



UNIVERSITÉ  
BORDEAUX  
S E G A L E N

Licence Biologie

UE physiologie animale

# *La contraction musculaire et le mouvement*

Étienne Roux

*Adaptation cardiovasculaire à l'ischémie INSERM U 1034  
UFR des Sciences de la Vie Université Bordeaux Segalen*

*contact: [etienne.roux@u-bordeaux2.fr](mailto:etienne.roux@u-bordeaux2.fr)*

*support de cours :*

*plateforme pédagogique l'UFR des sciences de la Vie  
[e-fisio.net](http://e-fisio.net)*

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 chimiomécanique

NB : il existe des systèmes de transduction chimiomécanique 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 chimiomécanique

### ● 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 ( $\leftrightarrow$  énergie)  
                              force x longueur de déplacement
  
- puissance                watt (W) = N.m/sec  
                              travail/temps = force/vitesse
  
- tension                    N/m<sup>2</sup>  
                              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 ?

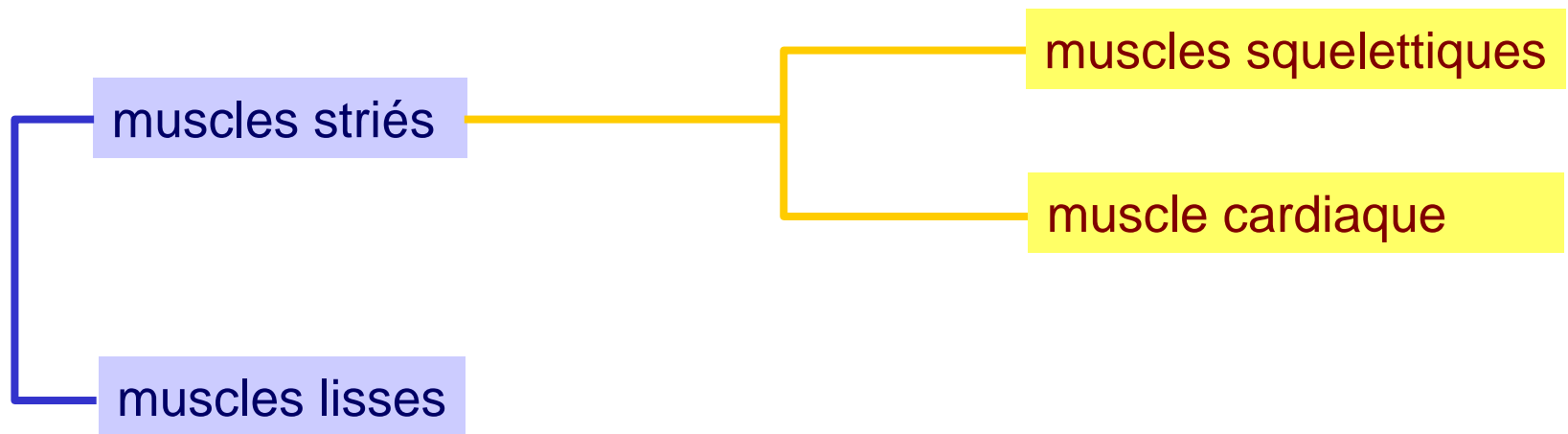
### ● contrôle de l'activité musculaire par le système nerveux

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

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

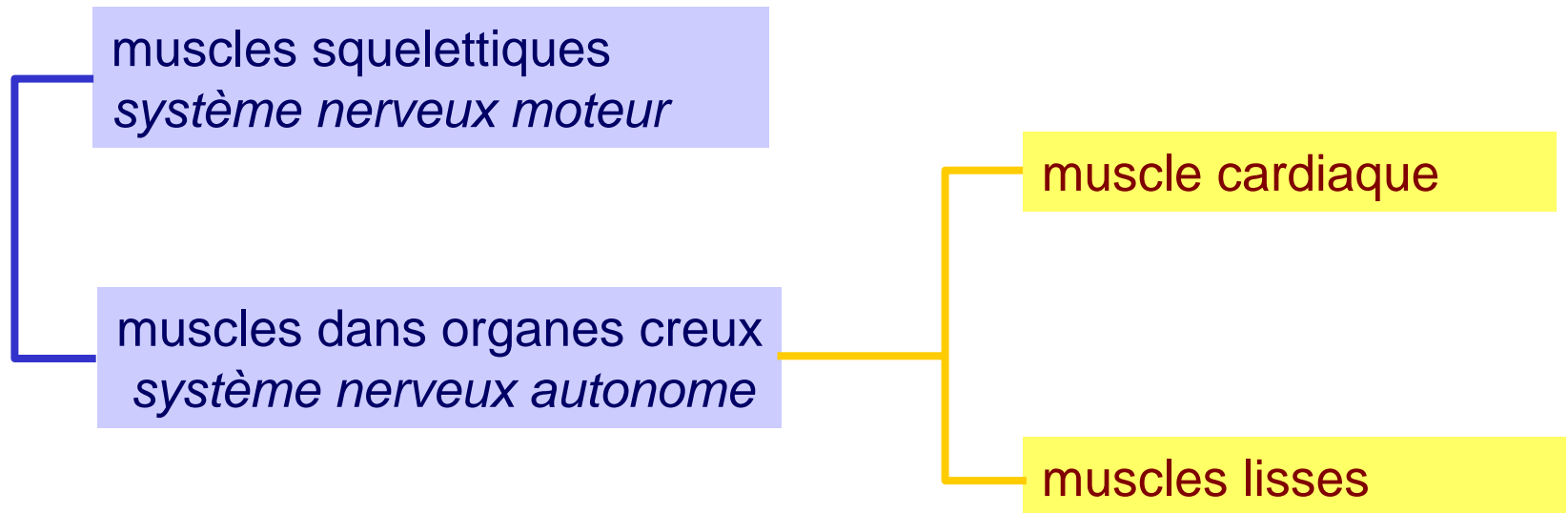
## Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

### • classification anatomo-histologique



## Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

### • classification fonctionnelle



# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ l'appareil contractile : le muscle strié

## fibre musculaire squelettique

fibres musculaires striées squelettiques : grandes cellules plurinucléées

Ø 0,01 à 0,1 mm

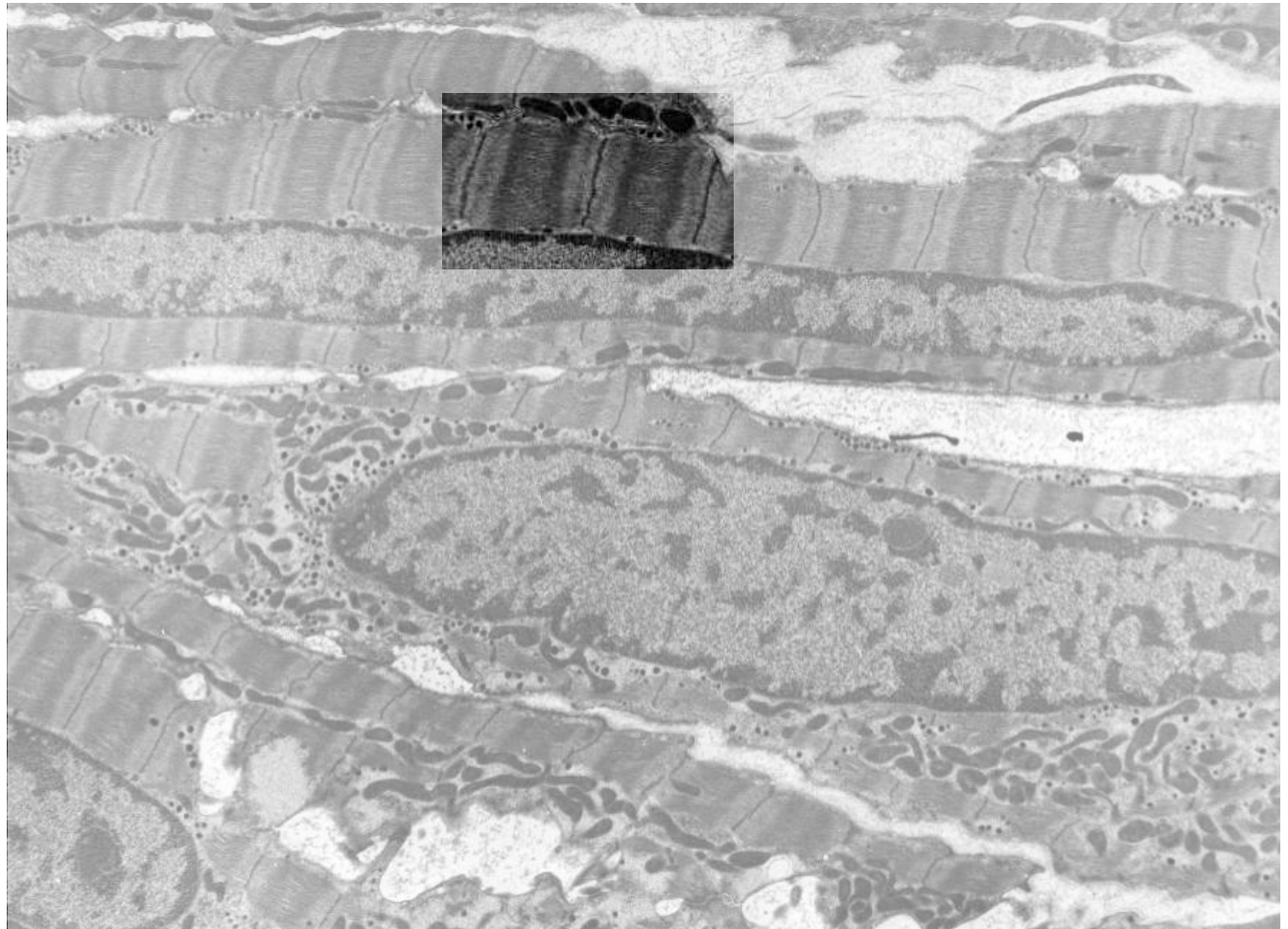
L : très variable



# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ l'appareil contractile : le muscle strié

## fibre musculaire squelettique

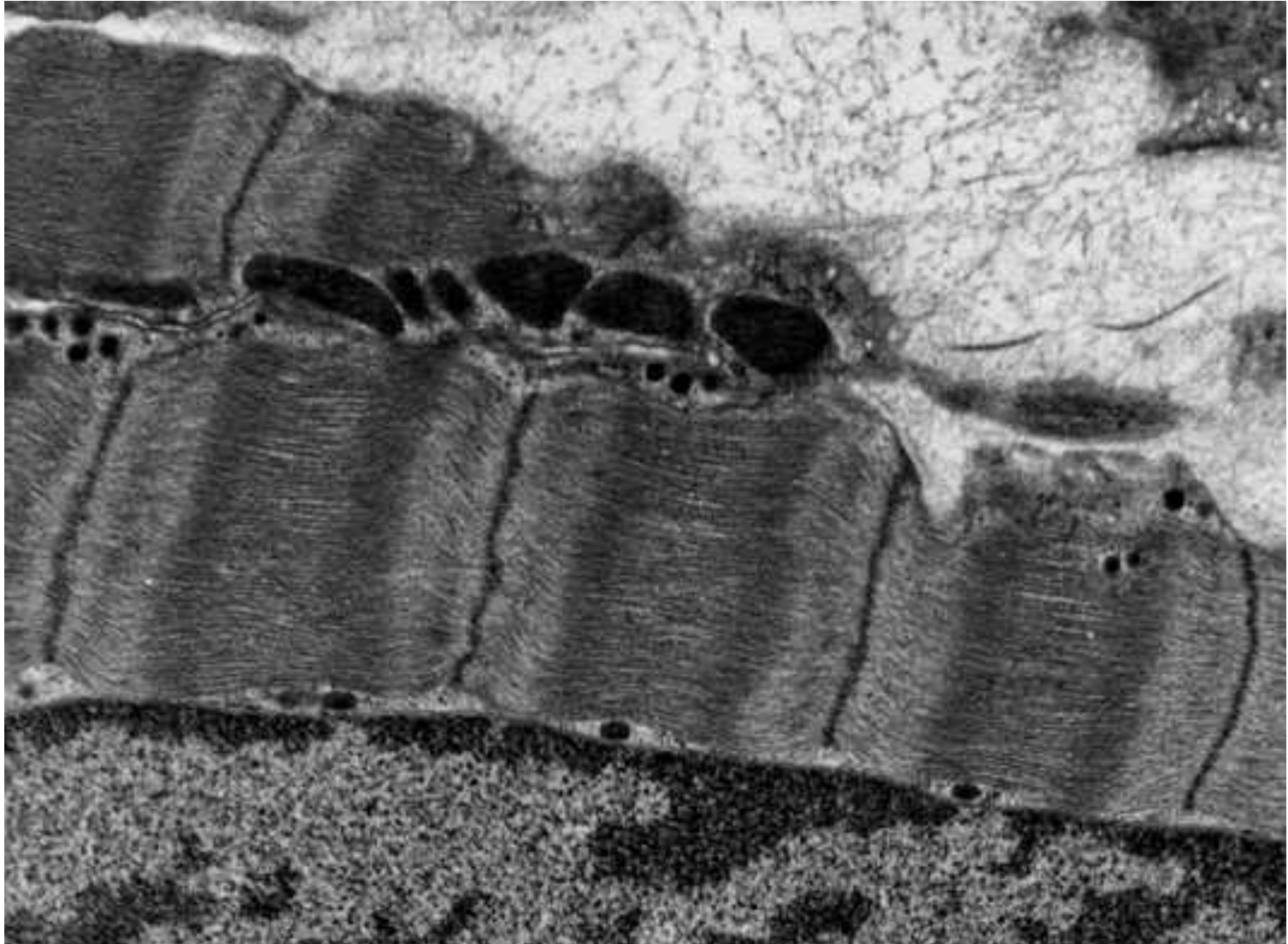
l'organisation en sarcomères



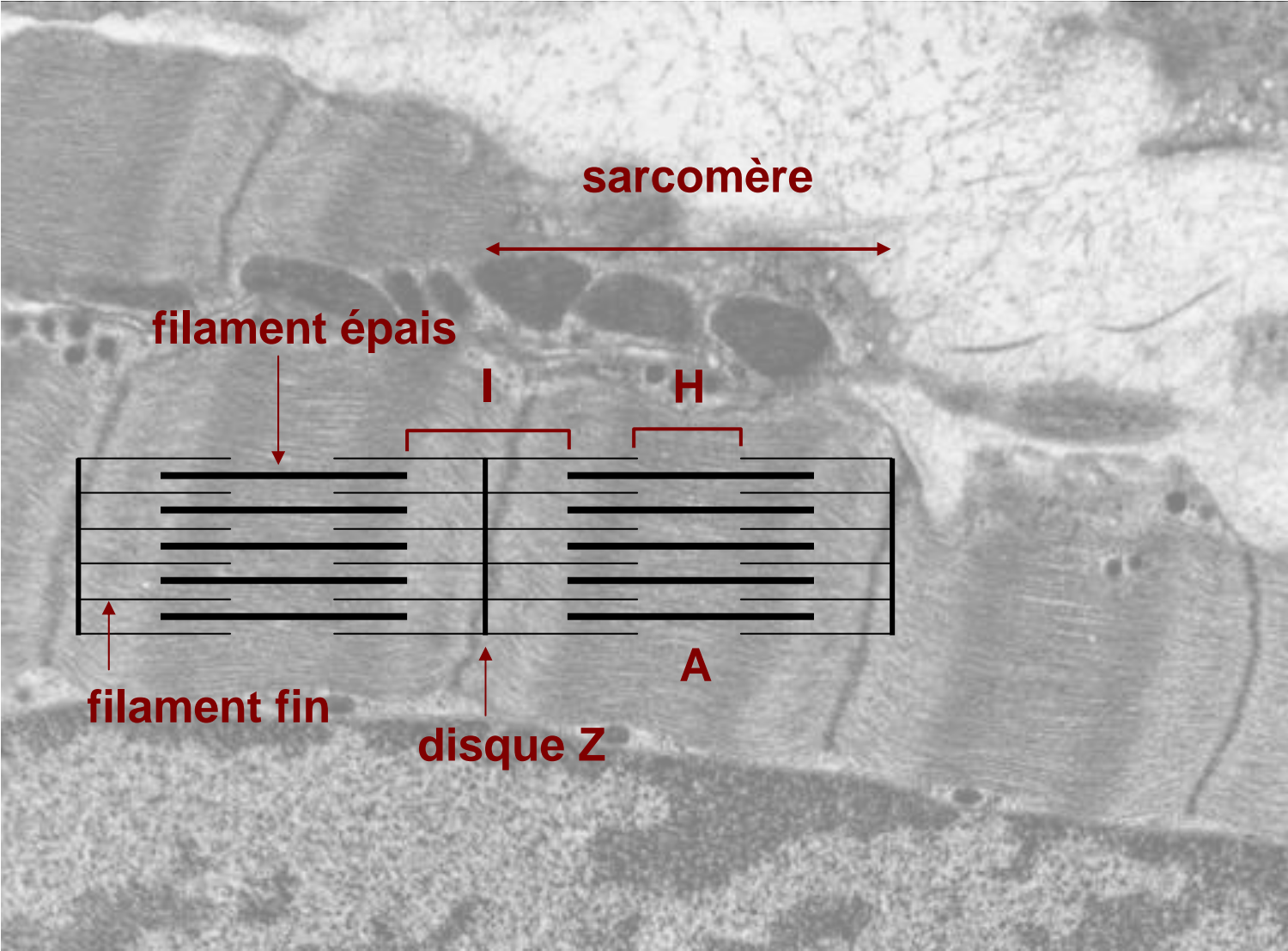


# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ l'appareil contractile : le muscle strié

## l'organisation du sarcomère



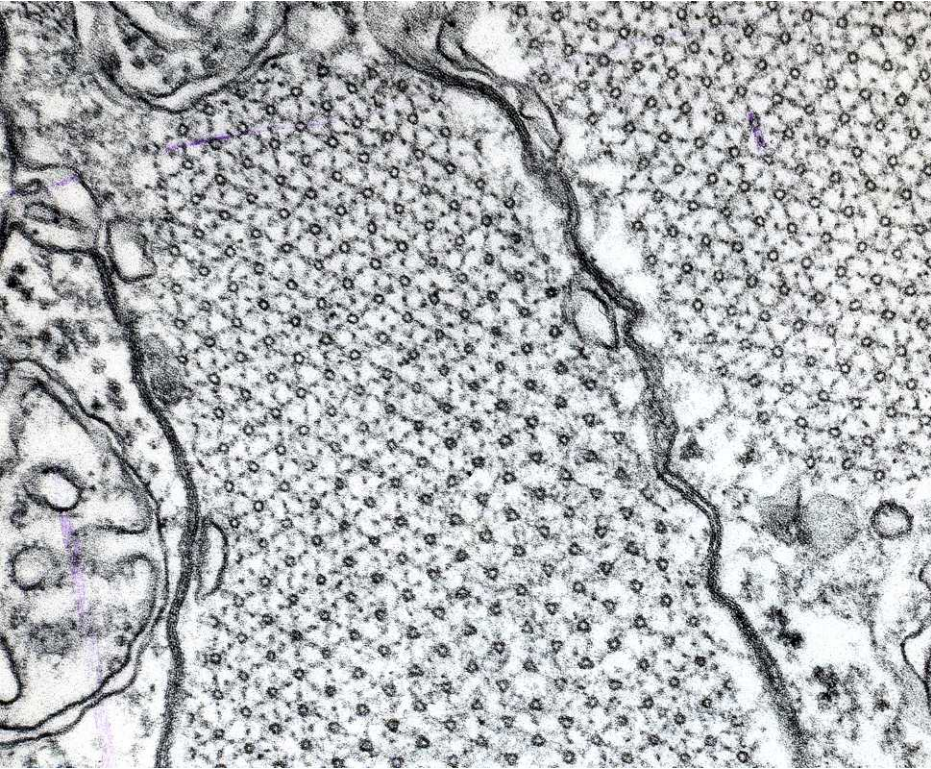
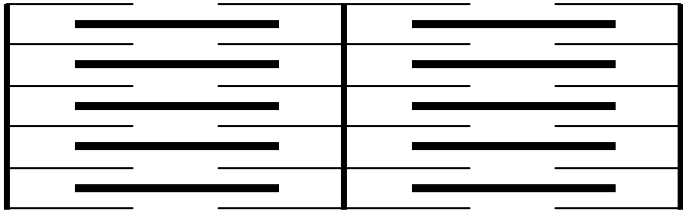
l'organisation du sarcomère



