

La Contraction musculaire et le mouvement

- la cellule musculaire
- l'organisation du muscle
- le couplage excitation-contraction
- biophysique du muscle
- exemple : sport et muscle

Qu'est-ce qu'un muscle ?

muscle = tissu capable de générer une force et de la transmettre

■ génération de la force

système enzymatique : conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique

appareil contractile : système de conversion chimio-mécanique

NB : il existe des systèmes de transduction chimio-mécanique dans des cellules non musculaires, mais sans transmission de la force.

force générée	?	mouvements intracellulaires
	?	déformations de la cellule
	?	battements de cils

Qu'est-ce qu'un muscle ?

muscle = tissu capable de générer une force et de la transmettre

■ génération de la force

système enzymatique : conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique

appareil contractile : système de conversion chimio-mécanique

■ transmission de la force

organisation du muscle (niveaux cellulaire et tissulaire) :

- ? transmission de la force musculaire générée
- ? raccourcissement du muscle ou opposition à son allongement.

variables mécaniques

- force newton (N)
- longueur mètre (m)
- temps seconde (sec)

- vitesse m/sec
changement de longueur / temps

- travail joule (J) = N.m (? énergie)
force x longueur de déplacement

- puissance watt (W) = N.m/sec
travail/temps = force/vitesse

- tension N/m²
force / surface de section transversale

Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

critères possibles

- organisation interne de la cellule musculaire
- organisation du tissu musculaire
- contrôle de l'activité musculaire par le système nerveux

Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

organisation interne de la cellule musculaire

myofilaments organisés en sarcomères
muscles striés : muscles squelettiques et cardiaque
muscles à contraction rapide et de relativement courte durée

myofilaments non organisés en sarcomères
muscles lisses
muscles à contraction lente et maintenue ou cyclique

Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

organisation du tissu musculaire

muscles insérés sur le squelette
muscles squelettiques
agissent par effet de levier
? posture, locomotion...

dans la paroi d'organes creux
muscles lisses et cardiaque (+ certains muscles striés)
contrôlent le volume des organes
? cavités cardiaques, intestin, bronches, vaisseaux sanguins...

Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

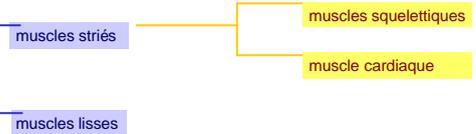
contrôle de l'activité musculaire par le système nerveux

muscles « volontaires »
= sous contrôle du système nerveux moteur
muscles squelettiques

muscles « involontaires »
= sous contrôle du système nerveux autonome
muscles lisses et cardiaque

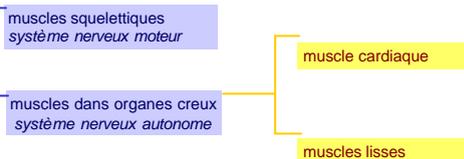
Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

classification anatomo-histologique



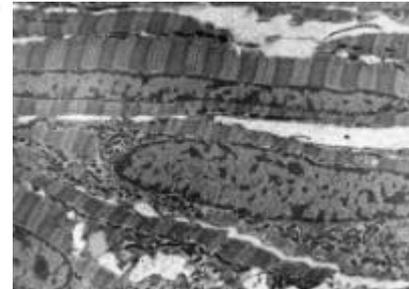
Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

classification fonctionnelle



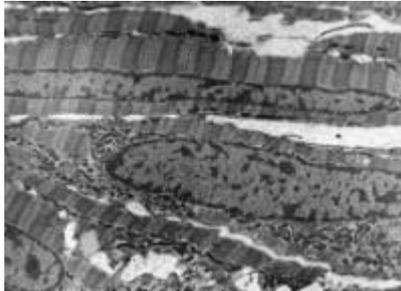
fibre musculaire squelettique

fibres musculaires striées squelettiques : grandes cellules plurinucléées
Ø 0,01 à 0,1 mm
L : très variable

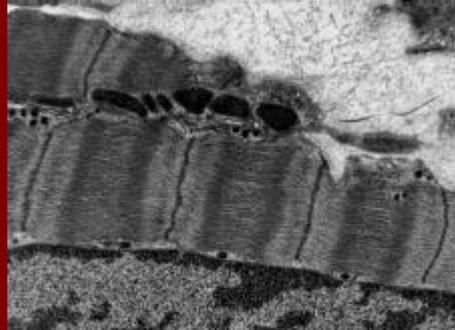


fibre musculaire squelettique

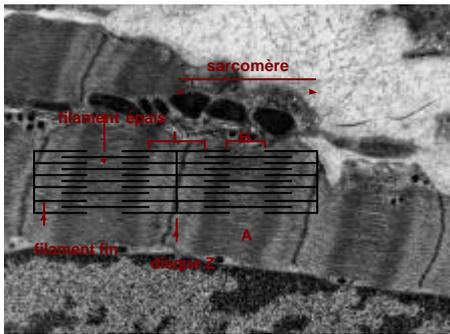
l'organisation en sarcomères



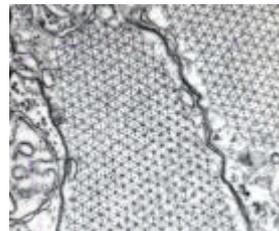
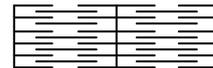
l'organisation du sarcomère



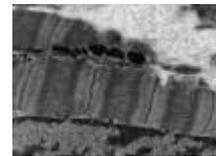
l'organisation du sarcomère



l'organisation du sarcomère



coupe transversale



coupe longitudinale

l'organisation du sarcomère : la contraction

raccourcissement du sarcomère sans raccourcissement des filaments

muscle relâché



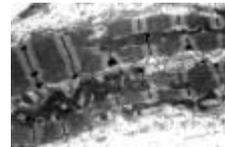
muscle contracté

contraction : glissement des filaments fins et épais les uns sur les autres

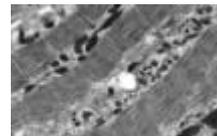
l'organisation du sarcomère : la contraction

raccourcissement du sarcomère sans raccourcissement des filaments

muscle relâché



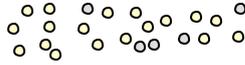
muscle contracté



les filaments fins

principaux composants présents dans les filaments fins

actine : monomères d'actine (PM = 43 000)



tropomyosine : molécule composée de deux chaînes polypeptidiques



nébuline : protéine du cytosquelette

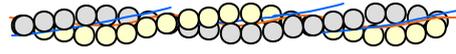


les filaments fins

monomères d'actine : s'organisent en un filament à deux brins autour de la nébuline

tropomyosine : se fixe dans le sillon central.

