraction des muscles lisses

?

Rôle du calcium? Senseur calcique

?

Les différents mécanismes aboutissant à une augmentation du calcium dans les muscles lisses et leurs agonistes

?

Rôle et origine du GMPc

Effet des agonistes adrénérgiques dans la contraction des muscles lisses

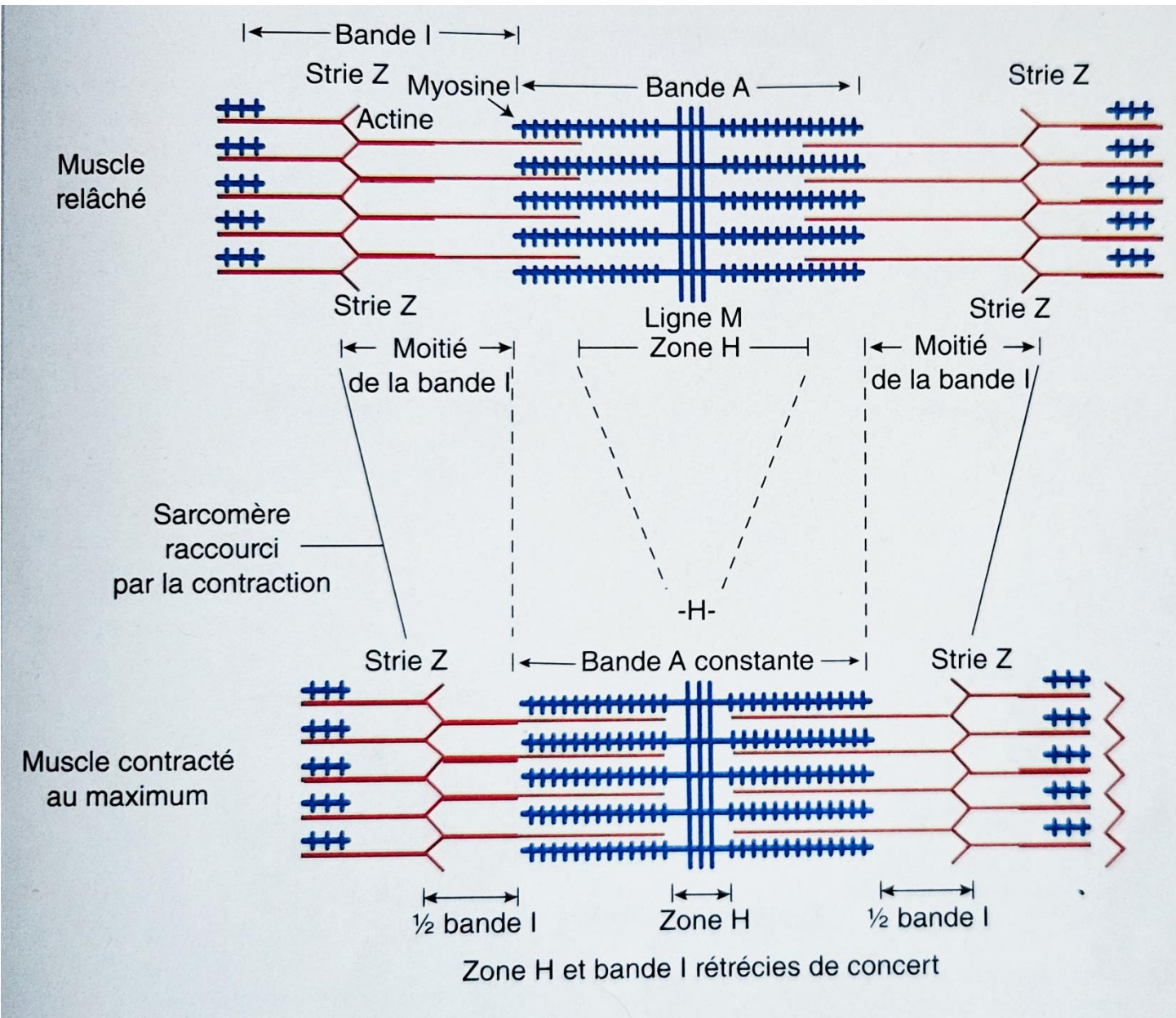
Résumé Muscles (1)

	Skeletal	Cardiac	Smooth
Mechanism of excitation	Neuromuscular transmission	Pacemaker potentials Electrotonic depolarization through gap junctions	Synaptic transmission Hormone-activated receptors Electrical coupling Pacemaker potentials
Electrical activity of muscle cell	Action potential spikes	Action potential plateaus	Action potential spikes, plateaus Graded membrane potential changes Slow waves
Ca ²⁺ sensor	Troponin	Troponin	Calmodulin
Excitation-contraction coupling	L-type Ca ²⁺ channel (DHP receptor) in T-tubule membrane coupling to Ca ²⁺ -release channel (ryanodine receptor) in SR	Ca ²⁺ entry through L-type Ca ²⁺ channel (DHP receptor) triggers Ca ²⁺ -induced Ca ²⁺ release from SR	Ca ²⁺ entry through voltage-gated Ca ²⁺ channels Ca ²⁺ - and IP ₃ -mediated Ca ²⁺ release from SR Ca ²⁺ entry through store-operated Ca ²⁺ channels
Terminates contraction	Breakdown of ACh by acetylcholinesterase	Action potential repolarization	Myosin light chain phosphatase
Twitch duration	20-200 ms	200-400 ms	200 ms—sustained
Regulation of force	Frequency and multifiber summation	Regulation of calcium entry	Balance between MLCK phosphorylation and dephosphorylation Latch state
Metabolism	Oxidative, glycolytic	Oxidative	Oxidative