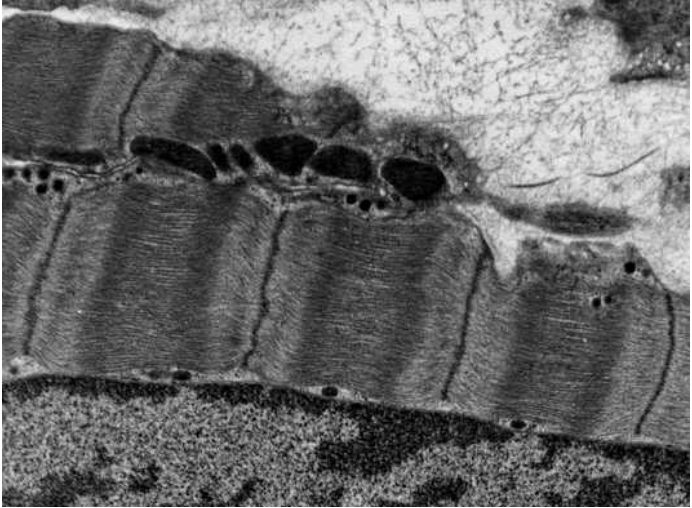


# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ l'appareil contractile : le muscle strié

## l'organisation du sarcomère



coupe transversale

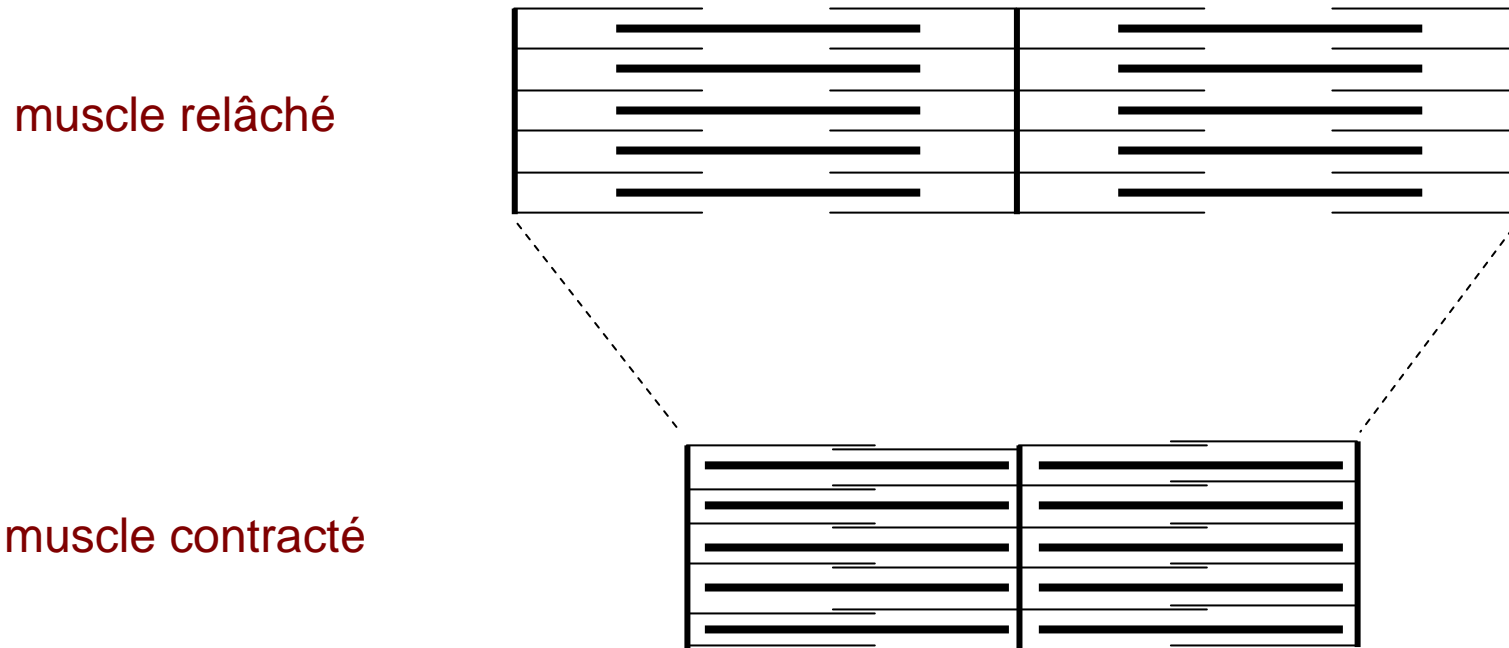


coupe longitudinale



## l'organisation du sarcomère : la contraction

raccourcissement du sarcomère sans raccourcissement des filaments

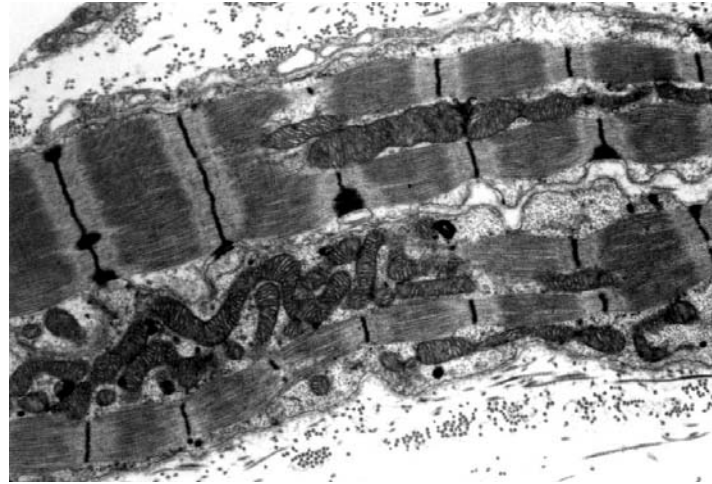


contraction : glissement des filaments fins et épais les uns sur les autres

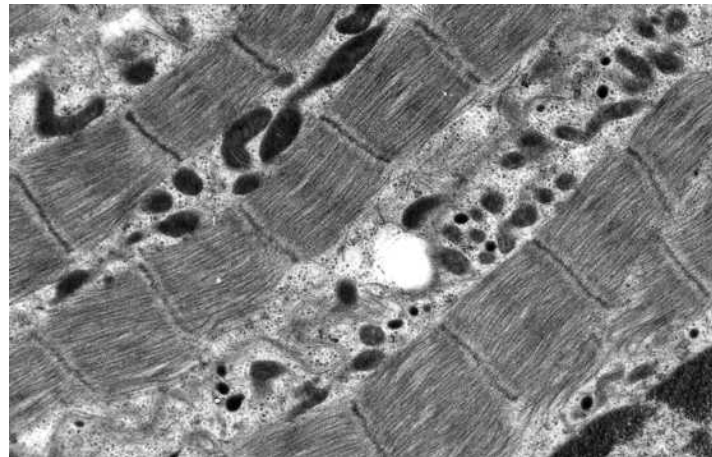
## l'organisation du sarcomère : la contraction

raccourcissement du sarcomère sans raccourcissement des filaments

muscle relâché



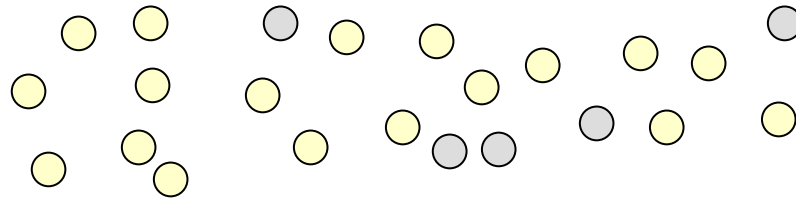
muscle contracté



## 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

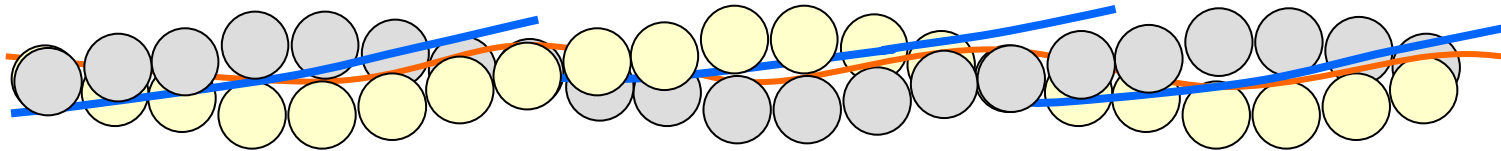


## les filaments fins

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

tropomyosine : se fixe dans le sillon central.

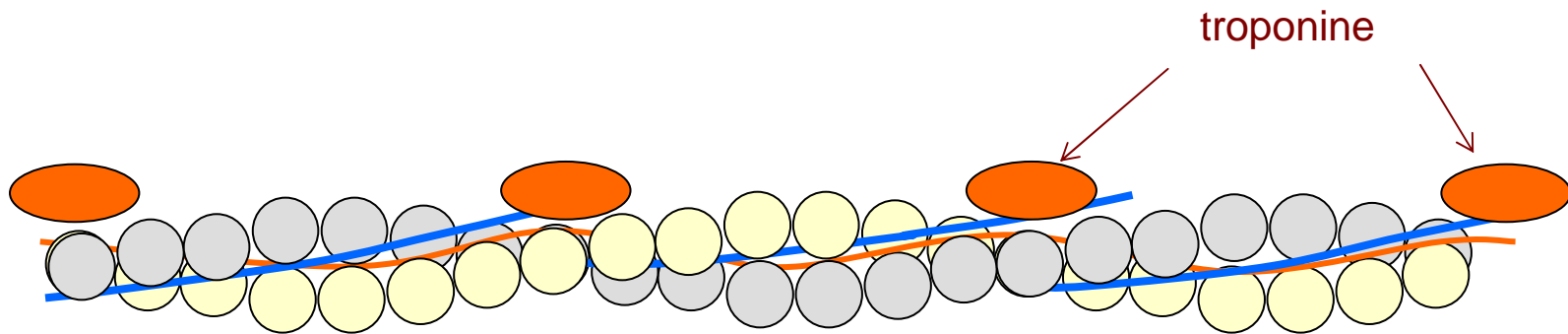
Chaque molécule de tropomyosine s'étend sur environ 7 monomères d'actine.



**filament fin de muscle strié**

## les filaments fins

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

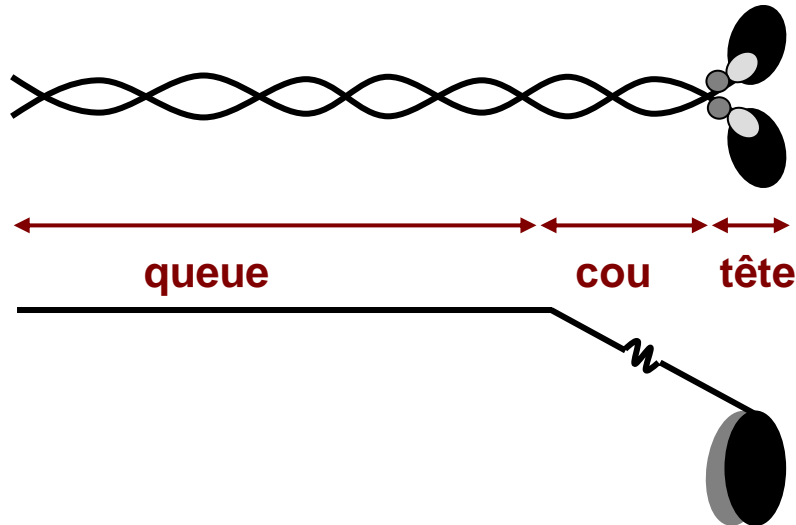


**filament fin de muscle strié**

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

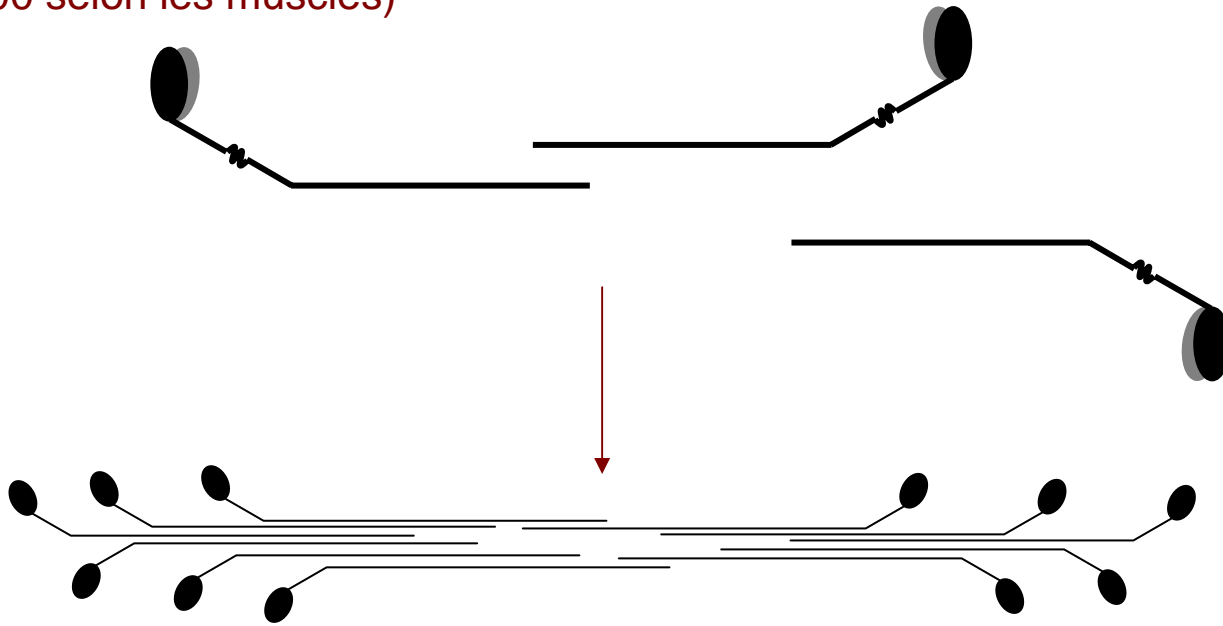
## les filaments épais

myosine : molécule constituée de 6 polypeptides

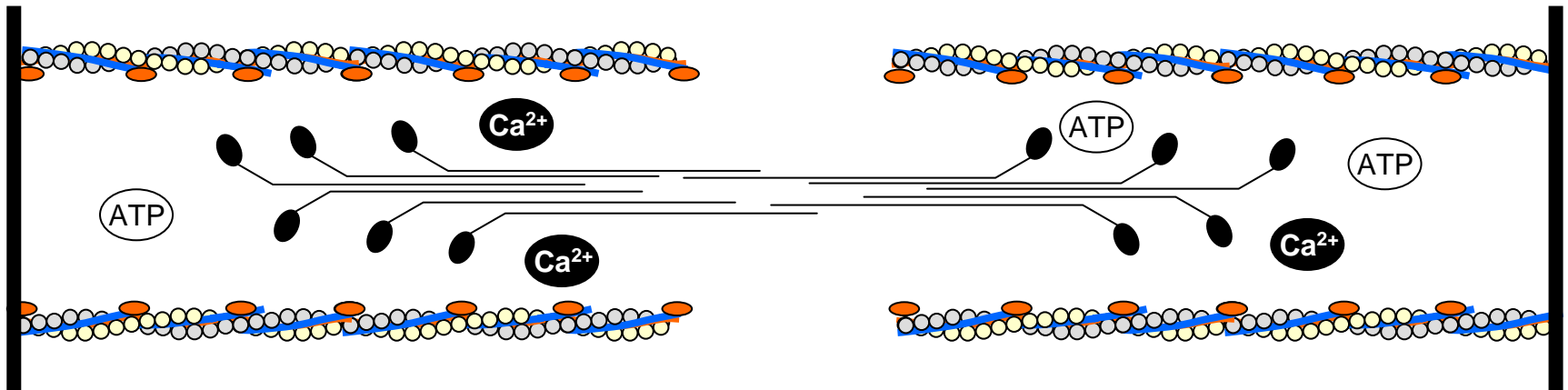


## les filaments épais

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



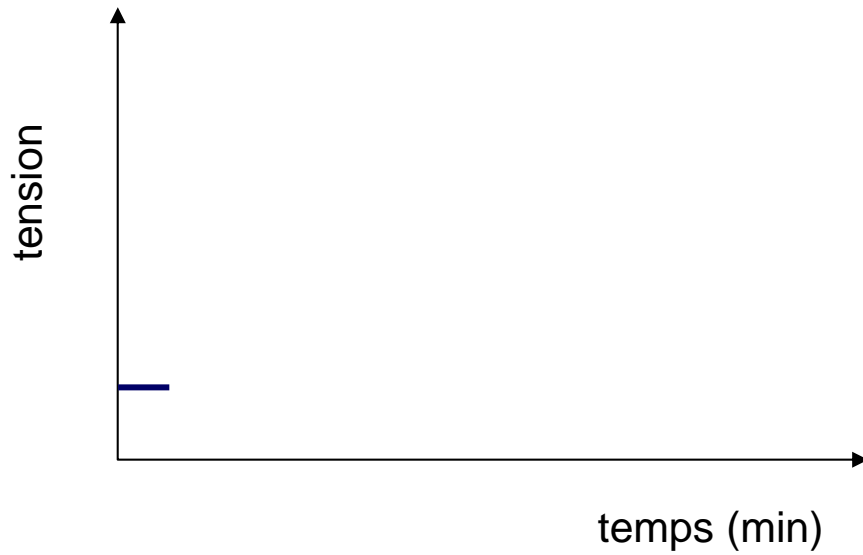
organisation des myofilaments dans le sarcomère



chaînes légères : responsables de l'activité ATPasique.

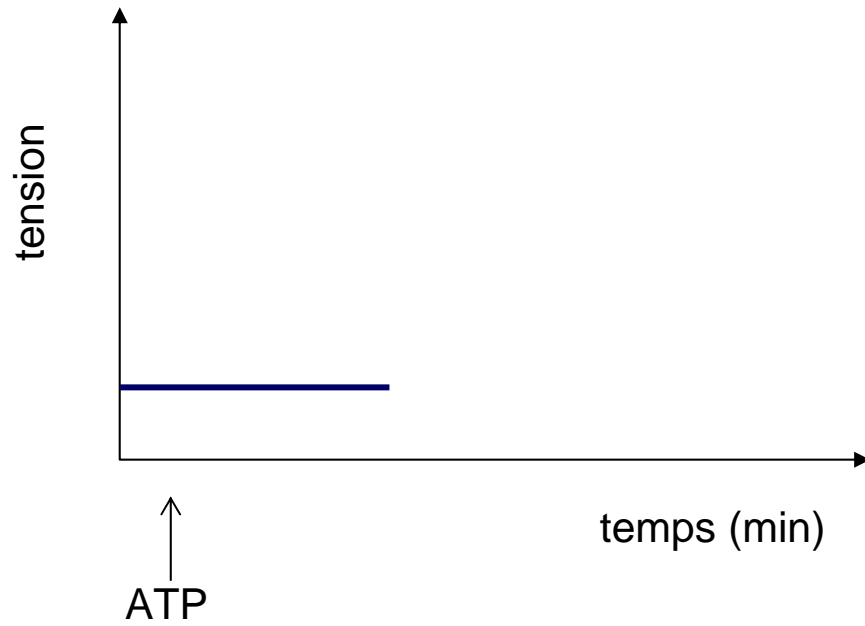
De cette activité ATPasique dépend la vitesse du cycle de contraction ainsi que la consommation d'ATP.