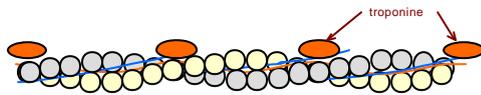
Chaque molécule de tropomyosine s'étend sur environ 7 monomères d'actine.



filament fin de muscle strié

les filaments fins

muscle strié : troponine = 3 sous-unités C, T et I protéine régulatrice sur le filament fin



filament fin de muscle strié

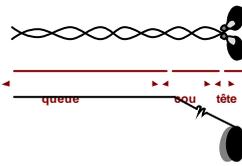
La troponine n'est pas présente dans l'appareil contractile de la cellule musculaire lisse

les filaments épais

myosine : molécule constituée de 6 polypeptides



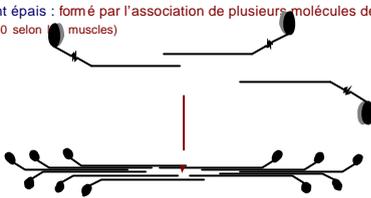
2 chaînes lourdes



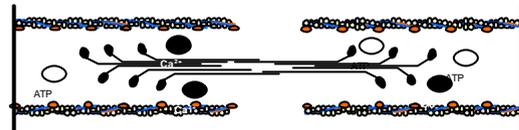
4 chaînes légères

les filaments épais

filament épais : formé par l'association de plusieurs molécules de myosine (20 à 400 selon muscles)



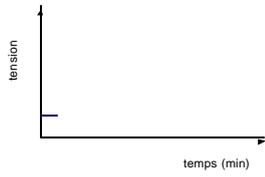
organisation des myofilaments dans le sarcomère



chaînes légères : responsables de l'activité ATPasique.

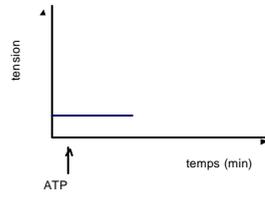
De cette activité ATPasique dépend la vitesse du cycle de contraction ainsi que la consommation d'ATP.

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+} et de l'ATP



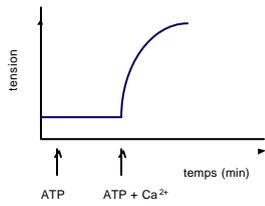
contraction d'une fibre musculaire perméabilisée
perméabilisation de la membrane plasmique : le milieu intracellulaire équivaut au milieu extracellulaire

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+} et de l'ATP



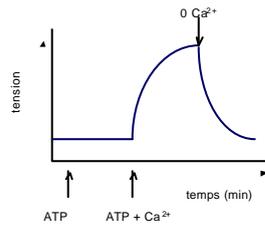
contraction d'une fibre musculaire perméabilisée

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+} et de l'ATP



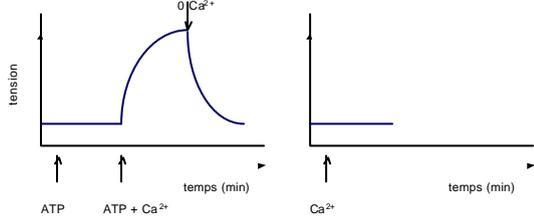
contraction d'une fibre musculaire perméabilisée

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+} et de l'ATP



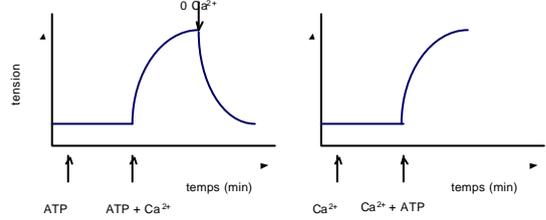
contraction d'une fibre musculaire perméabilisée

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+} et de l'ATP



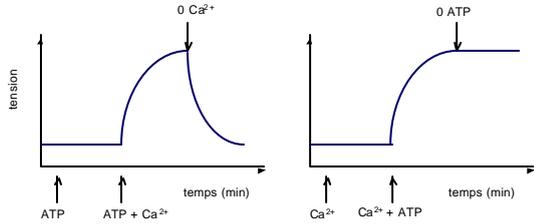
contraction d'une fibre musculaire perméabilisée

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+} et de l'ATP



contraction d'une fibre musculaire perméabilisée

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+} et de l'ATP

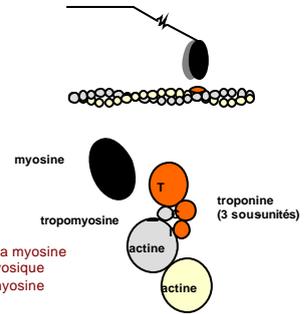


contraction d'une fibre musculaire perméabilisée

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+}

mécanisme d'action du Ca^{2+}

absence de Ca^{2+}

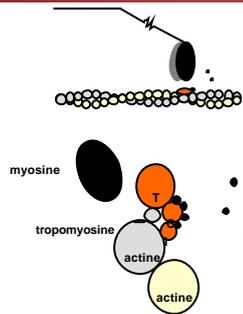


- ? masquage du site de fixation de la myosine
- ? pas de formation de pont actomyosique
- ? pas d'activité ATPasique de la myosine

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+}

mécanisme d'action du Ca^{2+}

présence de Ca^{2+}

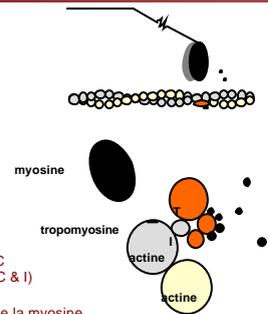


- ? fixation du Ca^{2+} sur la troponine C

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+}

mécanisme d'action du Ca^{2+}

présence de Ca^{2+}



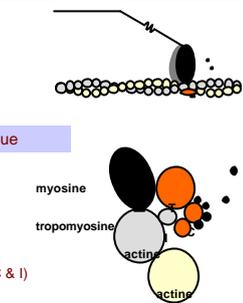
- ? fixation du Ca^{2+} sur la troponine C
- ? déplacement de la troponine (T, C & I)
- ? déplacement de la tropomyosine
- ? démasquage du site de fixation de la myosine

la cellule musculaire ————— rôle du Ca^{2+}

mécanisme d'action du Ca^{2+}

formation du pont actomyosique

présence de Ca^{2+}



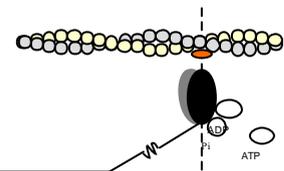
- ? fixation du Ca^{2+} sur la troponine C
- ? déplacement de la troponine (T, C & I)
- ? déplacement de la tropomyosine
- ? démasquage du site de fixation de la myosine

la cellule musculaire ————— formation cyclique des ponts actomyosiques

absence de Ca^{2+}
masquage du site de fixation de la myosine

pont actomyosique
pas de pont actomyosique, y compris en présence d'ATP.