Résumé Muscles (2)

Table 9–6		Characteristics of Muscle Cells			
Characteristic	Skeletal Muscle	Smooth Muscle		Cardiac Muscle	
		Single Unit	Multiunit		
Thick and thin filaments	Yes	Yes	Yes	Yes	
Sarcomeres—banding pattern	Yes	No	No	Yes	
Transverse tubules	Yes	No	No	Yes	
Sarcoplasmic reticulum (SR)*	++++	+	+	++	
Gap junctions between cells	No	Yes	Few	Yes	
Source of activating Ca^{2+}	SR	SR and extracellular	SR and extracellular	SR and extracellular	
Site of Ca^{2+} regulation	Troponin	Myosin	Myosin	Troponin	
Speed of contraction	Fast–slow	Very slow	Very slow	Slow	
Spontaneous production of action potentials by pacemakers	No	Yes	No	Yes, in a few specialized cells, but most not spontaneously active	
Tone (low levels of maintained tension in the absence of external stimuli)	No	Yes	No	No	
Effect of nerve stimulation	Excitation	Excitation or inhibition	Excitation or inhibition	Excitation or inhibition	
Physiological effects of hormones on excitability and contraction	No	Yes	Yes	Yes	
Stretch of cell produces contraction	No	Yes	No	No	

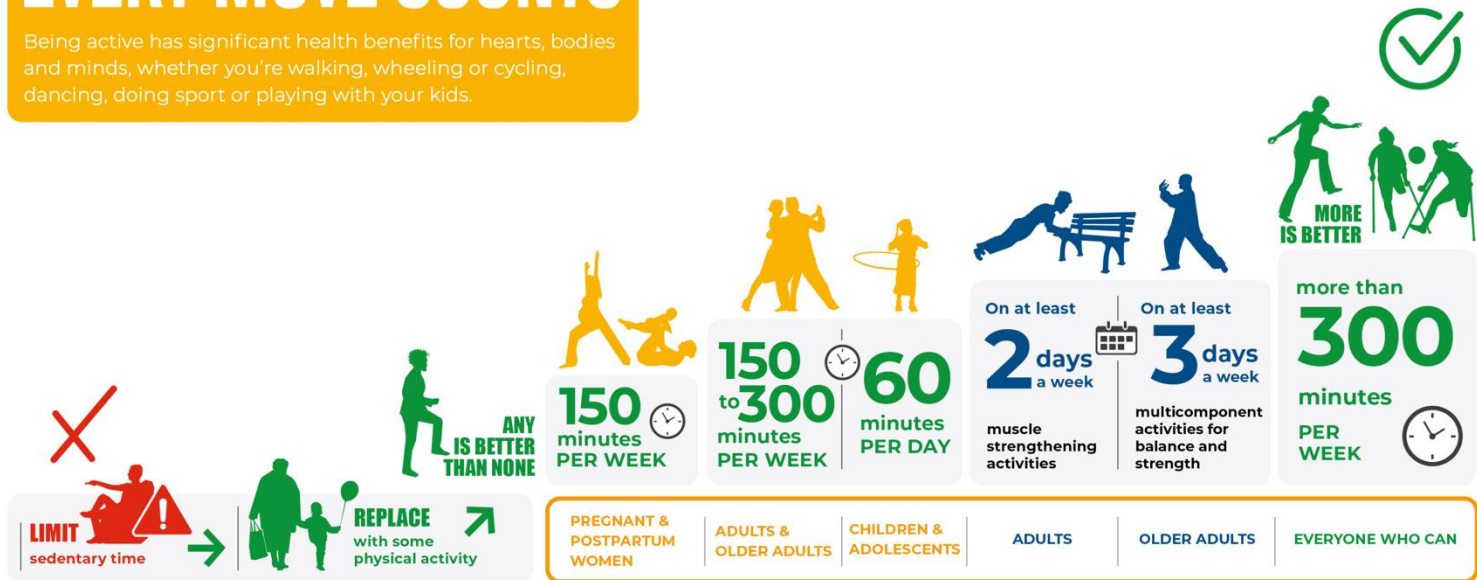
*Number of plus signs (+) indicates the relative amount of sarcoplasmic reticulum present in a given muscle type.



Bougez!

EVERY MOVE COUNTS

Being active has significant health benefits for hearts, bodies and minds, whether you're walking, wheeling or cycling, dancing, doing sport or playing with your kids.



WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour (2020).

For more information, visit: www.who.int/health-topics/physical-activity