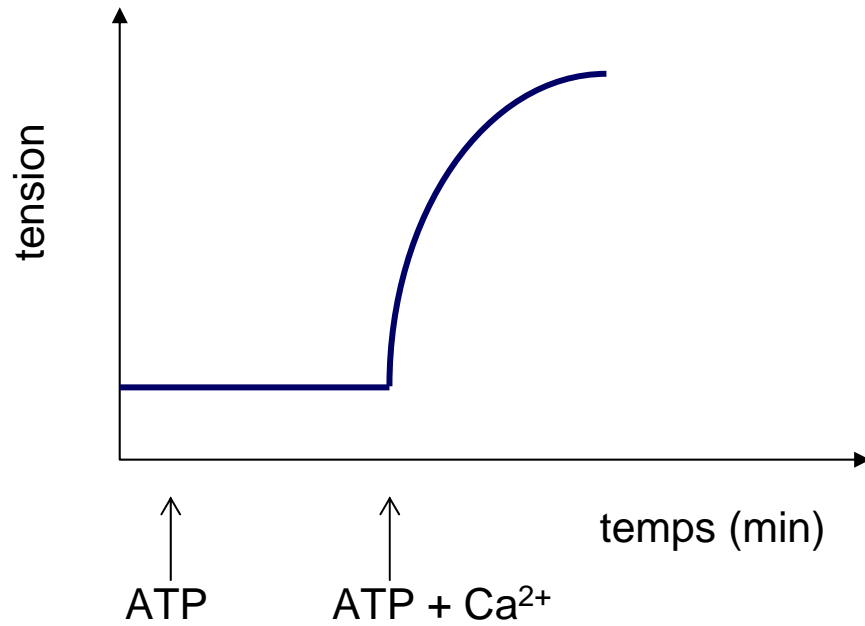


**contraction d'une fibre musculaire perméabilisée**

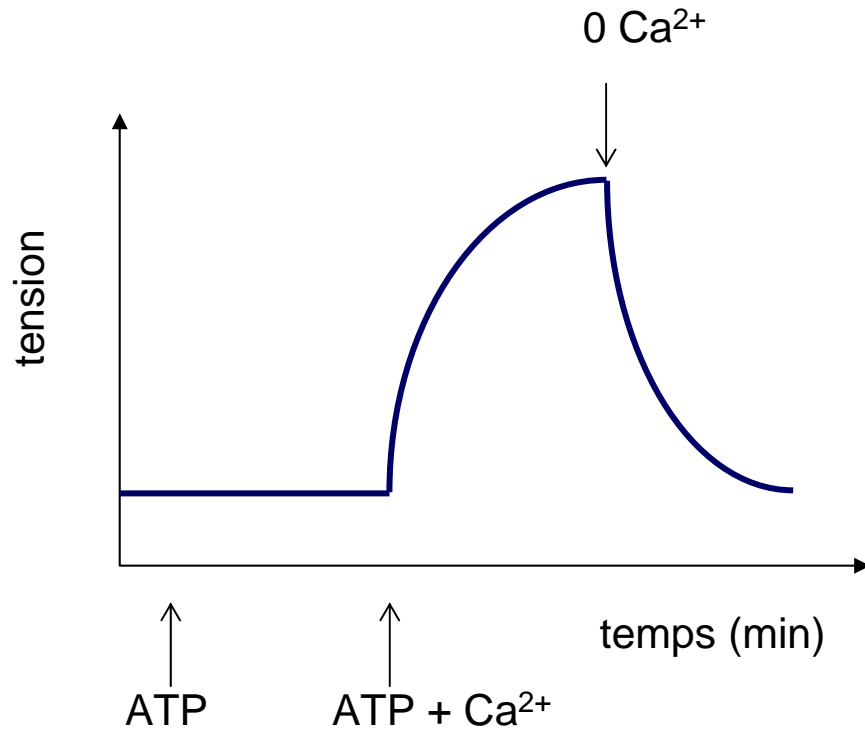
perméabilisation de la membrane plasmique : le milieu intracellulaire équivaut au milieu extracellulaire



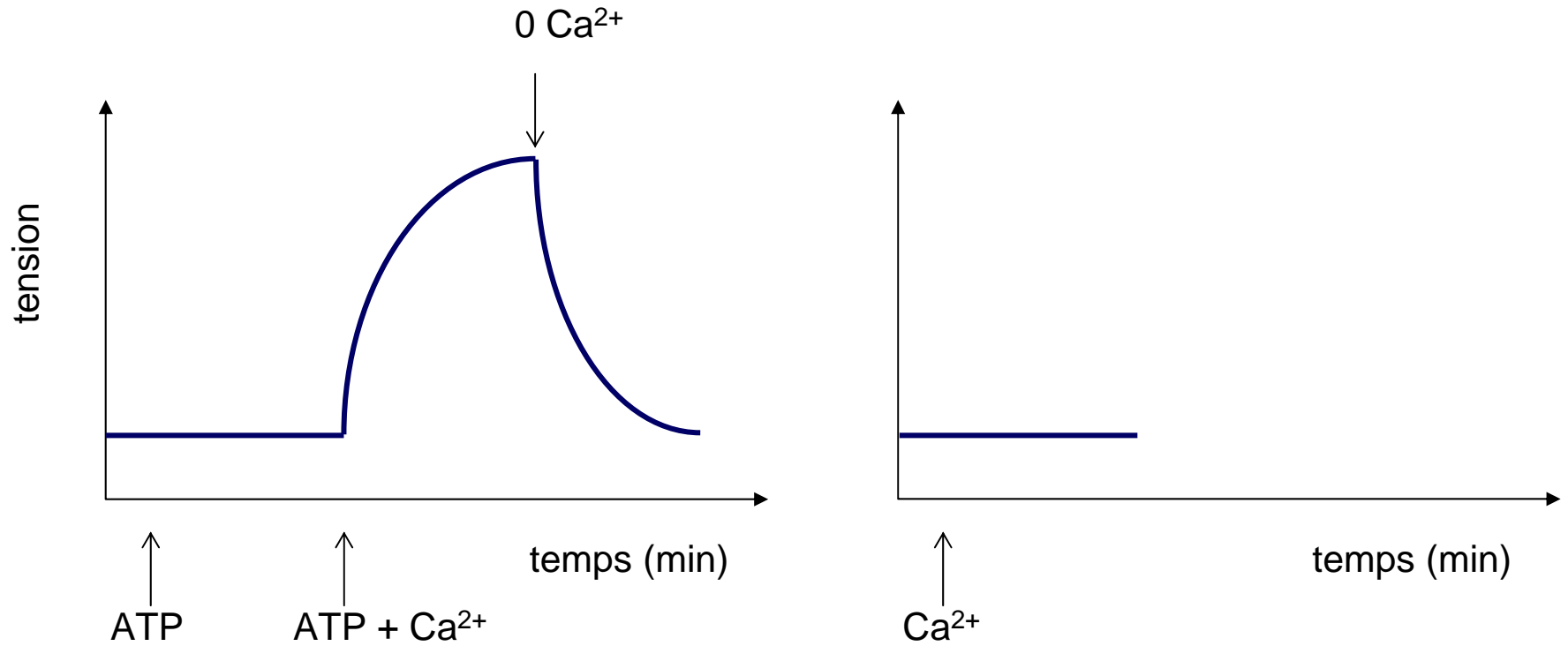
**contraction d'une fibre musculaire perméabilisée**



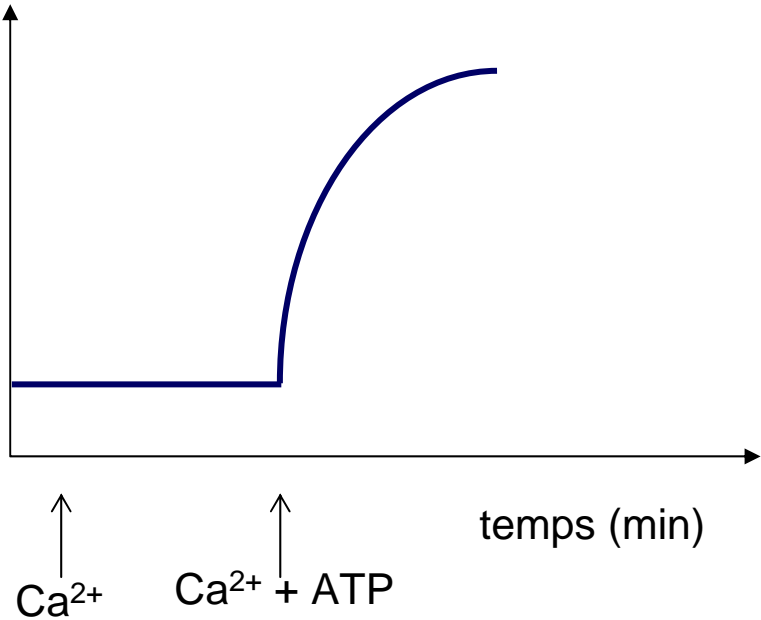
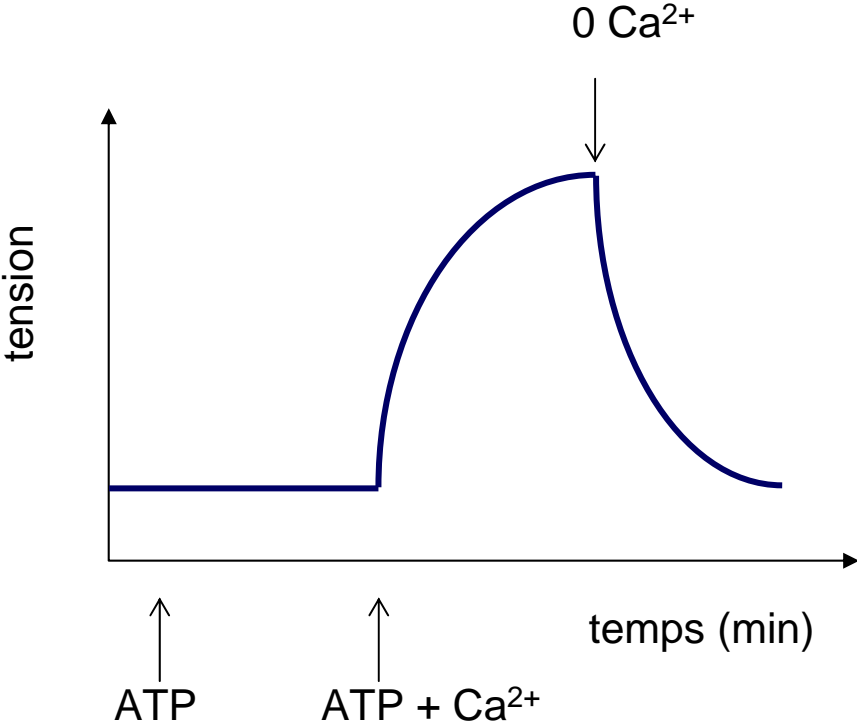
**contraction d'une fibre musculaire perméabilisée**



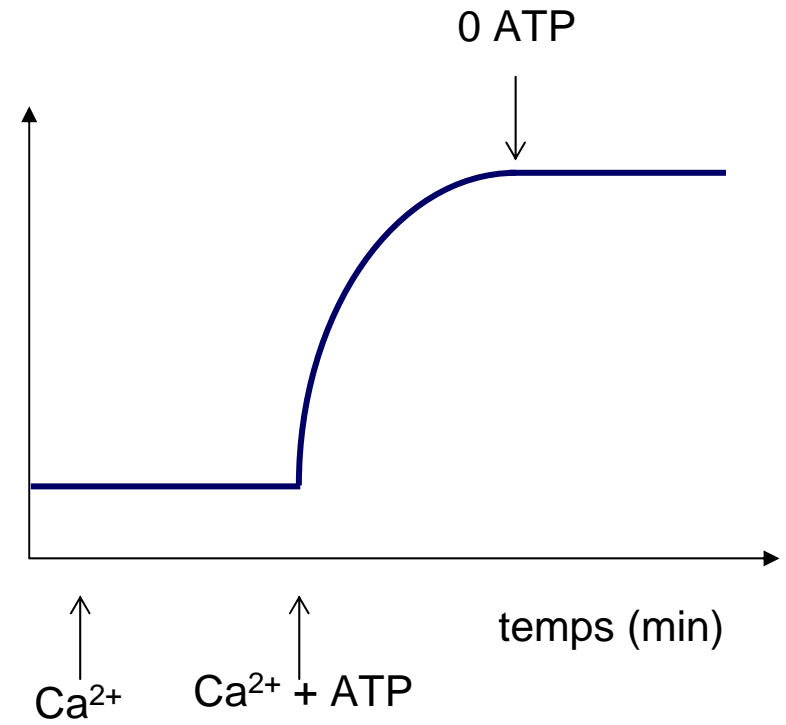
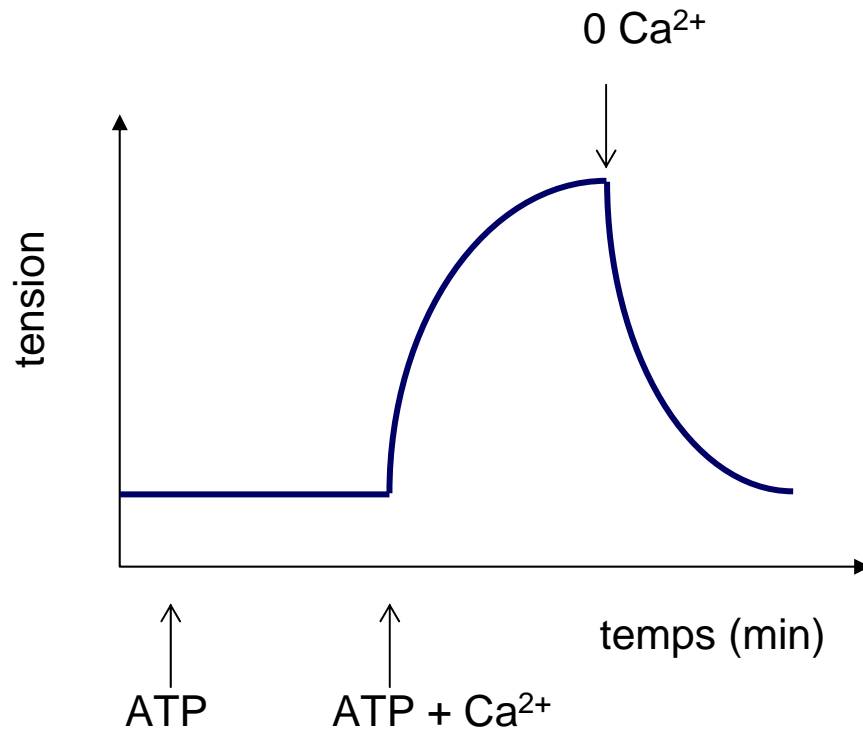
**contraction d'une fibre musculaire perméabilisée**



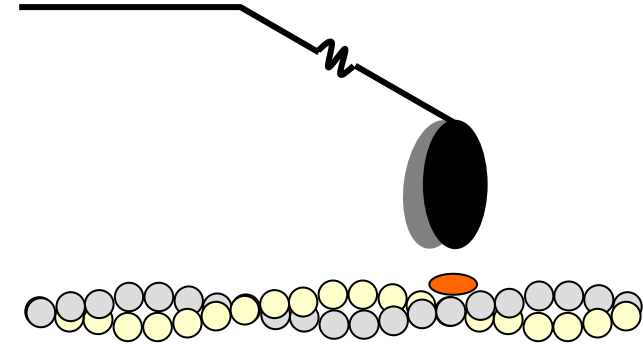
**contraction d'une fibre musculaire perméabilisée**



**contraction d'une fibre musculaire perméabilisée**



**contraction d'une fibre musculaire perméabilisée**

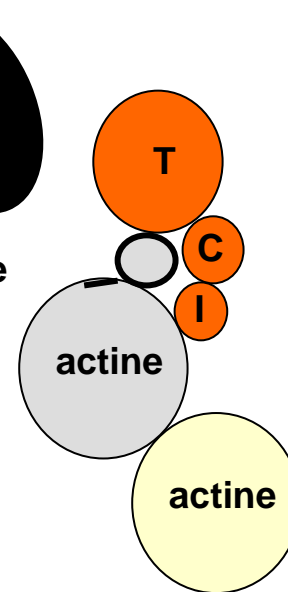
mécanisme d'action du  $\text{Ca}^{2+}$ absence de  $\text{Ca}^{2+}$ 

myosine

tropomyosine

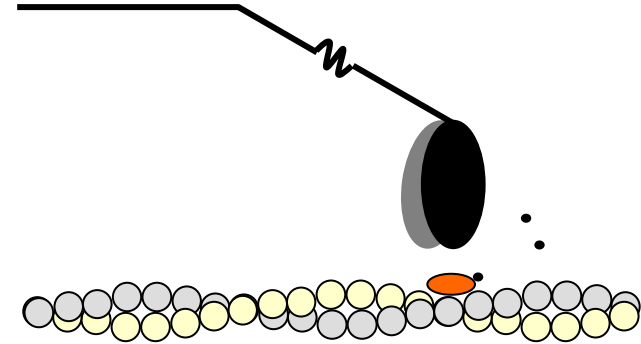
troponine  
(3 sous-unités)

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





mécanisme d'action du  $\text{Ca}^{2+}$



présence de  $\text{Ca}^{2+}$

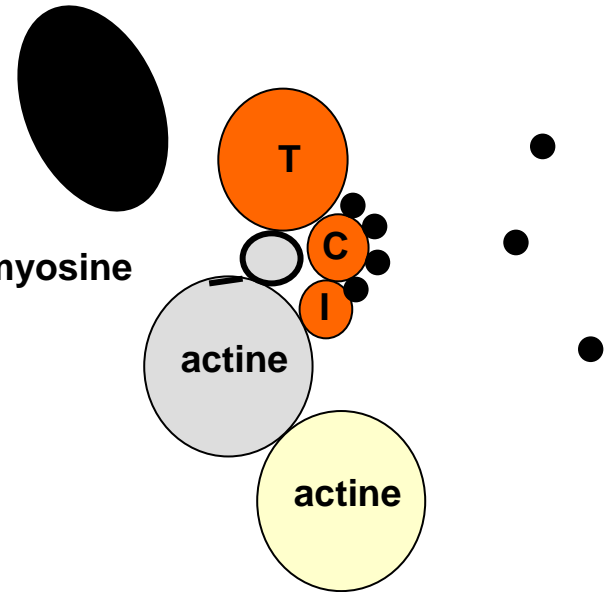
myosine

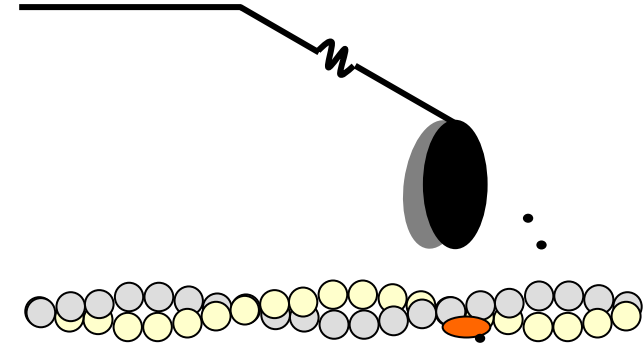
tropomyosine

actine

actine

→ fixation du  $\text{Ca}^{2+}$  sur la troponine C



mécanisme d'action du  $\text{Ca}^{2+}$ présence de  $\text{Ca}^{2+}$ 

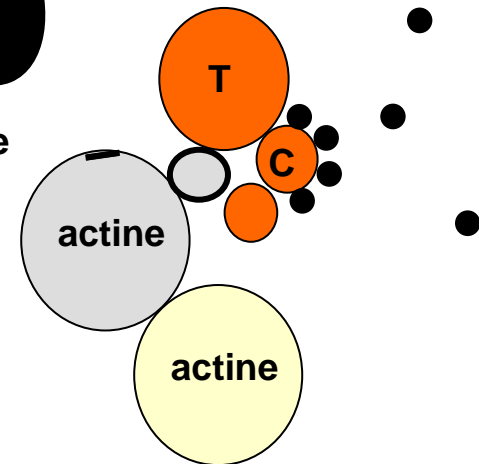
myosine

tropomyosine

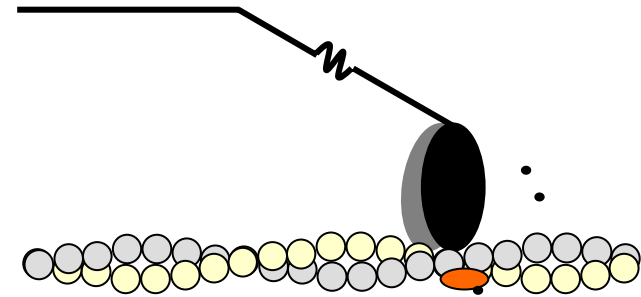
actine

actine

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



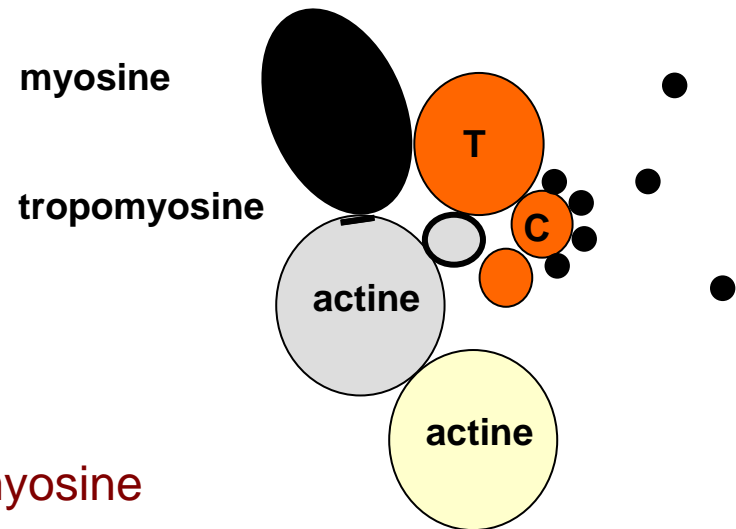
mécanisme d'action du  $\text{Ca}^{2+}$



formation du pont actomyosique

présence de  $\text{Ca}^{2+}$

- fixation du  $\text{Ca}^{2+}$  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  $\text{Ca}^{2+}$