activité enzymatique de la myosine
myosine = forte affinité pour l'ADP et le phosphate inorganique (Pi)



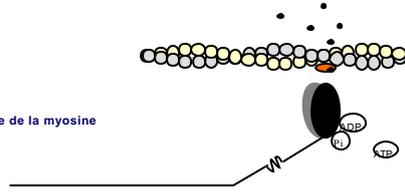
angle de la tête de myosine avec l'actine
ADP et Pi fixés à la tête de myosine ? angle de 90° (conformation pour laquelle l'énergie libre est minimale)

la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
fixation du Ca^{2+} sur la troponine C

pont actomyosique

activité enzymatique de la myosine



angle de la tête de myosine avec l'actine
angle de 90°

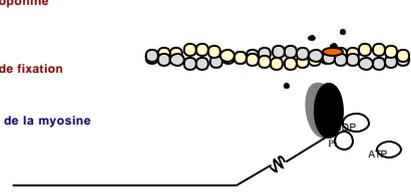
2

la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
 Ca^{2+} fixé sur la troponine C
déplacement de la troponine

pont actomyosique
démasquage du site de fixation

activité enzymatique de la myosine



angle de la tête de myosine avec l'actine
angle de 90°

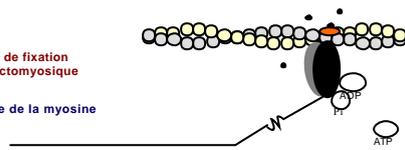
3

la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
troponine déplacée

pont actomyosique
démasquage du site de fixation
formation du pont actomyosique

activité enzymatique de la myosine



angle de la tête de myosine avec l'actine
angle de 90°

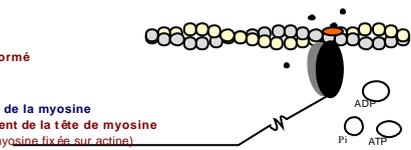
4

la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
troponine déplacée

pont actomyosique
pont actomyosique formé

activité enzymatique de la myosine
l'ADP et P_i se détachent de la tête de myosine
(faible affinité quand myosine fixée sur actine)



angle de la tête de myosine avec l'actine
angle de 90°

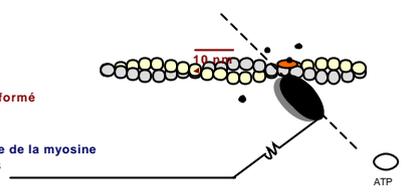
5

la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
troponine déplacée

pont actomyosique
pont actomyosique formé

activité enzymatique de la myosine
l'ADP et P_i détachés



angle de la tête de myosine avec l'actine

absence d'ADP et de P_i :
? rotation de la tête de myosine angle de 45° (énergie minimum)
? déplacement du filament d'actine par rapport au filament de myosine

diminution de l'énergie libre du complexe actomyosique
génération d'une force contractile

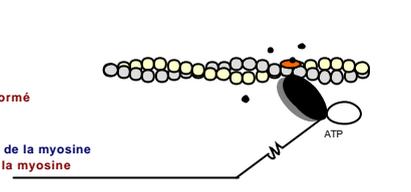
6

la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
troponine déplacée

pont actomyosique
pont actomyosique formé

activité enzymatique de la myosine
fixation de l'ATP sur la myosine
(forte affinité)



angle de la tête de myosine avec l'actine
angle de 45°

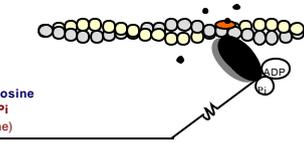
7

la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
troponine déplacée

pont actomyosique

activité enzymatique de la myosine
hydrolyse de l'ATP en ADP + Pi
(activité ATPasique de la myosine)



angle de la tête de myosine avec l'actine
angle de 45°

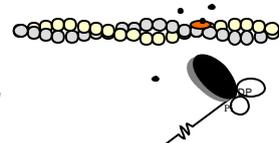
8

la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
troponine déplacée

pont actomyosique
rupture du pont actomyosique

activité enzymatique de la myosine
présence d'ADP + Pi



angle de la tête de myosine avec l'actine
angle de 45°

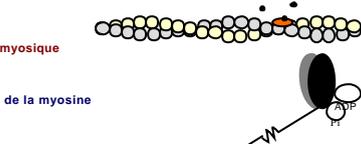
8

la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de Ca^{2+}
troponine déplacée

pont actomyosique
rupture du pont actomyosique

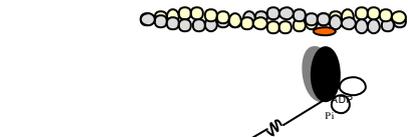
activité enzymatique de la myosine
présence d'ADP + Pi



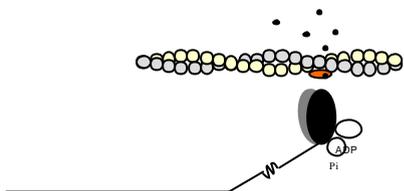
angle de la tête de myosine avec l'actine
angle de 90°
(conformation d'énergie libre minimale)

8

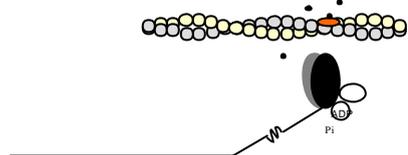
la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques



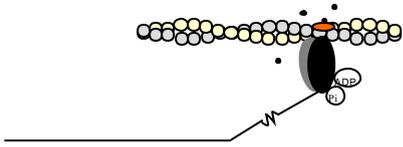
la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques



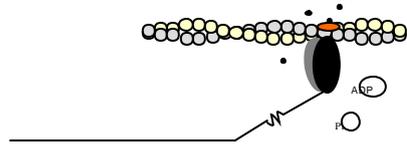
la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques



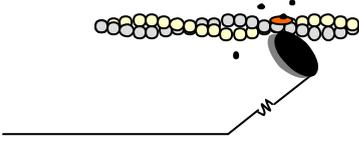
la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques



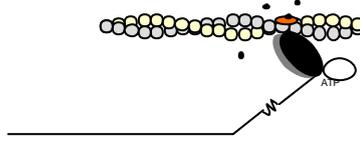
la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques



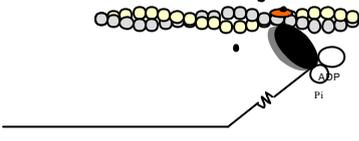
la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques



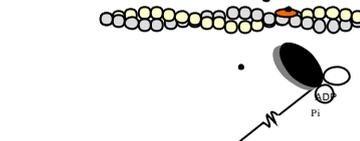
la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques