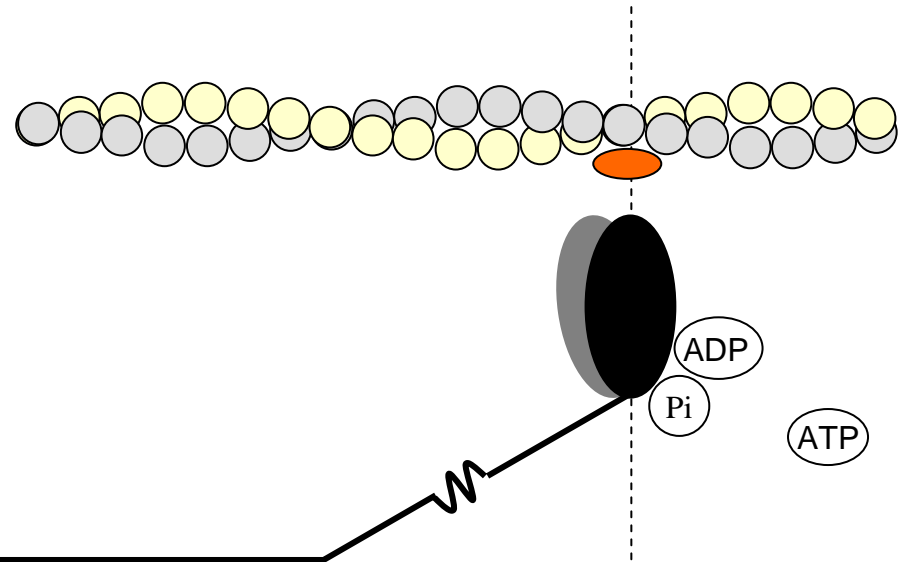
masquage du site de fixation de la myosine

**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  $90^\circ$   
(conformation pour laquelle l'énergie libre est minimale)



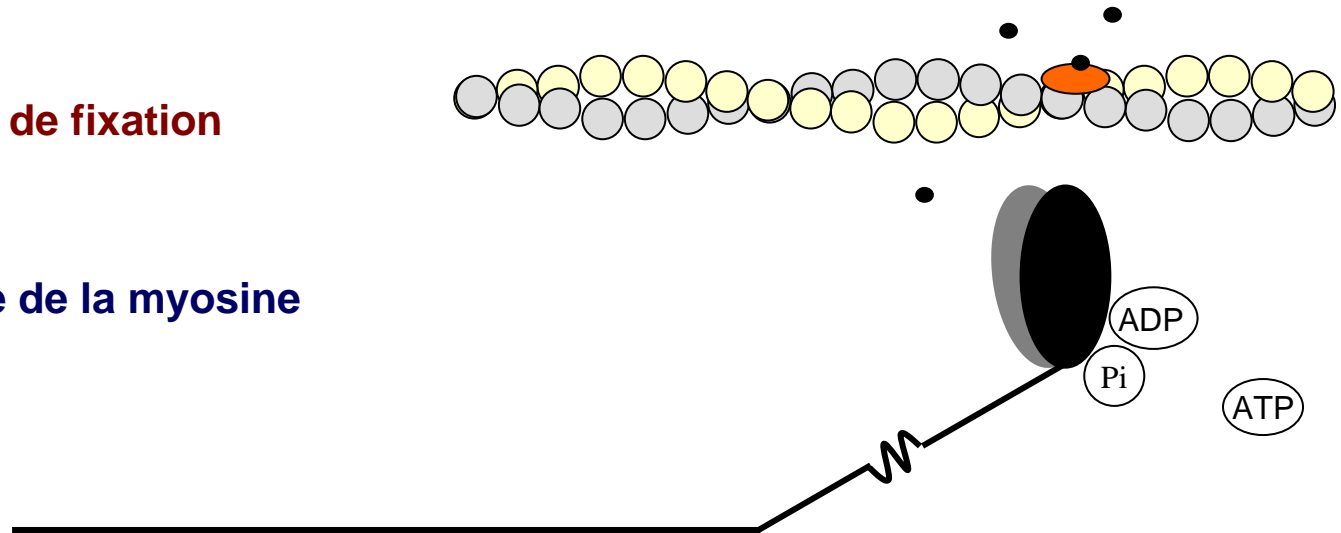
# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de  $\text{Ca}^{2+}$

$\text{Ca}^{2+}$  fixé sur la troponine C  
déplacement de la troponine

**pont actomyosique**  
démasquage du site de fixation

**activité enzymatique de la myosine**



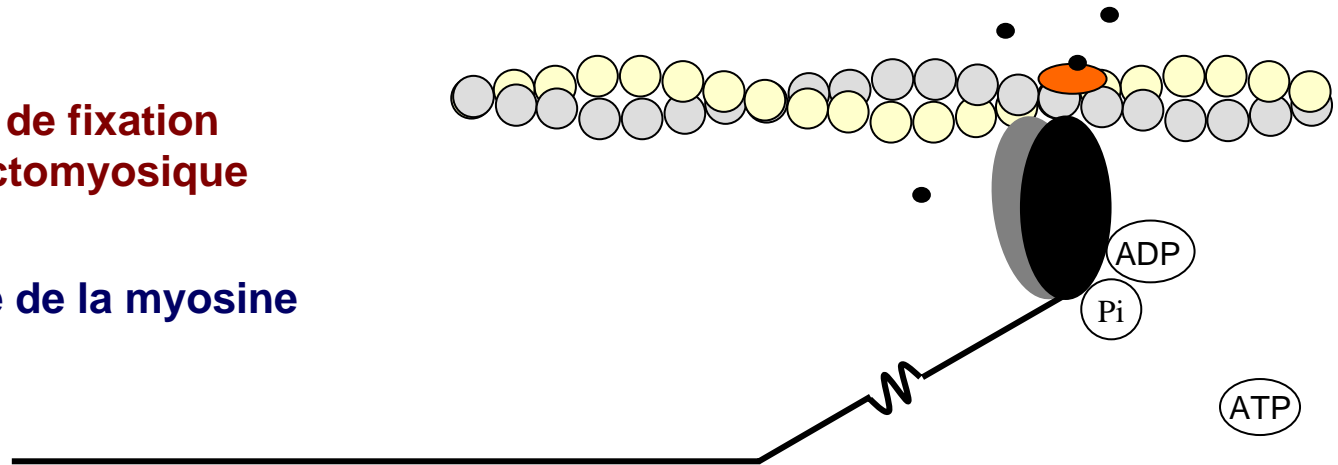
**angle de la tête de myosine avec l'actine**  
**angle de  $90^\circ$**

# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de  $\text{Ca}^{2+}$   
troponine déplacée

pont actomyosique  
démasquage du site de fixation  
formation du pont actomyosique

activité enzymatique de la myosine



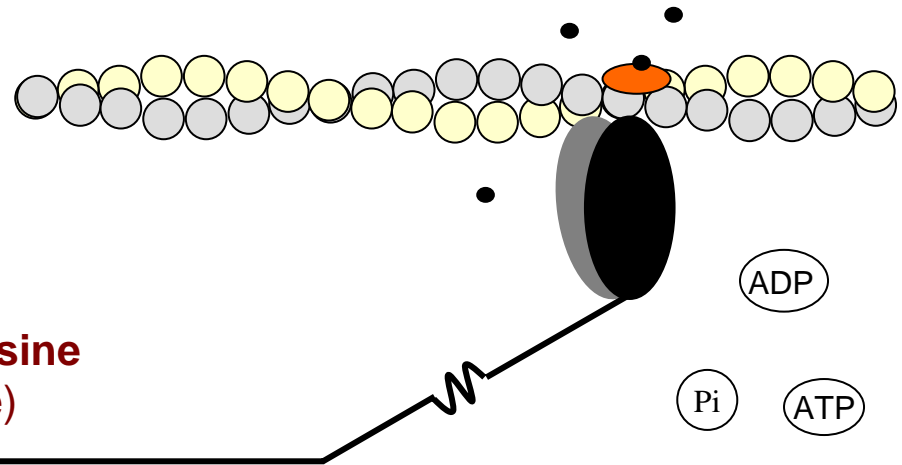
angle de la tête de myosine avec l'actine  
angle de  $90^\circ$

# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de  $\text{Ca}^{2+}$   
troponine déplacée

**pont actomyosique**  
**pont actomyosique formé**

**activité enzymatique de la myosine**  
**l'ADP et Pi 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  $90^\circ$**

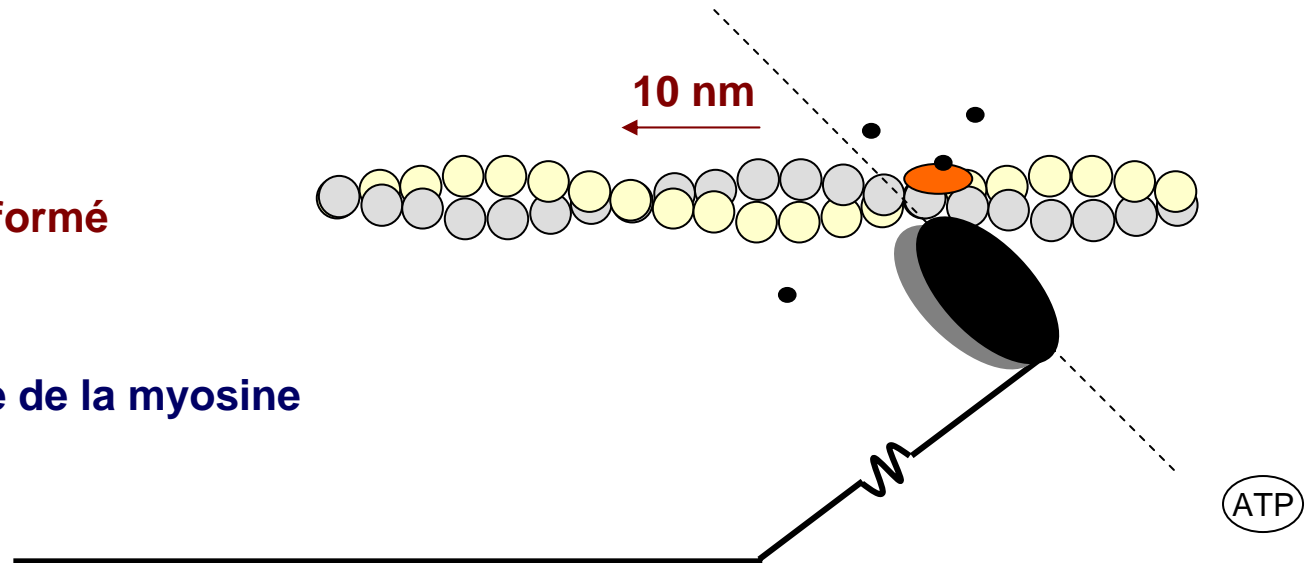


# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de  $\text{Ca}^{2+}$   
troponine déplacée

pont actomyosique  
pont actomyosique formé

activité enzymatique de la myosine  
l'ADP et  $\text{P}_i$  détachés



angle de la tête de myosine avec l'actine

absence d'ADP et de  $\text{P}_i$  :

→ rotation de la tête de myosine angle de  $45^\circ$  (énergie minimum)

→ déplacement du filament d'actine par rapport au filament de myosine

6

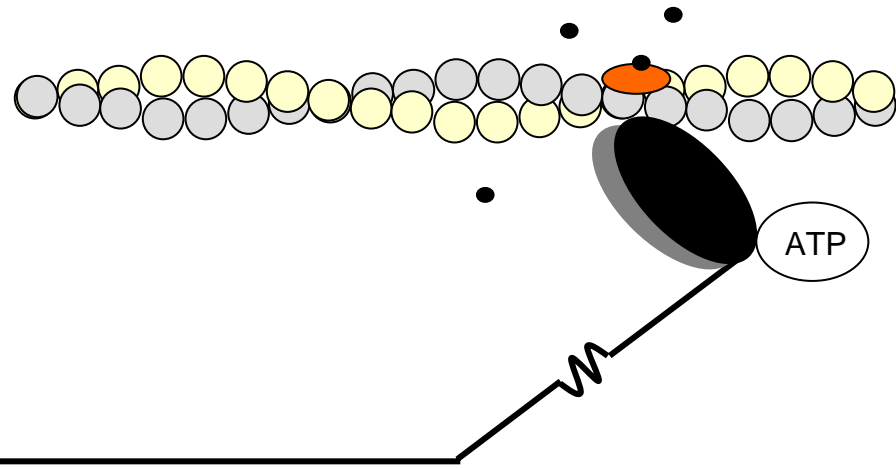
diminution de l'énergie libre du complexe actomyosique  
génération d'une force contractile

# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de  $\text{Ca}^{2+}$   
troponine déplacée

**pont actomyosique**  
**pont actomyosique formé**

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



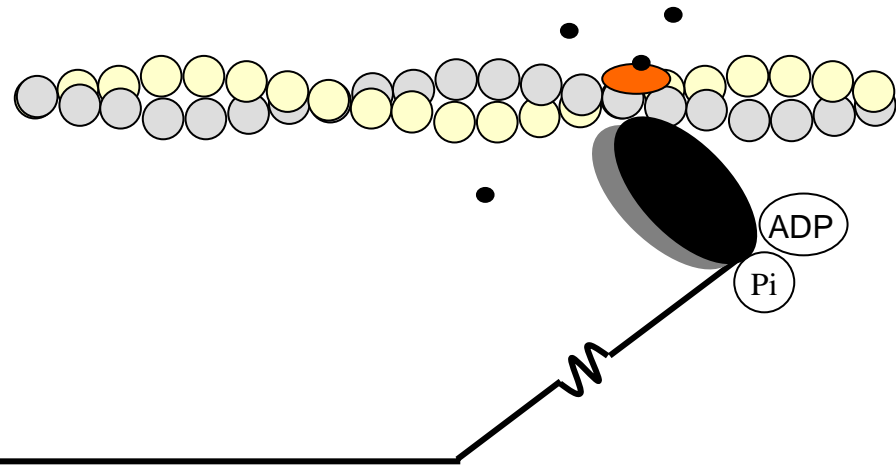
**angle de la tête de myosine avec l'actine**  
**angle de  $45^\circ$**

# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de  $\text{Ca}^{2+}$   
troponine déplacée

pont actomyosique

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



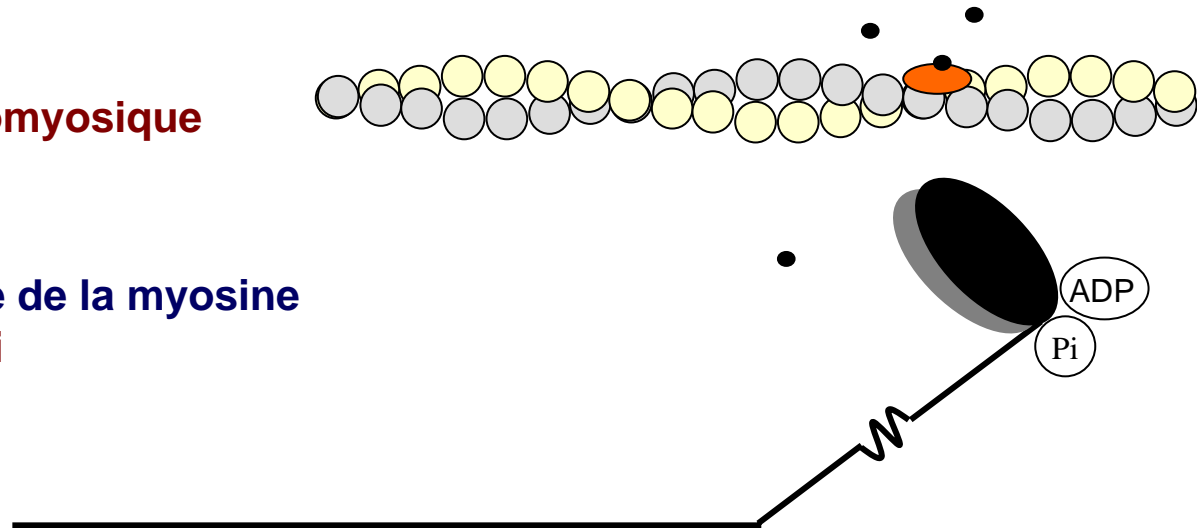
angle de la tête de myosine avec l'actine  
angle de  $45^\circ$

# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de  $\text{Ca}^{2+}$   
troponine déplacée

pont actomyosique  
rupture du pont actomyosique

activité enzymatique de la myosine  
présence d'ADP + Pi



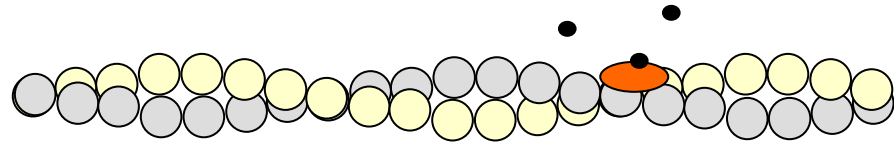
angle de la tête de myosine avec l'actine  
angle de  $45^\circ$

# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

présence de  $\text{Ca}^{2+}$   
troponine déplacée

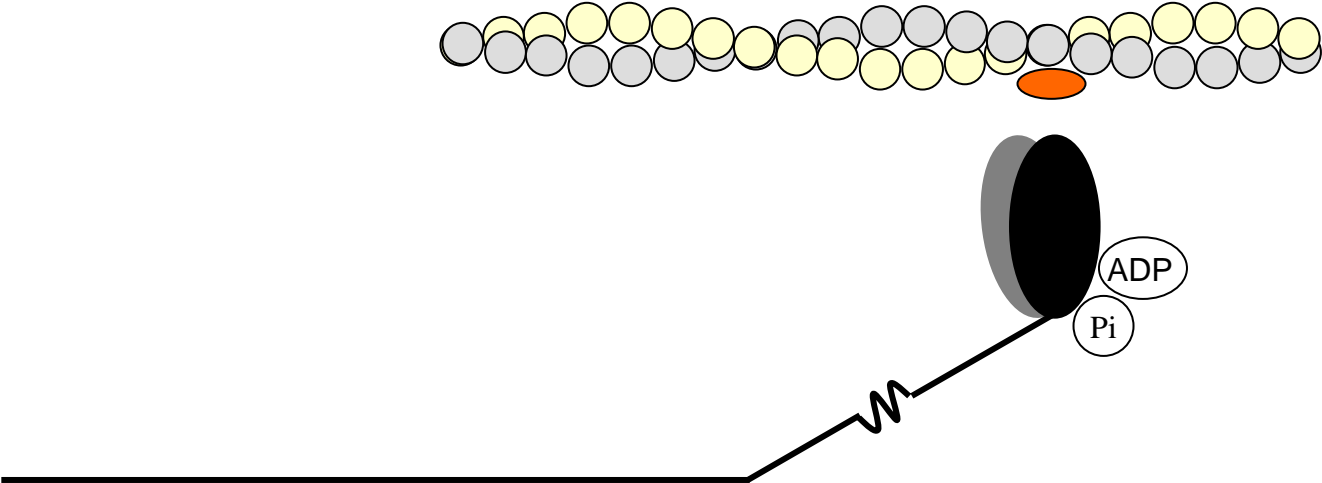
pont actomyosique  
rupture du pont actomyosique

activité enzymatique de la myosine  
présence d'ADP + Pi

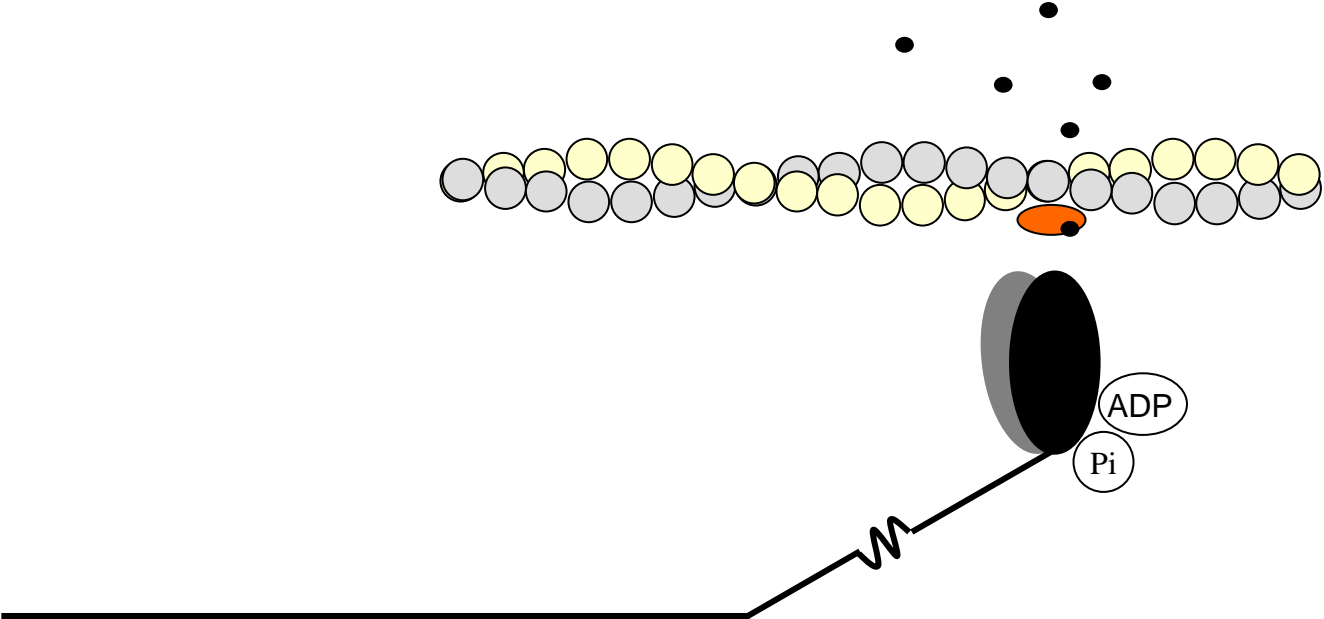


angle de la tête de myosine avec l'actine  
angle de  $90^\circ$   
(conformation d'énergie libre minimale)

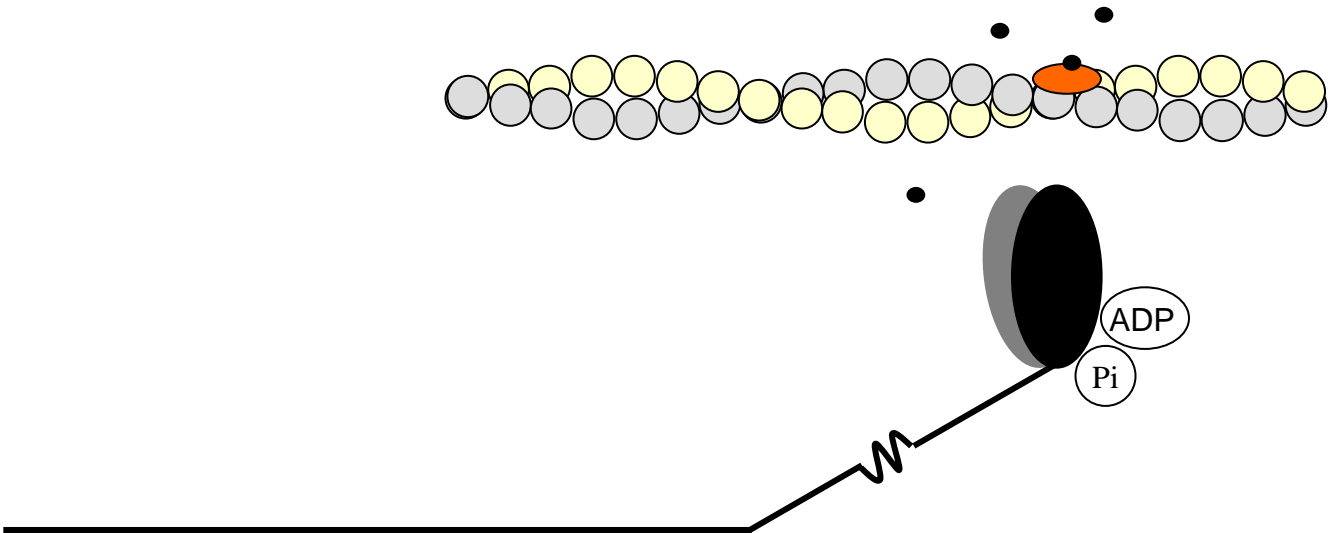
la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques



la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

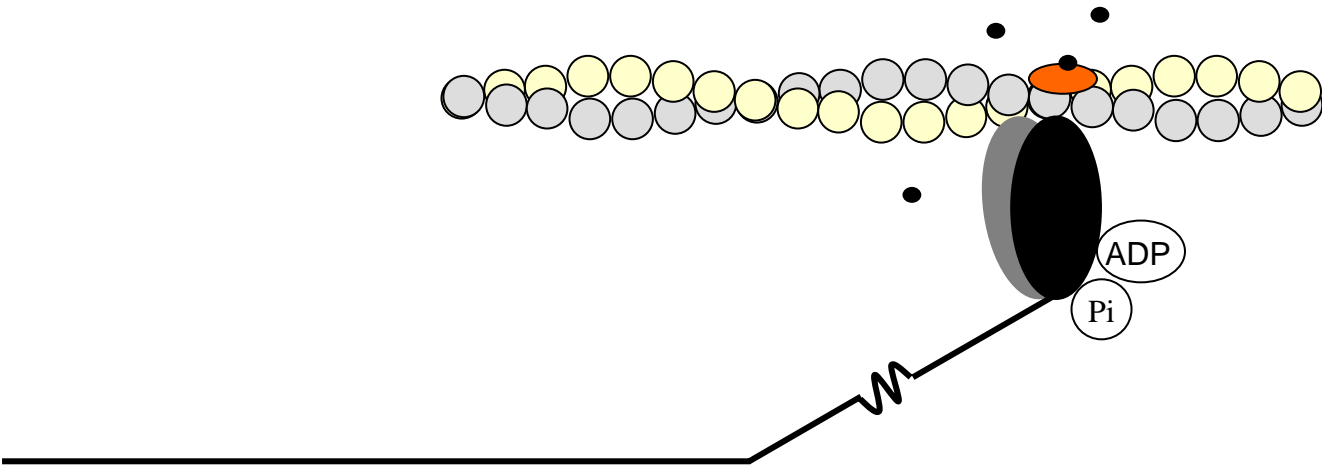


la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

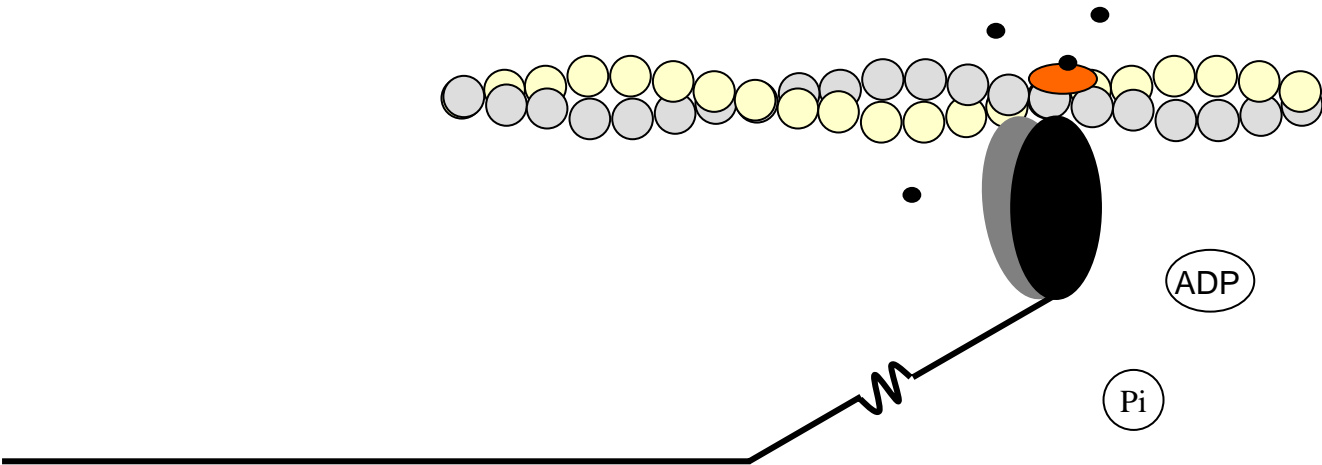




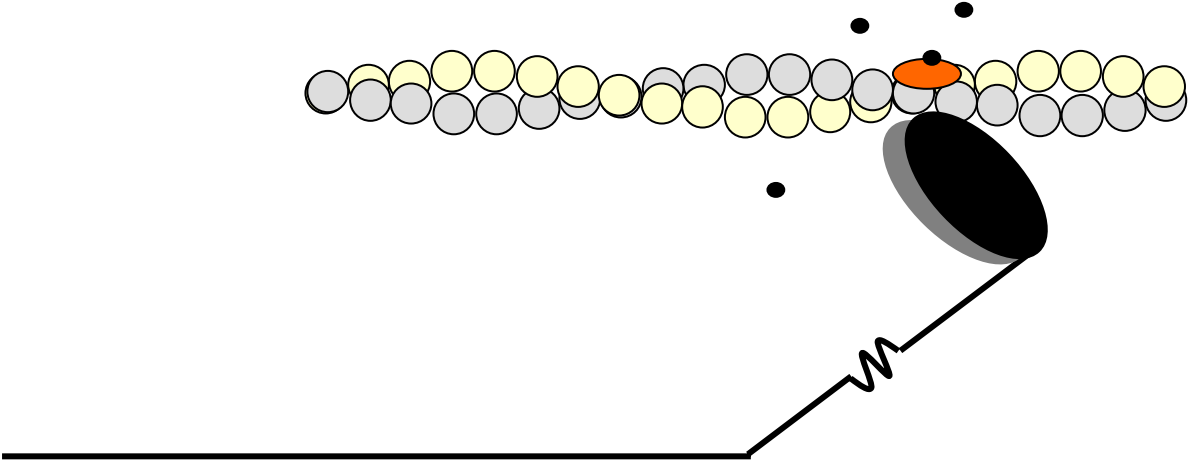
la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques



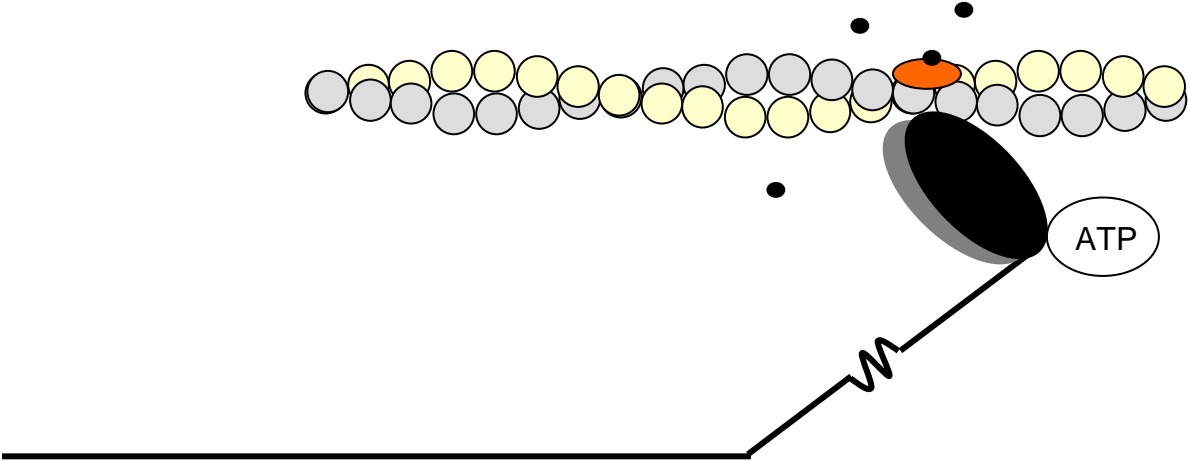
la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques



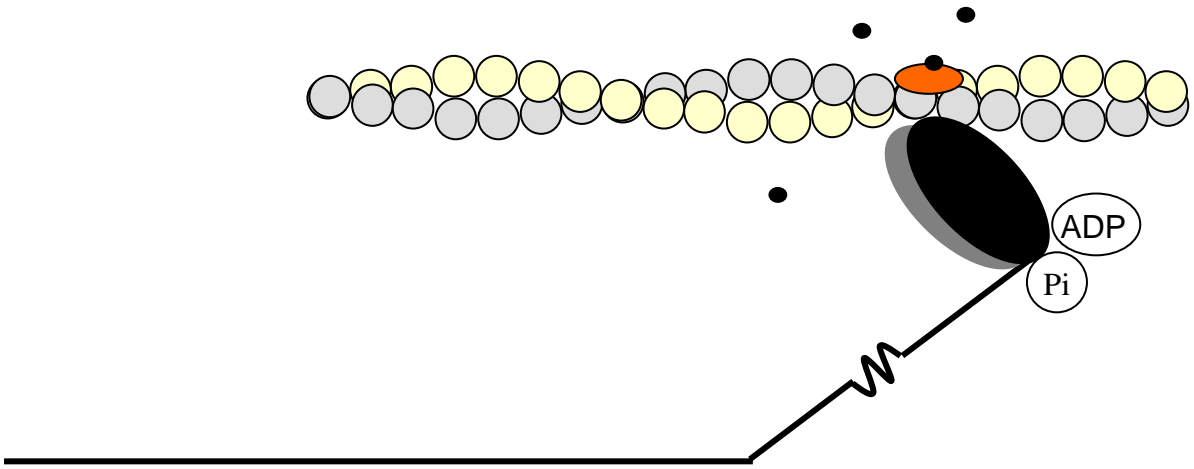
la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques



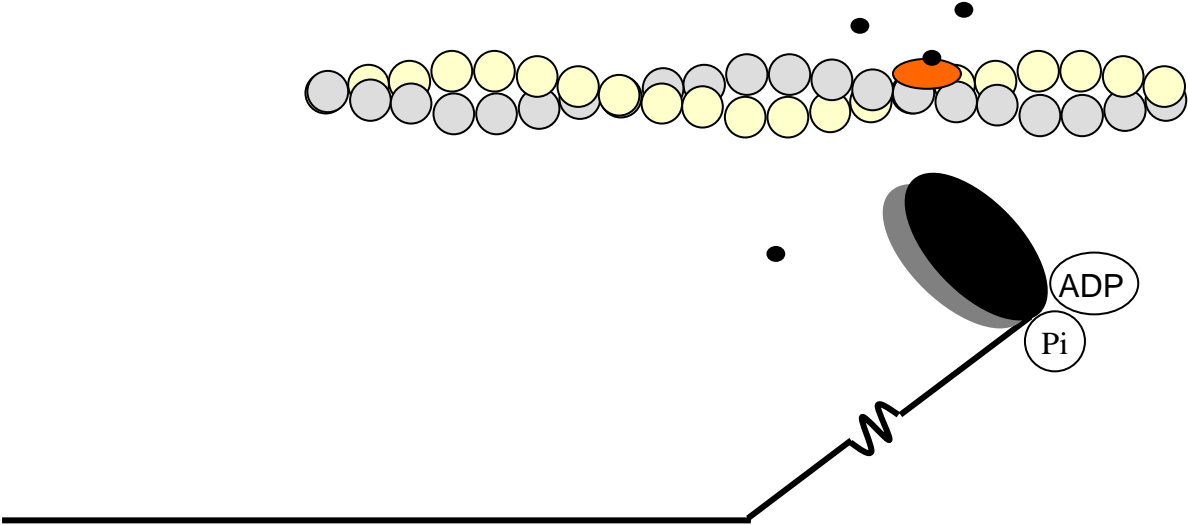
la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques