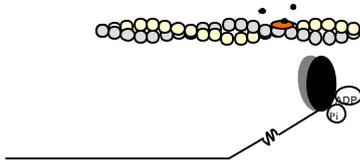
la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques



la cellule musculaire — formation cyclique des ponts actomyosiques

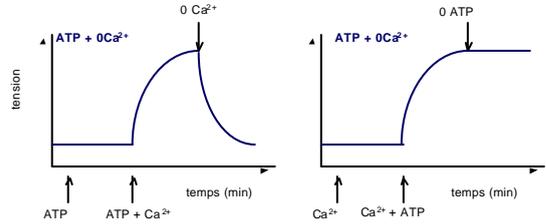


la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques



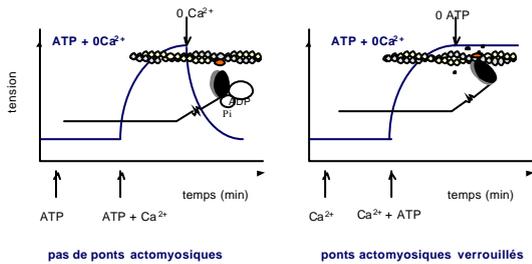
la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques

rôle du Ca^{2+} et de l'ATP : interprétation moléculaire



la cellule musculaire ——— formation cyclique des ponts actomyosiques

rôle du Ca^{2+} et de l'ATP : interprétation moléculaire



la cellule musculaire ——— les sources d'énergie

ATP

énergie produite par l'hydrolyse de l'ATP

? énergie mécanique = travail : contraction musculaire 25 %
? énergie thermique = chaleur 75 %

? réserves d'ATP faibles dans la cellule musculaire

la cellule musculaire ——— les sources d'énergie

ATP

énergie produite par l'hydrolyse de l'ATP

? énergie mécanique = travail : contraction musculaire 25 %
? énergie thermique = chaleur 75 %

? réserves d'ATP faibles dans la cellule musculaire

phosphocréatine

réserve énergétique d'utilisation rapide : production d'ATP



NB : chez les Invertébrés, pas de phosphocréatine mais de l'arginine-phosphate

la cellule musculaire ——— les sources d'énergie

ATP

énergie produite par l'hydrolyse de l'ATP

? énergie mécanique = travail : contraction musculaire 25 %
? énergie thermique = chaleur 75 %

? réserves d'ATP faibles dans la cellule musculaire

phosphocréatine

réserve énergétique d'utilisation rapide : production d'ATP



NB : chez les Invertébrés, pas de phosphocréatine mais de l'arginine-phosphate

glycogène, acides gras

réserve énergétique d'utilisation lente : catabolisme ? production d'ATP

métabolisme aérobie muscles striés : présence de myoglobine (O_2)
métabolisme anaérobie : production d'acide lactique

l'organisation du muscle ————— le muscle strié

muscle = structure hiérarchisée
myofilaments



l'organisation du muscle ————— le muscle strié

muscle = structure hiérarchisée
myofilaments



sarcomères



l'organisation du muscle ————— le muscle strié

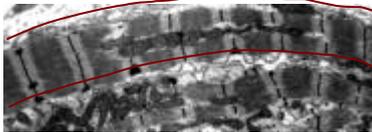
muscle = structure hiérarchisée
myofilaments



sarcomères



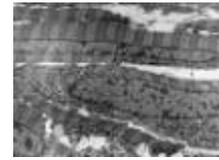
fibrille
sarcomères en série
mitochondrie
réticulum
sarcoplasmique



l'organisation du muscle ————— le muscle strié

muscle = structure hiérarchisée

fibre
cellule comprenant
plusieurs fibrilles



l'organisation du muscle ————— le muscle strié

muscle = structure hiérarchisée

fibre
cellule comprenant
plusieurs fibrilles



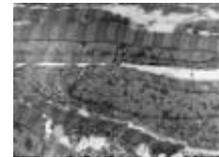
amas de fibres
cellules en faisceaux
tissu conjonctif



l'organisation du muscle ————— le muscle strié

muscle = structure hiérarchisée

fibre
cellule comprenant
plusieurs fibrilles



amas de fibres
cellules en faisceaux
tissu conjonctif

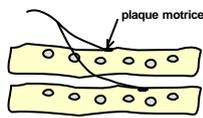


muscle
faisceaux musculaires
zones d'insertion



l'organisation du muscle ————— les différents types de muscles

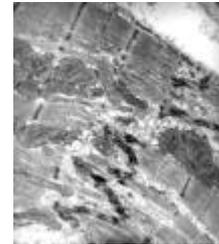
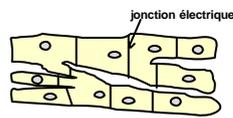
muscle strié squelettique



- organisation en sarcomères
- grandes cellules plurinucléées
- stimulation : système nerveux moteur (ACh)
- chaque cellule reçoit une fibre nerveuse
- pas de couplage de cellule à cellule

l'organisation du muscle ————— les différents types de muscles

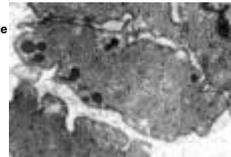
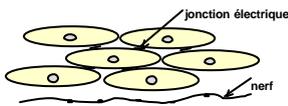
muscle strié cardiaque



- organisation en sarcomères
- cellules mononucléées
- stimulation : système nerveux autonome + hormones
- toutes les cellules ne sont pas innervées
- couplage de cellule à cellule : jonctions serrées (« gap junctions »)

l'organisation du muscle ————— les différents types de muscles

muscle lisse



- pas de sarcomères
- cellules mononucléées
- stimulation : système nerveux autonome + hormones
- couplage de cellule à cellule : jonctions serrées (« gap junctions ») dans certains muscle lisses

l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

les différents types de muscles lisses

les muscles lisses mono-unitaires
 toutes les cellules fonctionnent comme une seule unité
 présence de jonctions de cellule à cellule
 transmission d'un potentiel d'action de cellule à cellule
 contraction dit phasique

ex : myocytes responsables du péristaltisme intestinal.

les muscle lisses pluri-unitaires
 les cellules fonctionnent comme plusieurs unités distinctes
 pas de potentiel d'action
 pas de propagation électrique de cellule à cellule
 contraction dite tonique

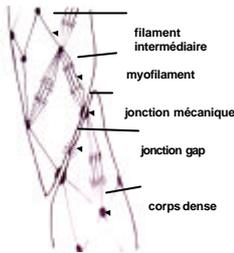
ex : les myocytes responsables de la réactivité bronchique.

NB : muscles lisses intermédiaires entre mono-unitaires et pluri-unitaires

l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

l'organisation de la cellule

pas d'organisation en sarcomère



- cellules mononucléées en fuseau
- pas de tubules T
- nombreux filaments intermédiaires reliant les corps denses
- myofilaments constitués d'actine et de myosine, reliés à des corps denses

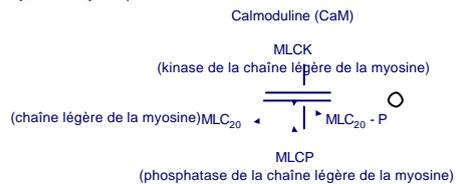
l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

l'appareil contractile

- myofilaments constitués d'actine et de myosine, mais pas de sarcomères
- pas de troponine
- formation du pont actomyosique et activité ATPasique de la myosine :

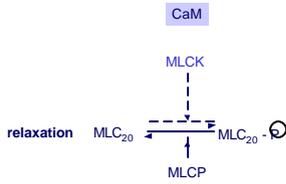
nécessite la phosphorylation de la chaîne légère de 20 kDa de la myosine

système enzymatique :



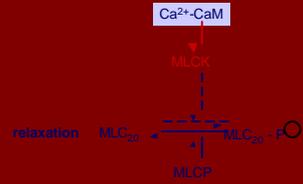
l'appareil contractile : rôle du calcium

absence de Ca^{2+}
pas d'activation de la MLCK
myosine déphosphorylée
relaxation

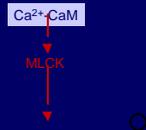


l'appareil contractile : rôle du calcium

présence de Ca^{2+}

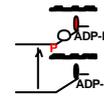


complexe Ca^{2+} -calmoduline
activation de la MLCK
myosine phosphorylée
contraction



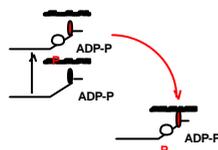
l'appareil contractile : les cycles de contraction

cycle phosphorylé
phosphorylation



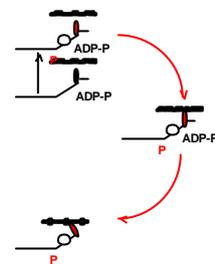
l'appareil contractile : les cycles de contraction

cycle phosphorylé
formation du pont actomyosique



l'appareil contractile : les cycles de contraction

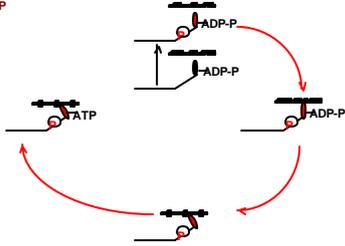
cycle phosphorylé
rotation de la tête de myosine



l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

l'appareil contractile : les cycles de contraction

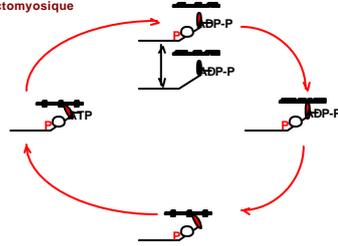
cycle phosphorylé
hydrolyse de l'ATP



l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

l'appareil contractile : les cycles de contraction

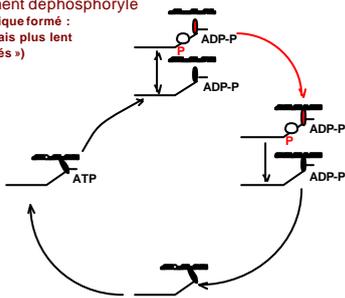
cycle phosphorylé
rupture du pont actomyosique



l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

l'appareil contractile : les cycles de contraction

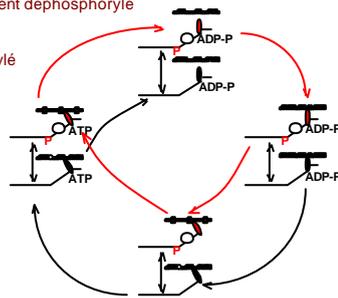
cycle partiellement déphosphorylé
si pont actomyosique formé :
cycle possible, mais plus lent
(ponts « verrouillés »)



l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

l'appareil contractile : les cycles de contraction

cycle partiellement déphosphorylé
↓
cycle phosphorylé



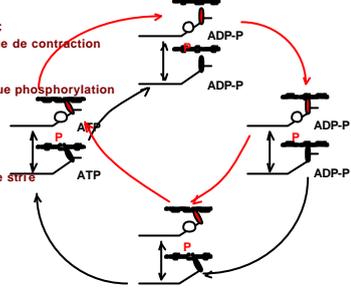
l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

consommation d'ATP

- activité ATPasique de la MLC
- ? un ATP consommée par cycle de contraction
- phosphorylation de la MLC
- ? un ATP consommée à chaque phosphorylation

consommation d'ATP

- par cycle de contraction
- muscle lisse > muscle strié



l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

consommation d'ATP

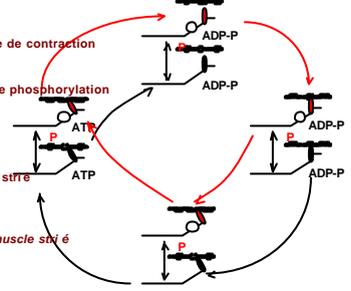
- activité ATPasique de la MLC
- ? un ATP consommée par cycle de contraction
- phosphorylation de la MLC
- ? un ATP consommée à chaque phosphorylation