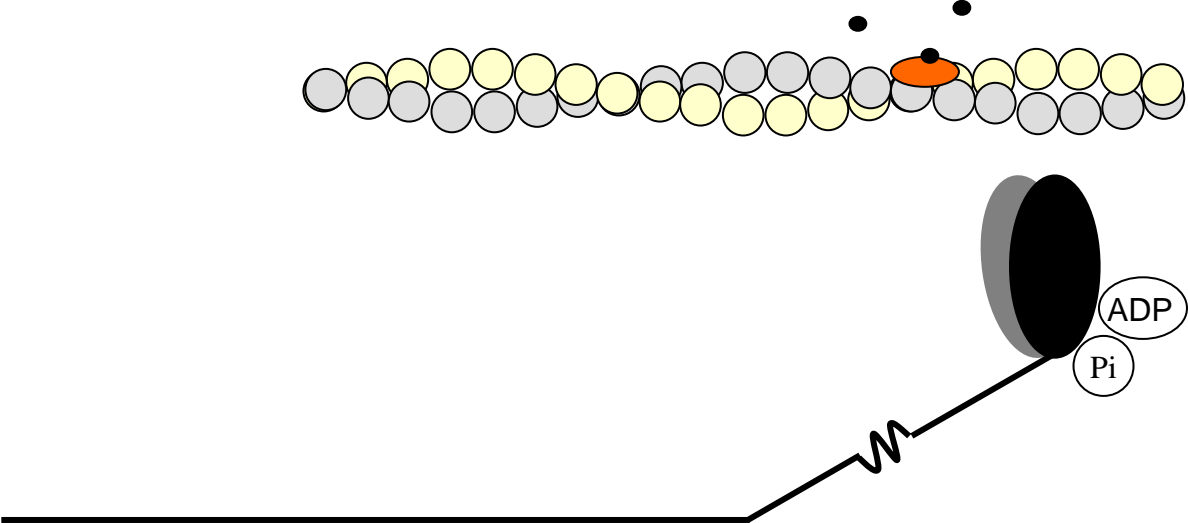
# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques



la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

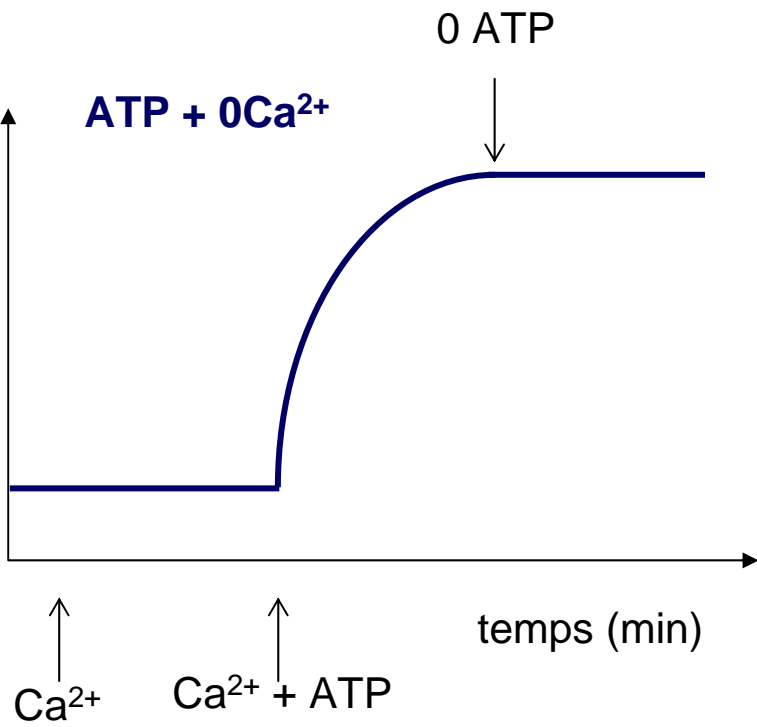
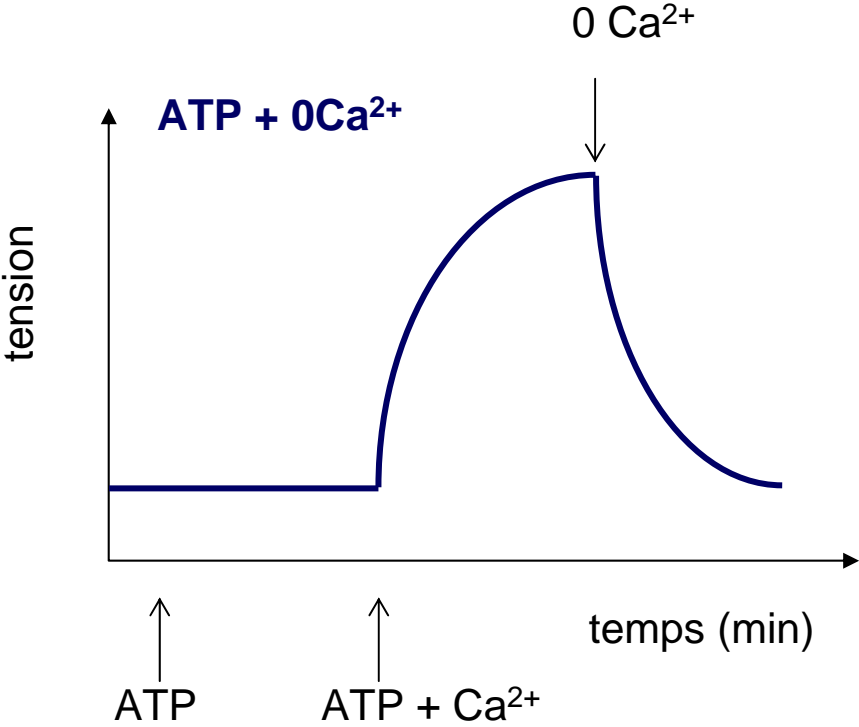


la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques



# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

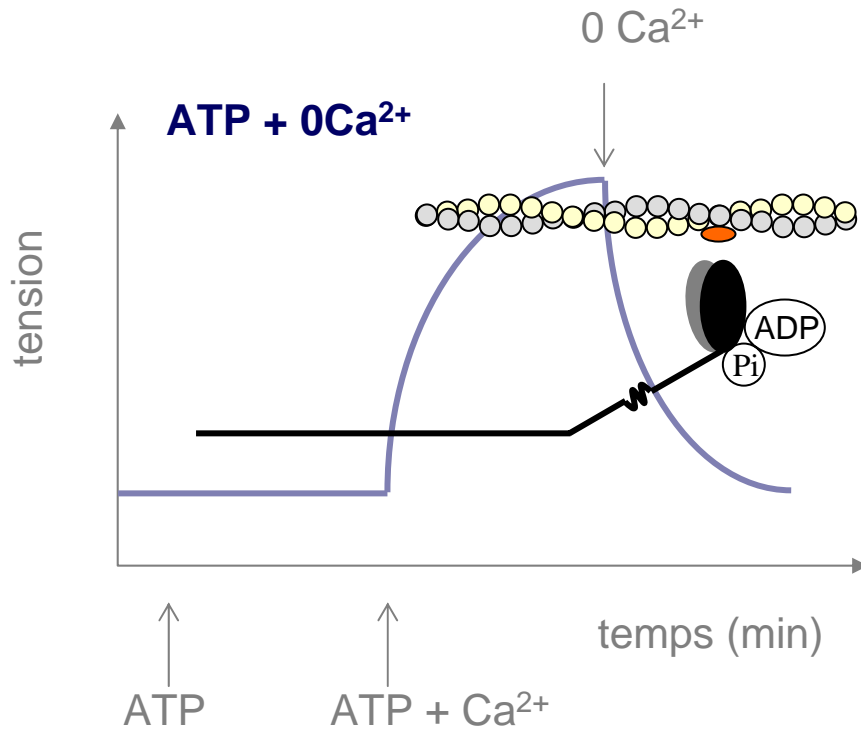
## rôle du $\text{Ca}^{2+}$ et de l'ATP : interprétation moléculaire



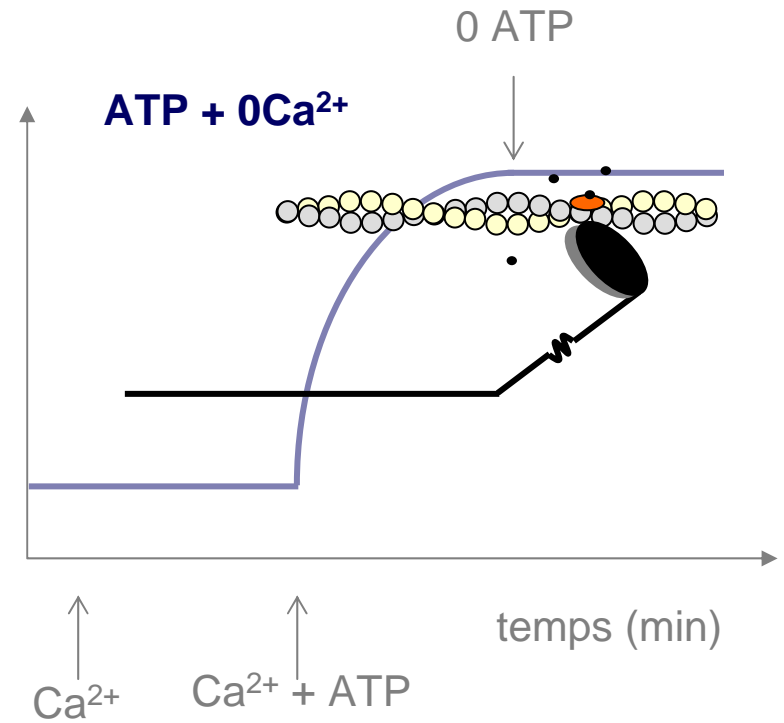


# la cellule musculaire \_\_\_\_\_ formation cyclique des ponts actomyosiques

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



**pas de ponts actomyosiques**



**ponts actomyosiques verrouillés**

## 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

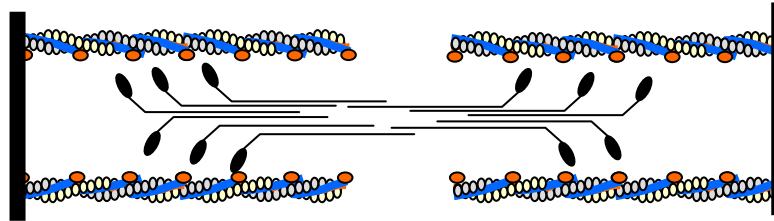
*muscles striés : présence de myoglobine (O<sub>2</sub>)*

métabolisme anaérobie : production d'acide lactique

# l'organisation du muscle \_\_\_\_\_ le muscle strié

muscle = structure hiérarchisée

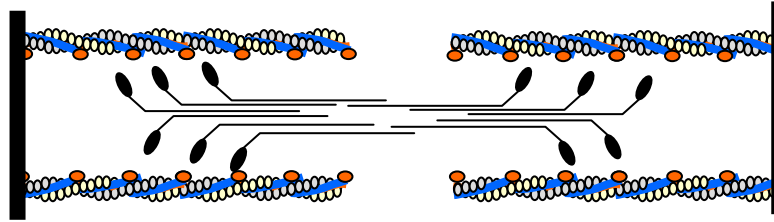
myofilaments



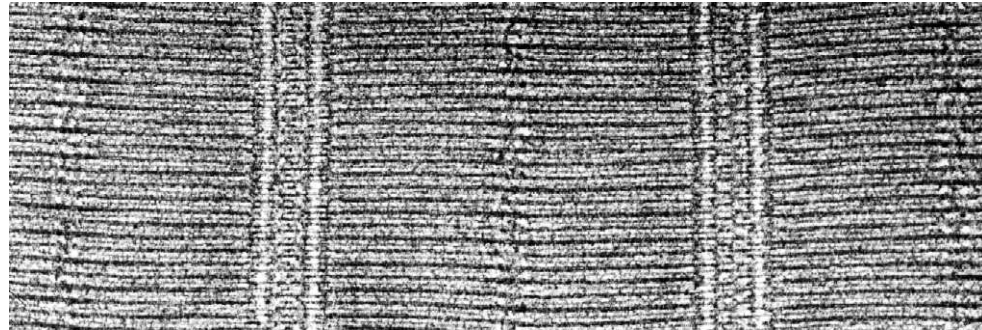
# l'organisation du muscle \_\_\_\_\_ le muscle strié

muscle = structure hiérarchisée

myofilaments



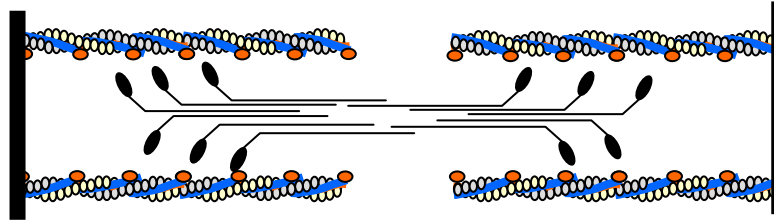
sarcomères



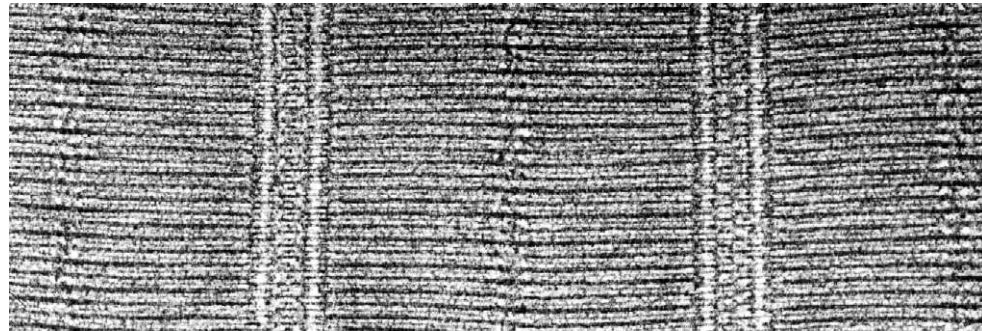
# l'organisation du muscle \_\_\_\_\_ le muscle strié

muscle = structure hiérarchisée

myofilaments



sarcomères



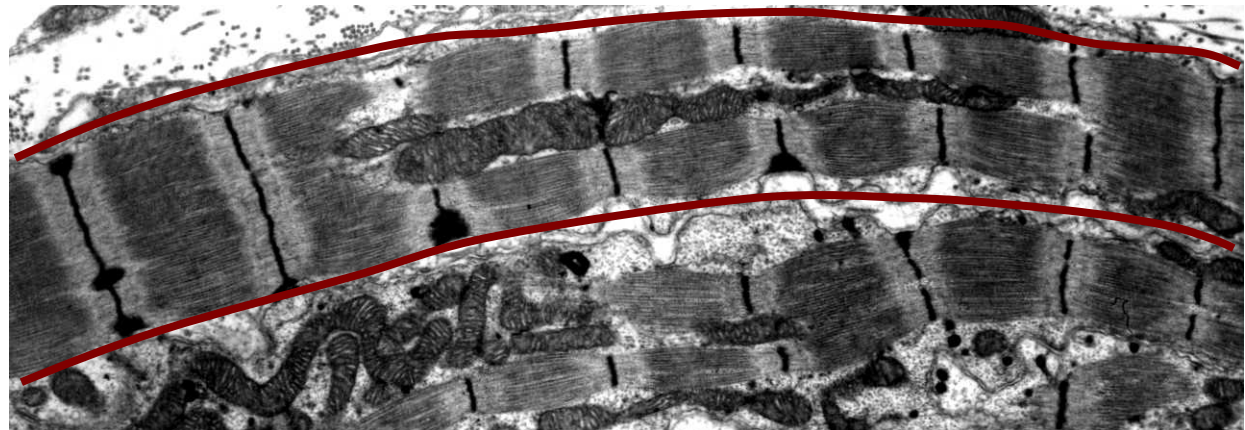
fibrille

sarcomères en série

mitochondrie

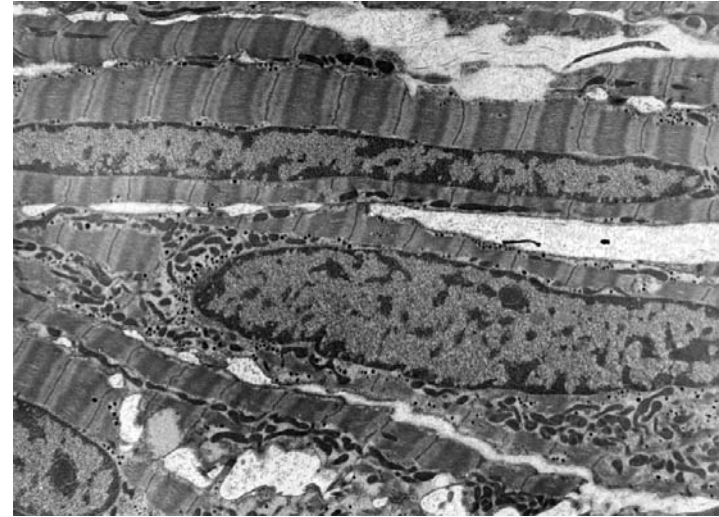
réticulum

sarcoplasmique



muscle = structure hiérarchisée

fibres  
cellules contenant  
plusieurs fibrilles

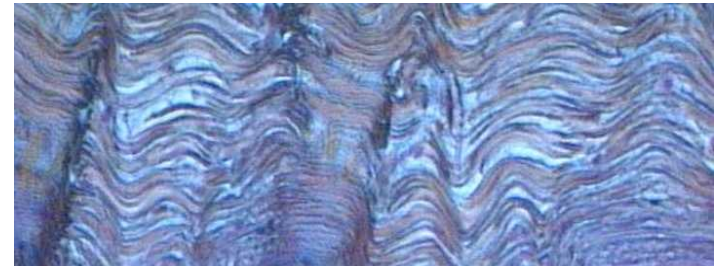
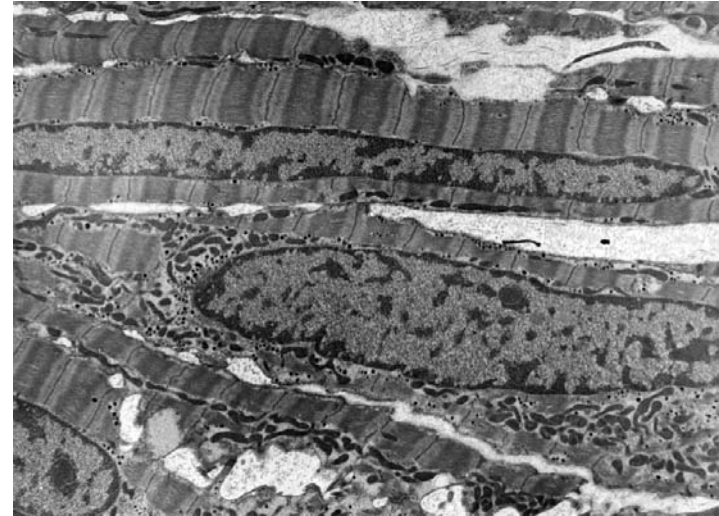




muscle = structure hiérarchisée

fibre  
 cellule comprenant  
 plusieurs fibrilles

amas de fibres  
 cellules en faisceaux  
 tissu conjonctif



# l'organisation du muscle \_\_\_\_\_ le muscle strié

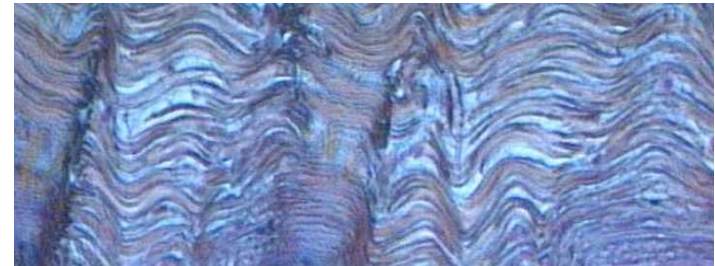
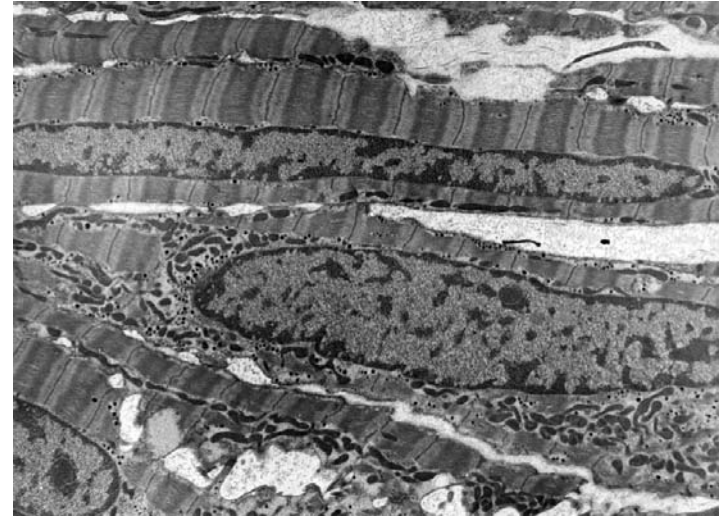
muscle = structure hiérarchisée

fibre  
 cellule comprenant  
 plusieurs fibrilles

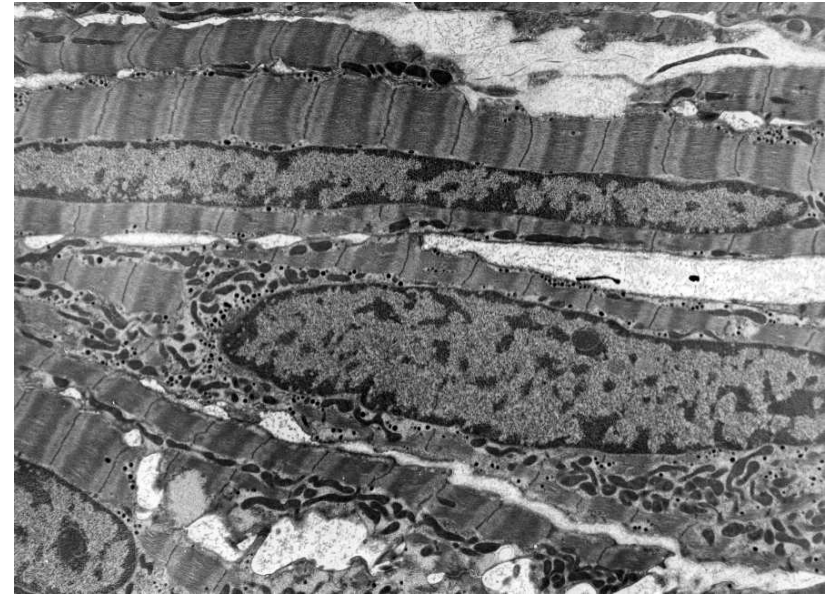
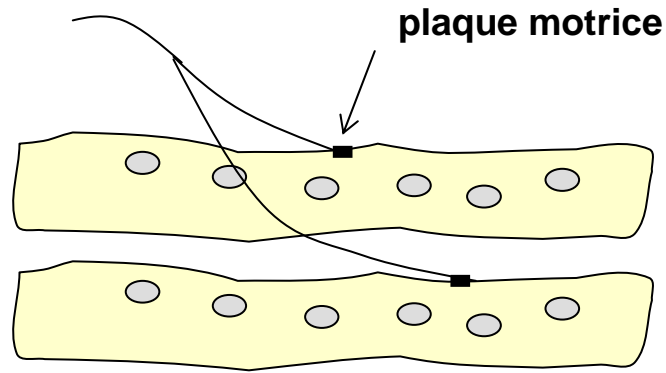
amas de fibres  
 cellules en faisceaux  
 tissu conjonctif