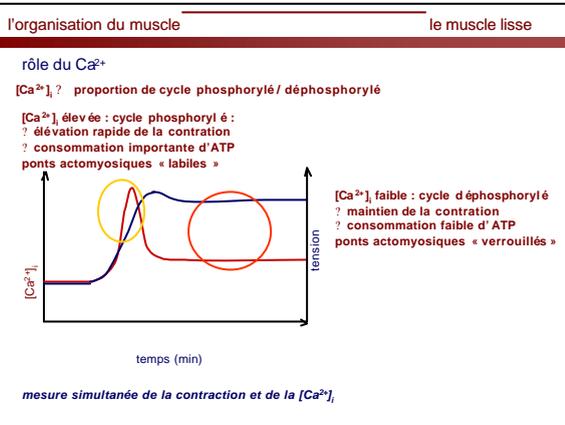
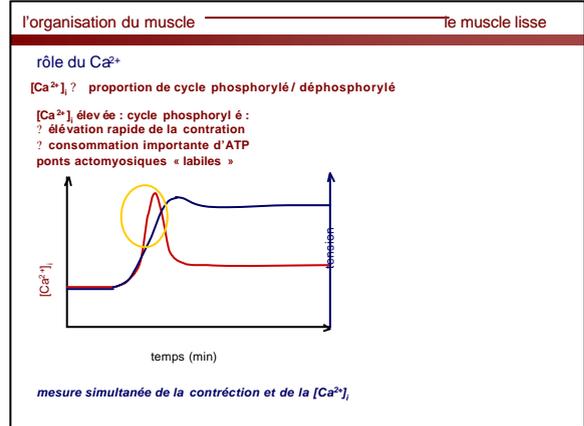
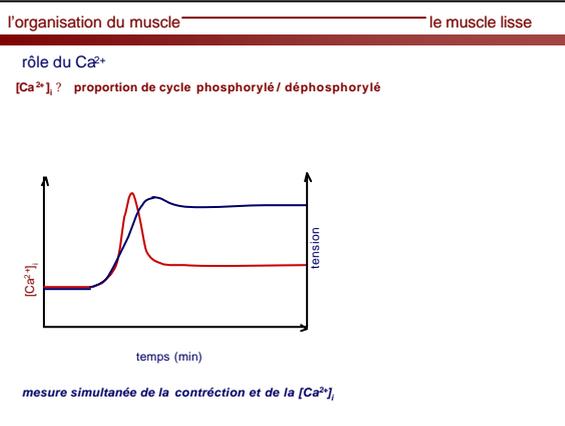
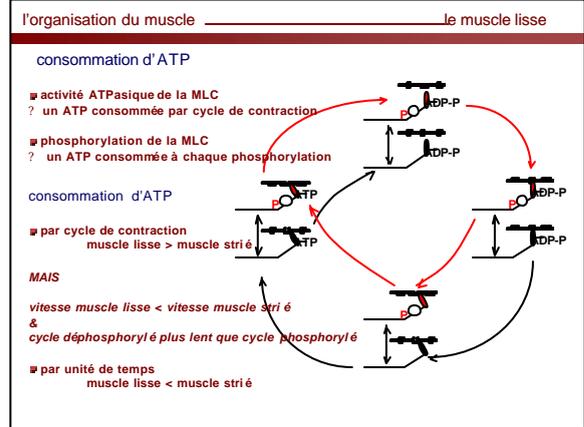
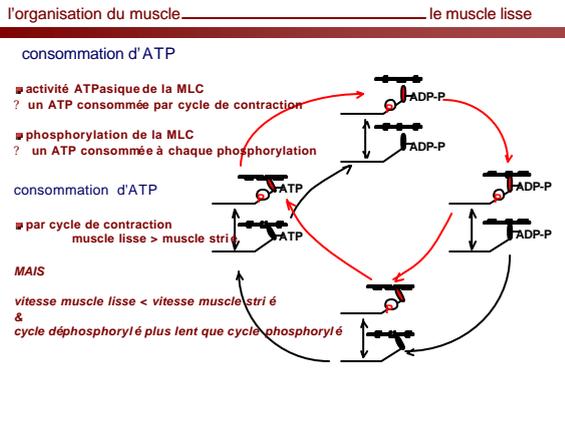
consommation d'ATP

- par cycle de contraction
- muscle lisse > muscle strié

MAIS

vitesse muscle lisse < vitesse muscle strié





l'organisation du muscle ————— le muscle lisse

physiologie du muscle lisse

- mécanisme d'action du Ca²⁺ : activation enzymatique (Ca-Cam + MLCK)
- ? possibilité de modulation de la contraction : balance MLCK / MLCP
- existence de cycles phosphorylé / partiellement déphosphorylé
- ? modulation de la vitesse de contraction
- ? modulation de la consommation d'ATP
- ? maintien de la contraction avec une faible consommation d'ATP (ponts actomyosiques « verrouillés »)

l'organisation du muscle le muscle lisse

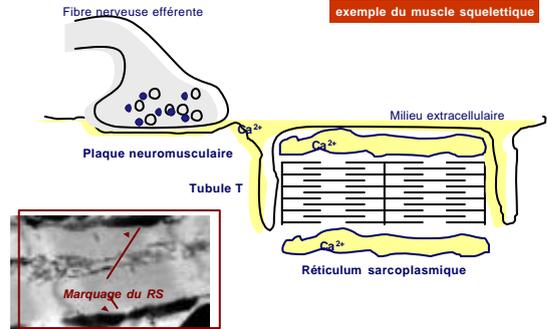
physiologie du muscle lisse

- mécanisme d'action du Ca^{2+} : activation enzymatique (Ca-Cam + MLCK)
- ? possibilité de modulation de la contraction : balance MLCK / MLCP
- existence de cycles phosphorylé / partiellement déphosphorylé
- ? modulation de la vitesse de contraction
- ? modulation de la consommation d'ATP
- ? maintien de la contraction avec une faible consommation d'ATP (ponts actomyosiques « verrouillés »)

*NB : l'hypothèse des ponts verrouillés non formellement démontrée. (pont actomyosique verrouillé non isolé biochimiquement)
autres explications possibles à l'existence de cycles de contraction déphosphorylés :
• modulation par caldesmone (CD) et calponine (CP), protéines associées au filament fin
• protéine Rho et MLC17 : contraction sans phosphorylation*

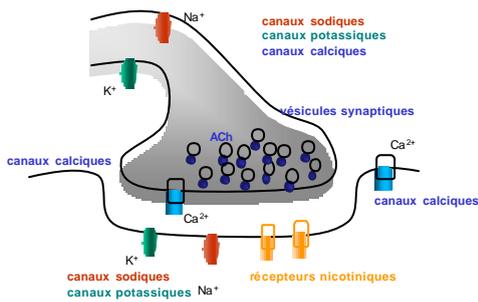
Le couplage excitation-contraction structures impliquées

structure impliquée dans l'élévation de la $[Ca^{2+}]_i$



Le couplage excitation-contraction structures impliquées

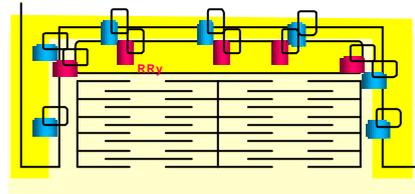
jonction neuromusculaire



Le couplage excitation-contraction structures impliquées

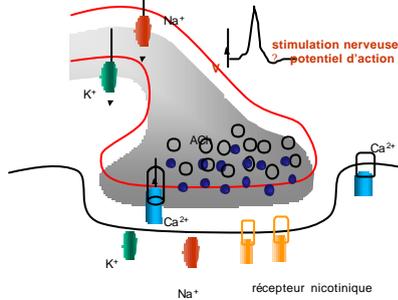
Tubule T et réticulum sarcoplasmique

VOC : canaux calciques de la MP dépendant du potentiel (voltage-operated channel)
RRy : canaux calciques du RS sensibles à la ryanodine activés par élévation de la $[Ca^{2+}]_i$ couplage aux VOC