muscle  
 faisceaux musculaires  
 zones d'insertion



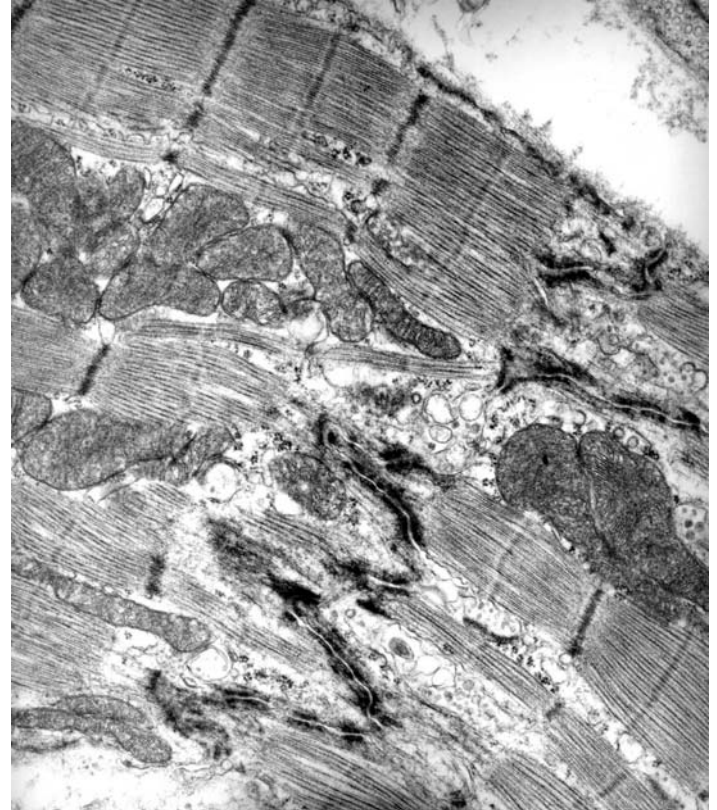
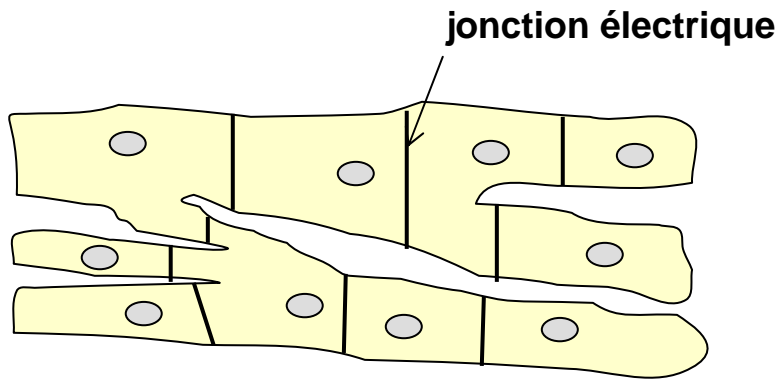
## muscle strié squelettique



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

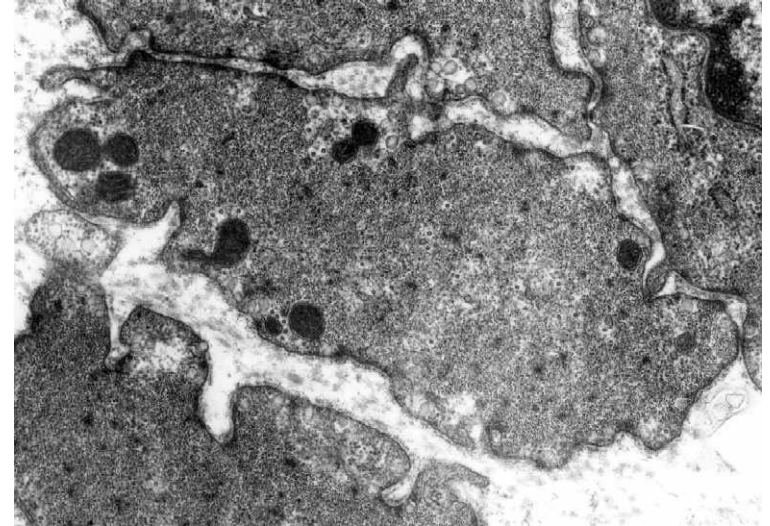
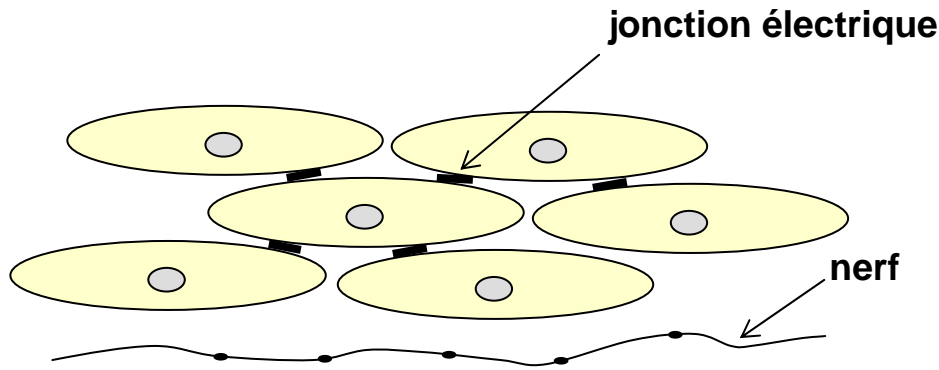


muscle strié cardiaque



- 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 »)

## 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

## 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

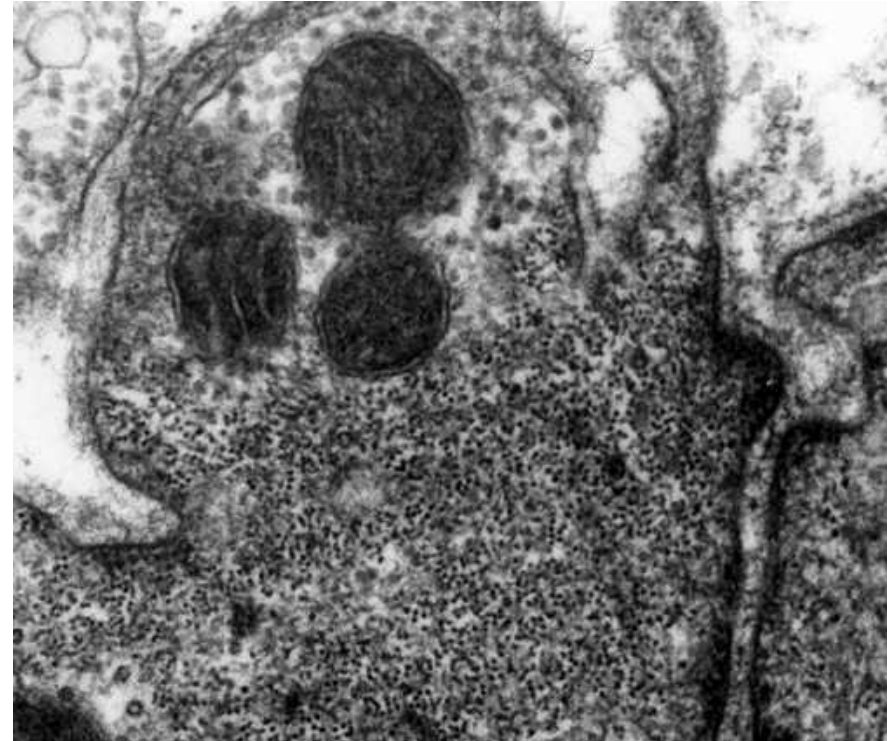
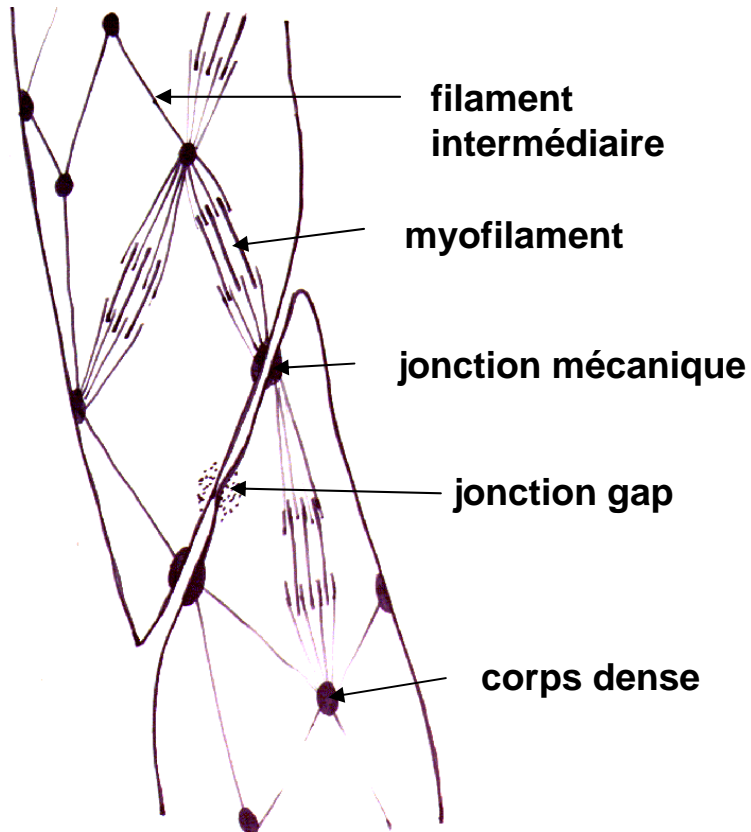
contraction dite tonique

*ex : les myocytes responsables de la réactivité bronchique.*

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

l'organisation de la cellule

pas d'organisation en sarcomère



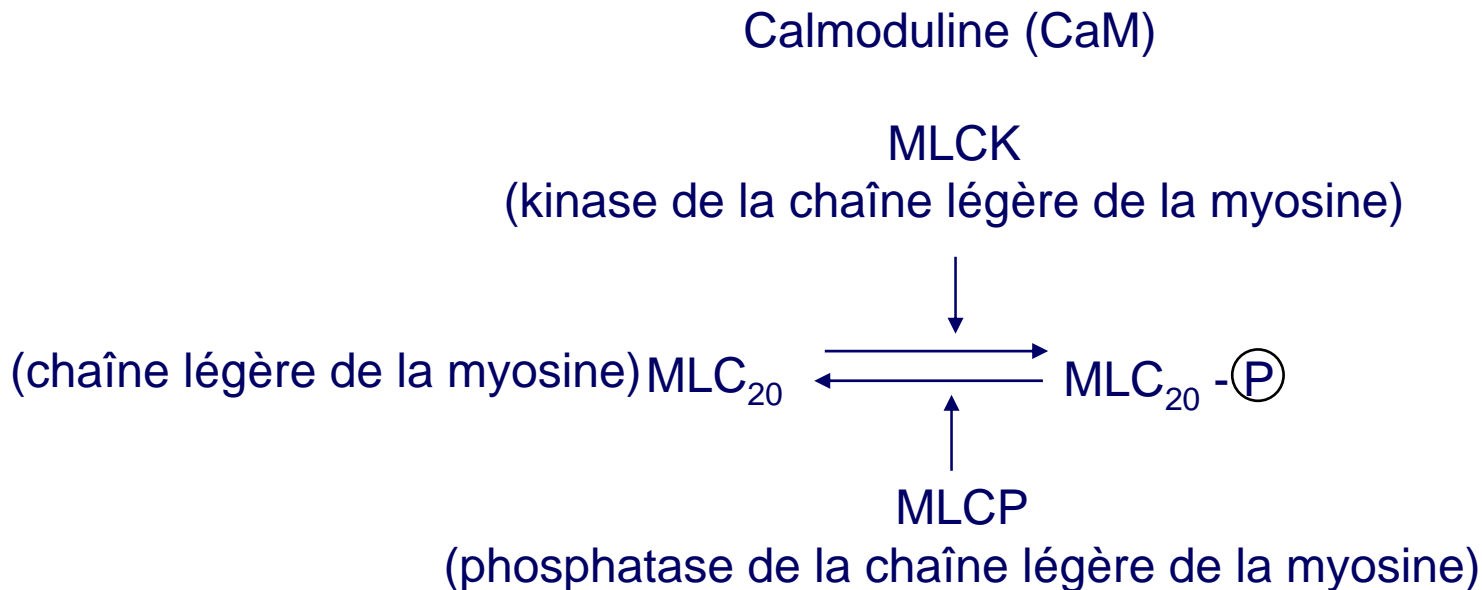
- cellules mononucléées en fuseau
- pas de tubules T
- nombreux filaments intermédiaires reliant les corps denses
- myofilaments constitués d'actine et de myosine, reliés à des corps denses

## l'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 :





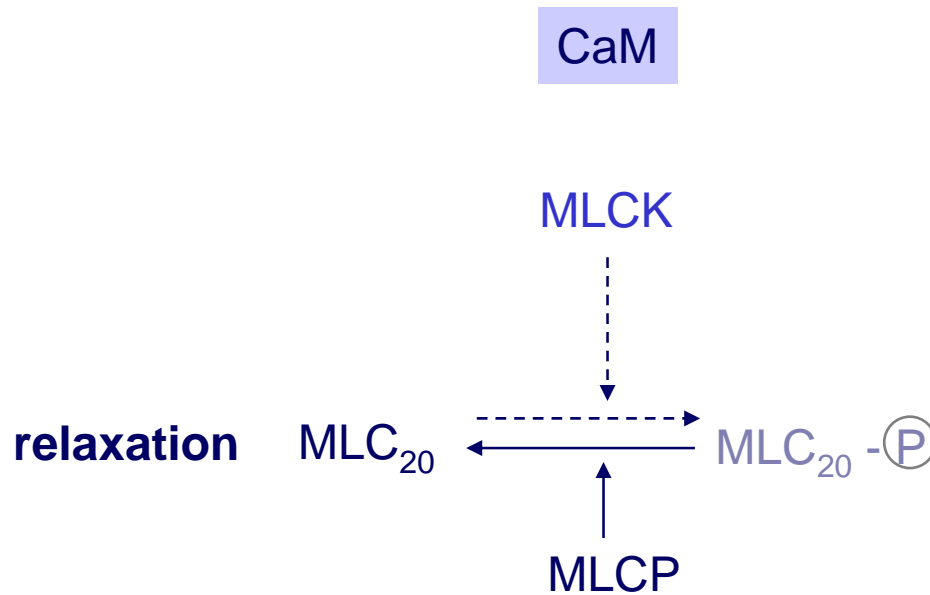
## l'appareil contractile : rôle du calcium

absence de  $\text{Ca}^{2+}$ 

pas d'activation de la MLCK

myosine déphosphorylée

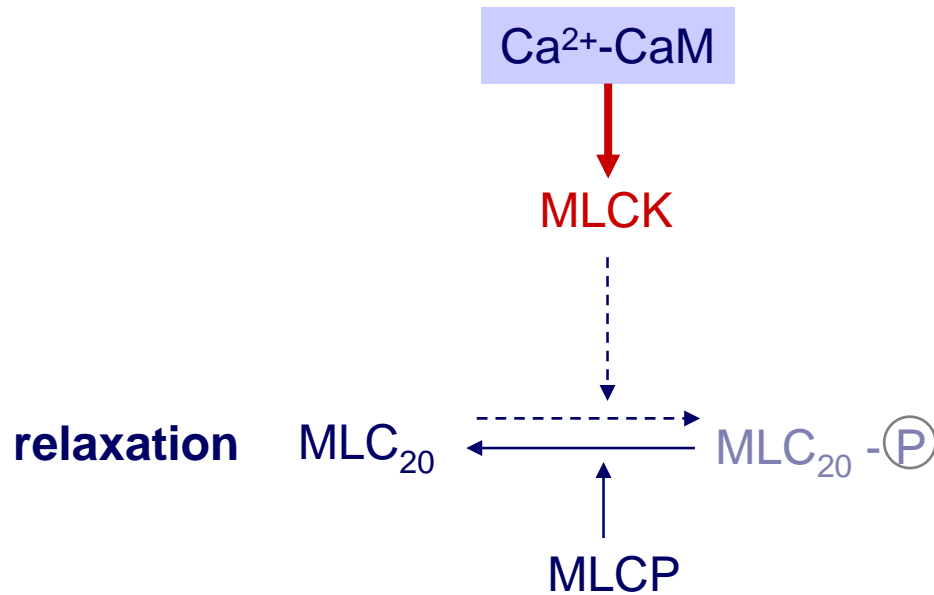
relaxation



## l'appareil contractile : rôle du calcium

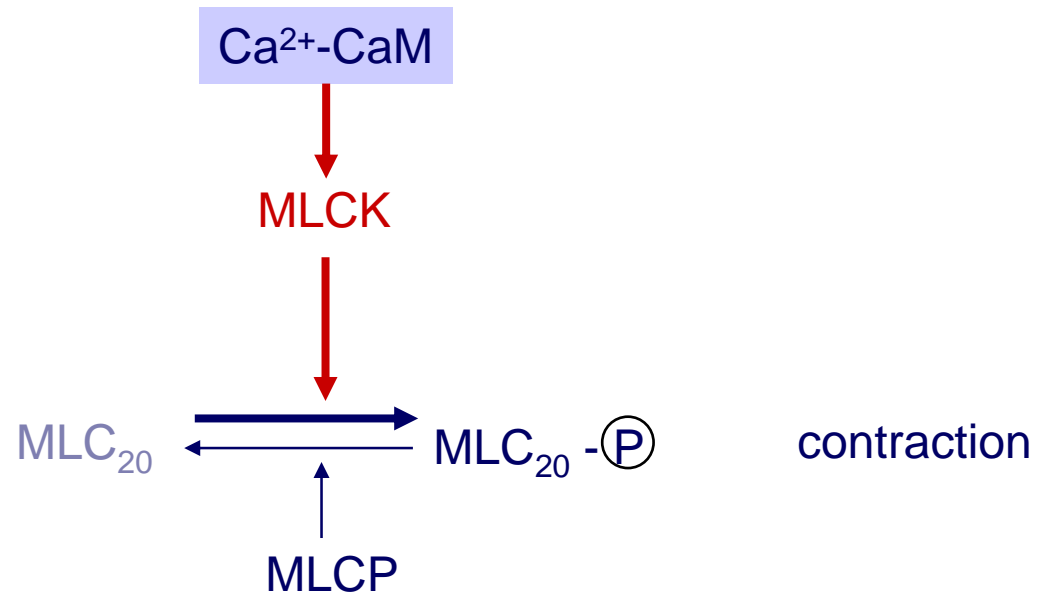
présence de  $\text{Ca}^{2+}$ complexe  $\text{Ca}^{2+}$ -calmoduline

activation de la MLCK



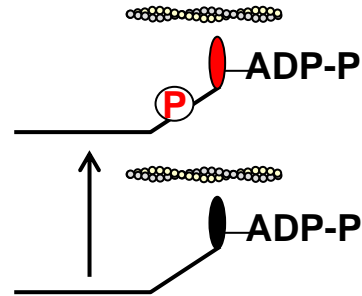
## l'appareil contractile : rôle du calcium