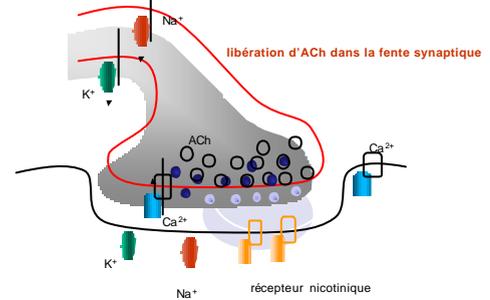
Le couplage excitation-contraction mécanismes

excitation-contraction



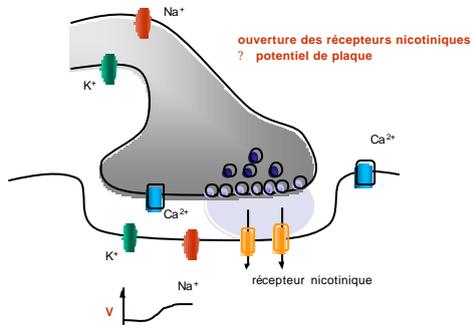
Le couplage excitation-contraction mécanismes

excitation-contraction



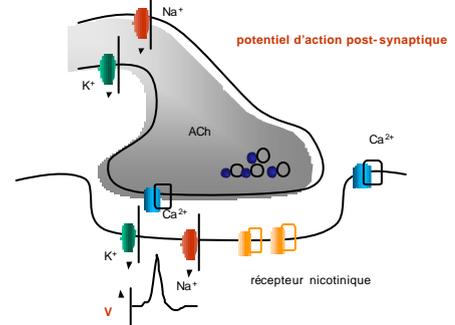
Le couplage excitation-contraction ————— mécanismes

excitation-contraction



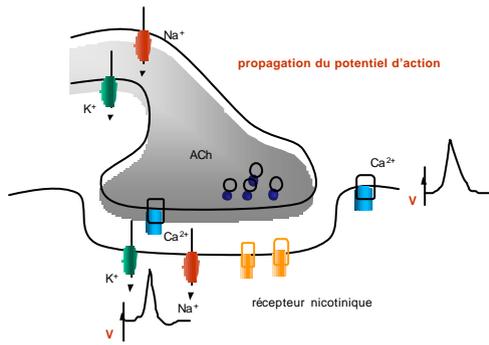
Le couplage excitation-contraction ————— mécanismes

excitation-contraction



Le couplage excitation-contraction ————— mécanismes

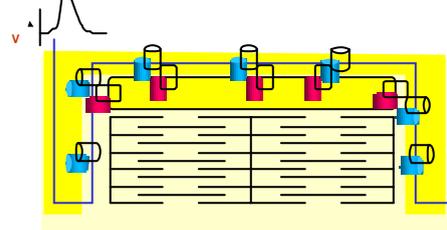
excitation-contraction



Le couplage excitation-contraction ————— mécanismes

excitation-contraction

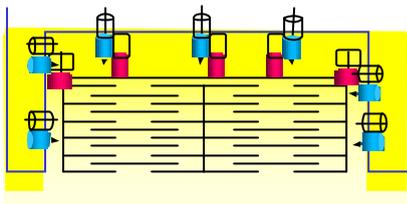
potentiel d'action ? ouverture des VOC



Le couplage excitation-contraction ————— mécanismes

excitation-contraction

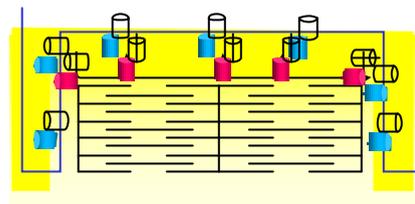
stimulation ? potentiel d'action ? ouverture des VOC
? entrée de Ca²⁺ dans la cellule



Le couplage excitation-contraction ————— mécanismes

excitation-contraction

stimulation ? potentiel d'action ? ouverture des VOC
? entrée de Ca²⁺ dans la cellule
? ouverture des R Ry

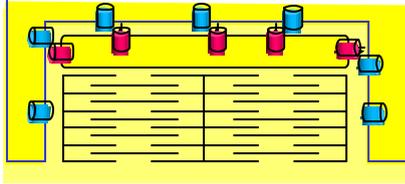


muscle squelettique : couplage direct des R Ry aux VOC
muscle cardiaque : R Ry activés par l'élévation de la [Ca²⁺]_i

Le couplage excitation-contraction ————— mécanismes

excitation-contraction

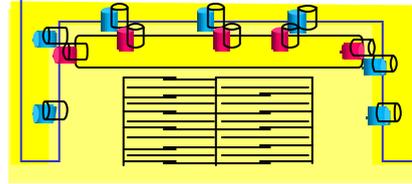
- stimulation ? potentiel d'action ? ouverture des VOC
 ? entrée de Ca^{2+} dans la cellule
 ? ouverture des RRY
 ? libération de calcium du RS



Le couplage excitation-contraction ————— mécanismes

excitation-contraction

- stimulation ? potentiel d'action ? ouverture des VOC
 ? entrée de Ca^{2+} dans la cellule
 ? ouverture des RRY
 ? libération de calcium du RS
 ? contraction



Le couplage excitation-contraction ————— muscle cardiaque & muscle lisse

muscle cardiaque

- jonctions serrées : transmission du PA de cellule à cellule
 libération du Ca^{2+} du RS :
 pas de couplage direct VOGRRy
 activation des RRY par l'élévation initiale de Ca^{2+} due aux VOC
 modulation neurohormonale de l'intensité de la contraction

Le couplage excitation-contraction ————— muscle cardiaque & muscle lisse

muscle lisse

- muscle mono-unitaire
 jonctions serrées : transmission du PA de cellule à cellule
 muscle pluri-unitaire
 dépolarisation mais pas de potentiel d'action
 couplage électromécanique
 stimulation ? dépolarisation membranaire (avec ou sans PA)
 ? ouverture des canaux calciques sensibles au potentiel
 ? ouverture des VOC et des RRY
 couplage pharmacomécanique
 stimulation ? activation d'un récepteur membranaire
 ? réaction enzymatique et production de messagers intercellulaires
 ? libération de Ca^{2+} du RS et/ou influx de Ca^{2+} extracellulaire
 modulation neurohormonale de l'intensité de la contraction

biophysique de la contraction ————— les différents types de contraction

les différents types de contraction

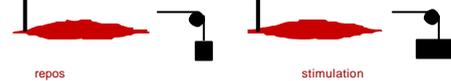
contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante



biophysique de la contraction ————— les différents types de contraction

les différents types de contraction

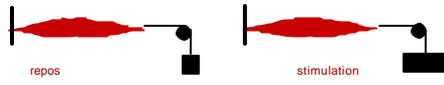
contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante



biophysique de la contraction — les différents types de contraction

les différents types de contraction

contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante



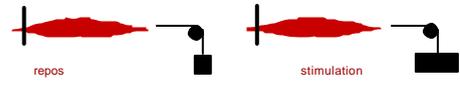
contraction isotonique : contraction qui s'effectue à charge constante



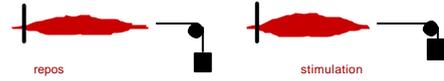
biophysique de la contraction — les différents types de contraction

les différents types de contraction

contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante



contraction isotonique : contraction qui s'effectue à charge constante



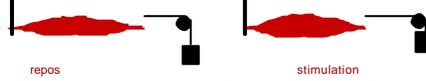
biophysique de la contraction — les différents types de contraction

les différents types de contraction

contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante



contraction isotonique : contraction qui s'effectue à charge constante



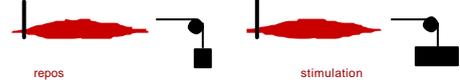
contraction auxotonique : contraction qui s'effectue à charge et longueur variable



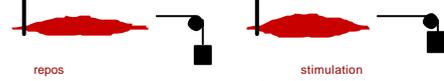
biophysique de la contraction — les différents types de contraction

les différents types de contraction

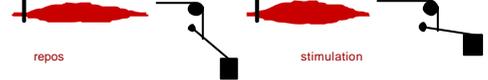
contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante



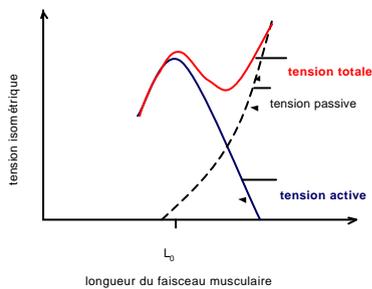
contraction isotonique : contraction qui s'effectue à charge constante



contraction auxotonique : contraction qui s'effectue à charge et longueur variable

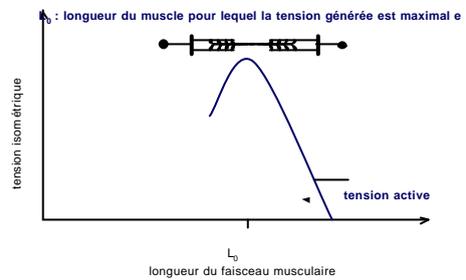


biophysique de la contraction — relation longueur-tension



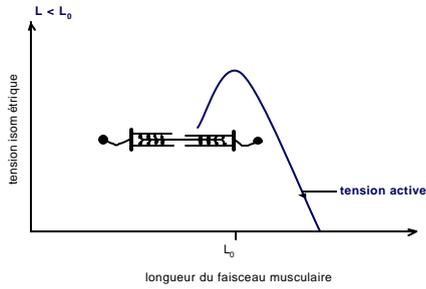
L_0 : longueur du muscle pour lequel la tension générée est maximale

biophysique de la contraction — relation longueur-tension



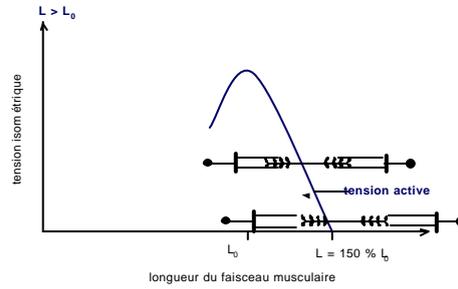
les éléments élastiques sont sous tension
toutes les têtes de myosine peuvent se lier à l'actine

biophysique de la contraction — relation longueur-tension



les éléments élastiques ne sont pas sous tension

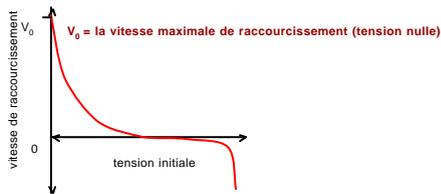
biophysique de la contraction — relation longueur-tension



toutes les têtes de myosine ne peuvent pas se lier à l'actine

biophysique de la contraction — relation tension-vitesse de raccourcissement

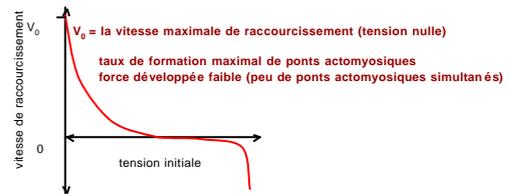
vitesse de raccourcissement V dépend de la tension passive exercée sur le muscle



V : dépend du nombre de sarcomères en série
? V exprimée par longueur de demi-sarcomère

biophysique de la contraction — relation tension-vitesse de raccourcissement

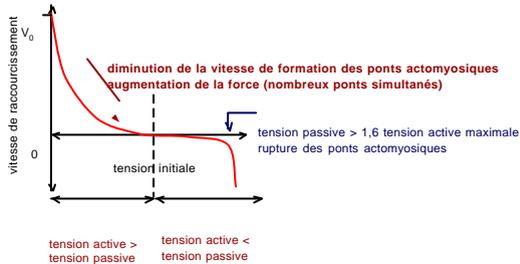
vitesse de raccourcissement V dépend de la tension passive exercée sur le muscle
vitesse d'hydrolyse de l'ATP dépend de la tension passive exercée sur le muscle



V : dépend du nombre de sarcomères en série
? V exprimée par longueur de demi-sarcomère

biophysique de la contraction — relation tension-vitesse de raccourcissement

vitesse de raccourcissement V dépend de la tension passive exercée sur le muscle



biophysique de la contraction — force, travail, puissance

force

proportionnelle à la densité de ponts actomyosiniques
densité des filaments contractiles par surface de section musculaire = constante

la longueur d'un sarcomère = constante (2,5 μm)

? proportionnelle à l'aire de section d'un muscle
39,3 à 49 N/cm^2

? force a = force b = $\frac{1}{2}$ force c

muscle étracteur de la moule
sarcomère = 25 μm
force maximale générée = 100 N/cm^2

biophysique de la contraction ————— force, travail, puissance

travail

travail = force x distance de déplacement

? travail a = 1/2 travail b = 1/2 travail c

travail maximal : généré pour une force équivalent à 40 % de la force maximale
(si la force augmente, le raccourcissement diminue)

biophysique de la contraction ————— force, travail, puissance

puissance

puissance = force x vitesse de raccourcissement
puissance = travail / temps

? puissance a = puissance b

sport et muscle ————— les différentes types de fibres

fibres lentes, fibres rapides

vitesse de contraction : cinétique de l'activité ATPasique de la myosine

homme : 3 types de fibres musculaires squelettiques
3 isoformes de la myosine
I : fibres lentes
IIa et IIx : fibres rapides (IIx > IIa)

sport et muscle ————— les différentes types de fibres

fibres lentes, fibres rapides

facteurs génétiques

plasticité musculaire

entraînement : IIx ? IIa + hypertrophie musculaire
exercice intensif : I ? IIa

innervation : paralysie ? disparition des fibres lentes

âge : fibres rapides ? fibres lentes

fibres (µm²/fibre)	I	IIa	IIx
marathoniens	4800	4500	4600
sprinters	5000	7300	3900