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



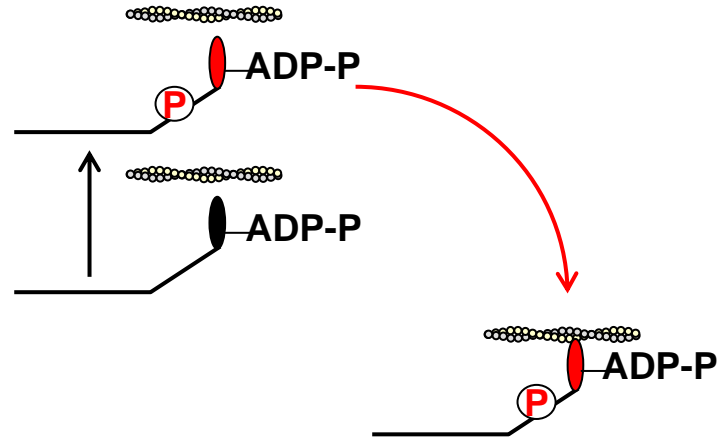
l'appareil contractile : les cycles de contraction

cycle phosphorylé  
phosphorylation



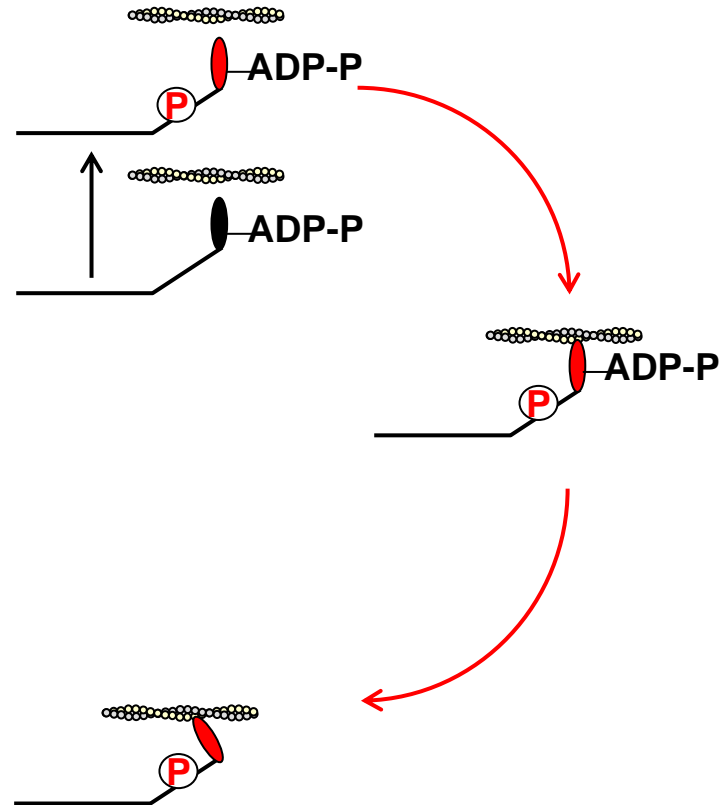
l'appareil contractile : les cycles de contraction

cycle phosphorylé  
formation du pont actomyosique



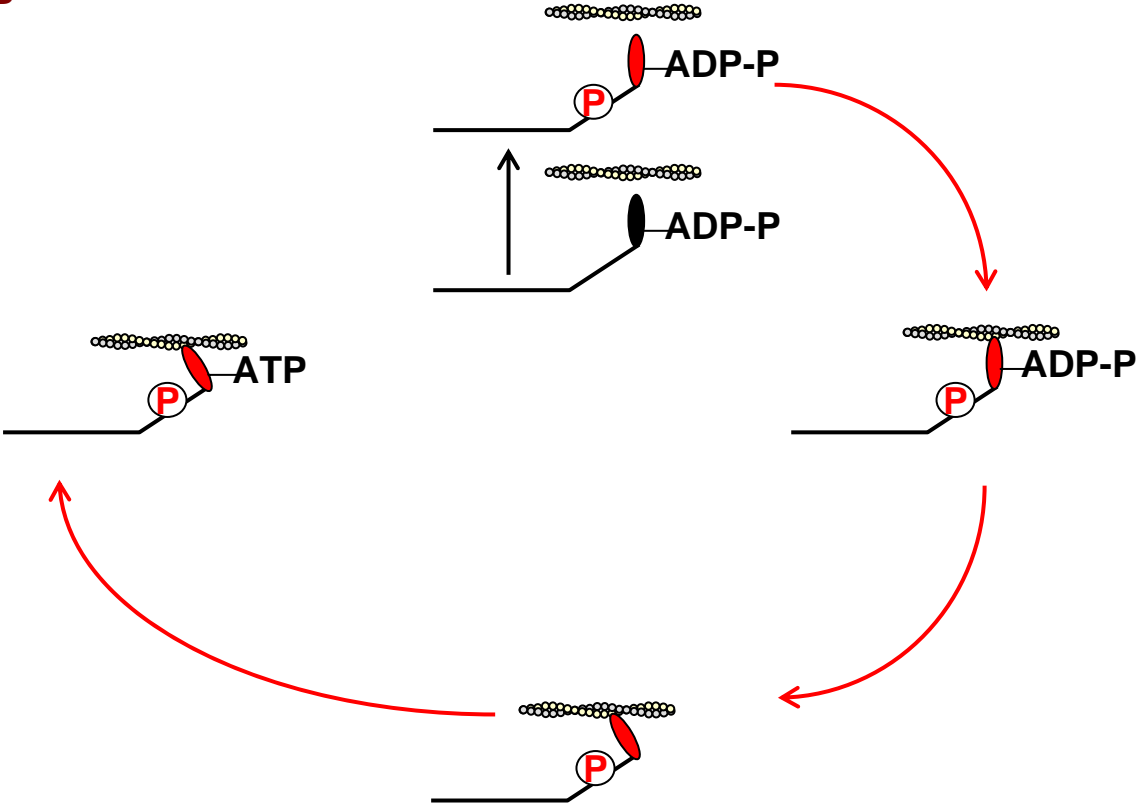
## l'appareil contractile : les cycles de contraction

**cycle phosphorylé**  
**rotation de la tête de myosine**



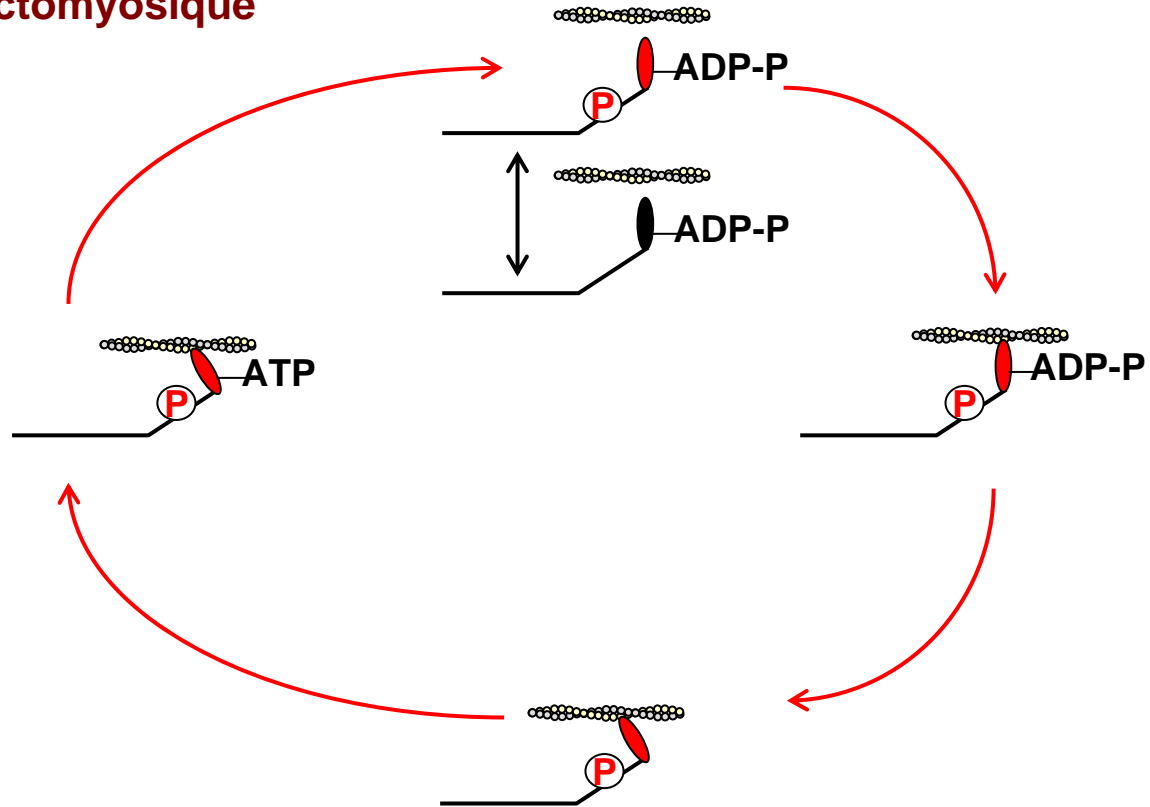
l'appareil contractile : les cycles de contraction

cycle phosphorylé  
hydrolyse de l'ATP



l'appareil contractile : les cycles de contraction

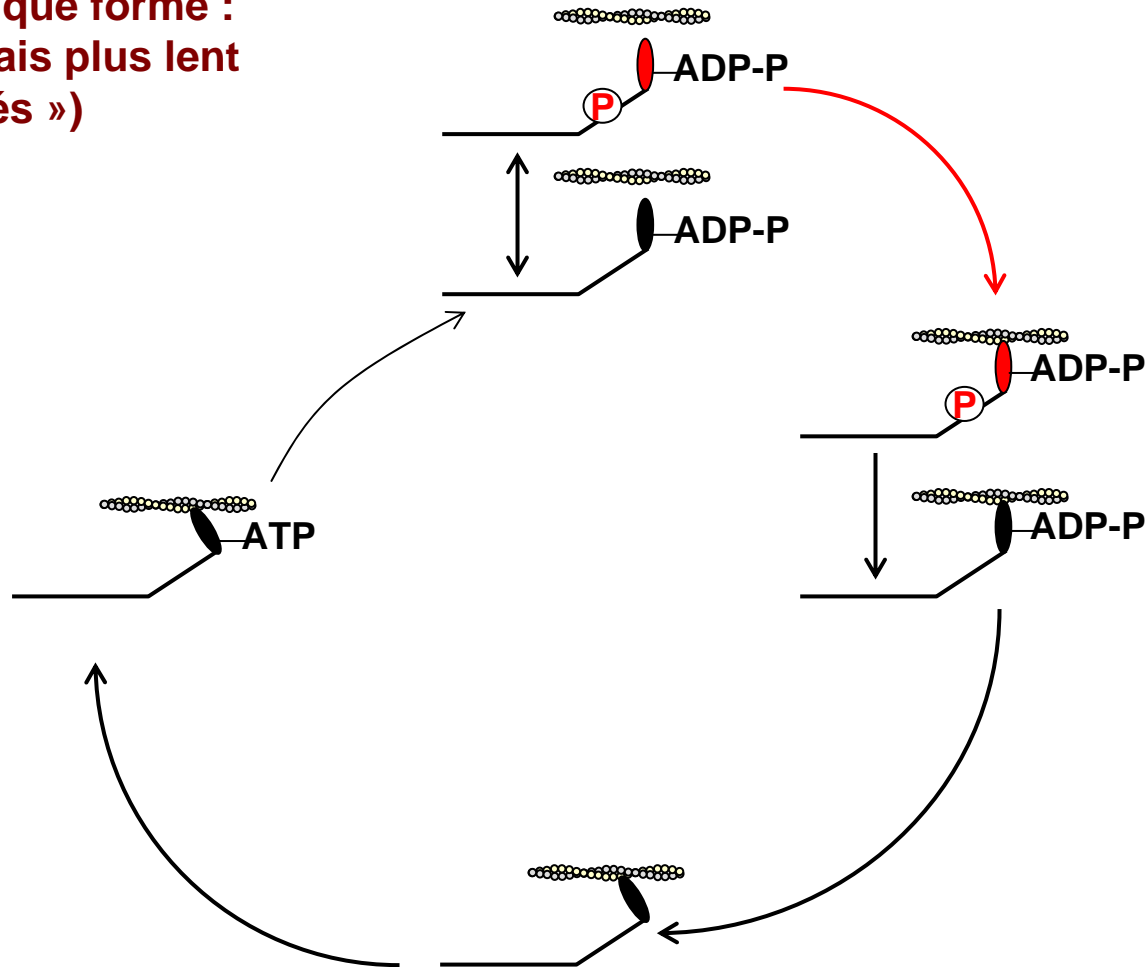
cycle phosphorylé  
rupture du pont actomyosique





## l'appareil contractile : les cycles de contraction

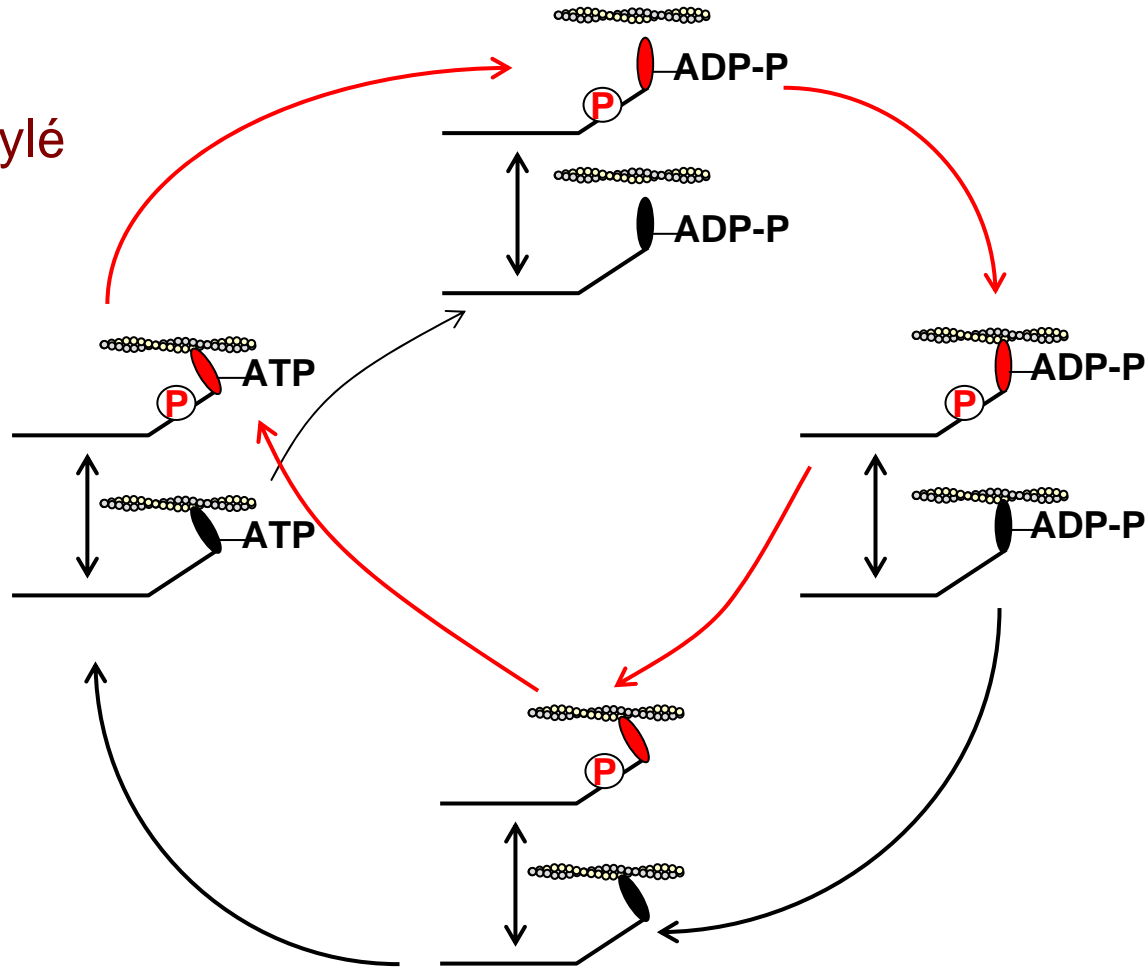
**cycle partiellement déphosphorylé**  
**si pont actomyosique formé :**  
**cycle possible, mais plus lent**  
**(ponts « verrouillés »)**



l'appareil contractile : les cycles de contraction

cycle partiellement déphosphorylé

↕  
cycle phosphorylé



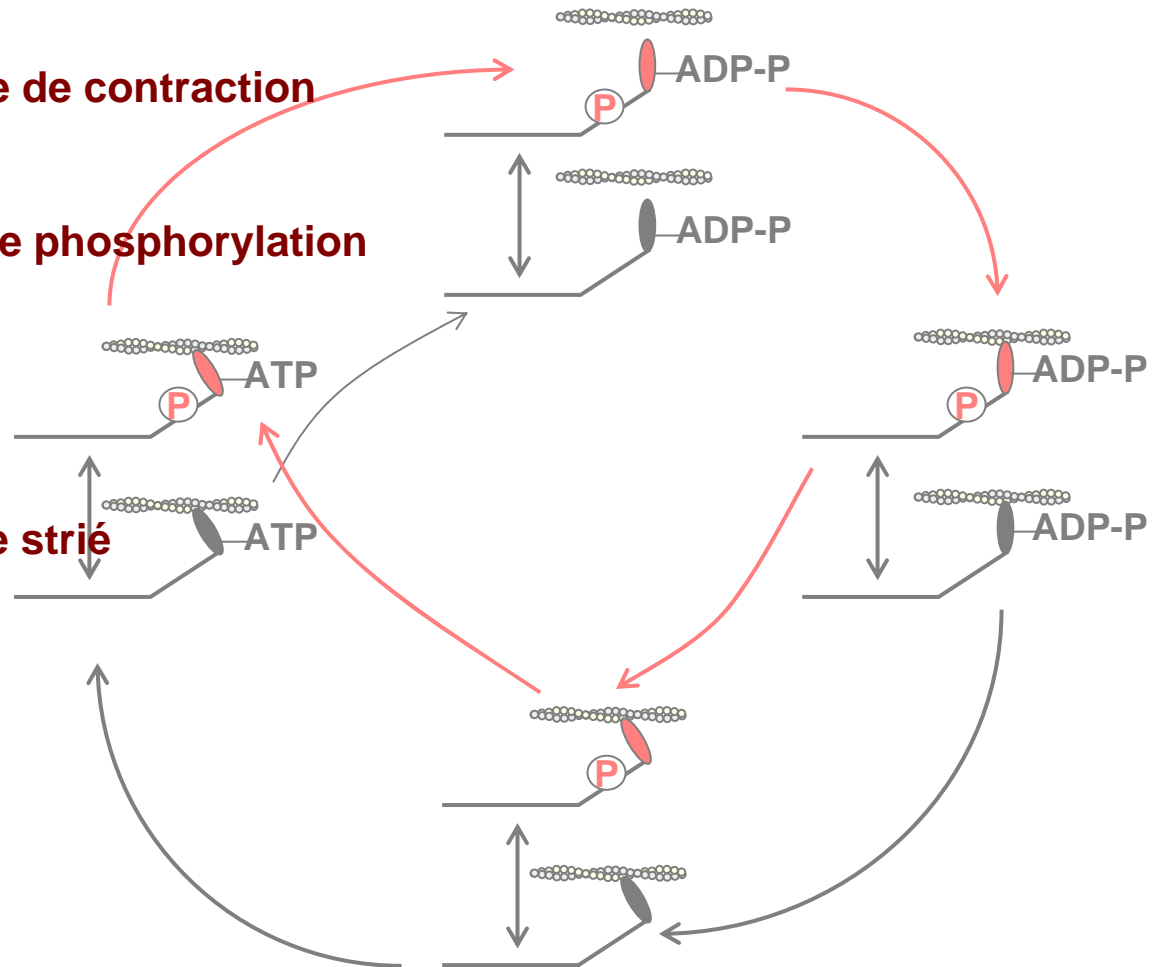
## consommation d'ATP

● 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



## consommation d'ATP

● activité ATPasique de la MLC  
→ un ATP consommée par cycle de contraction

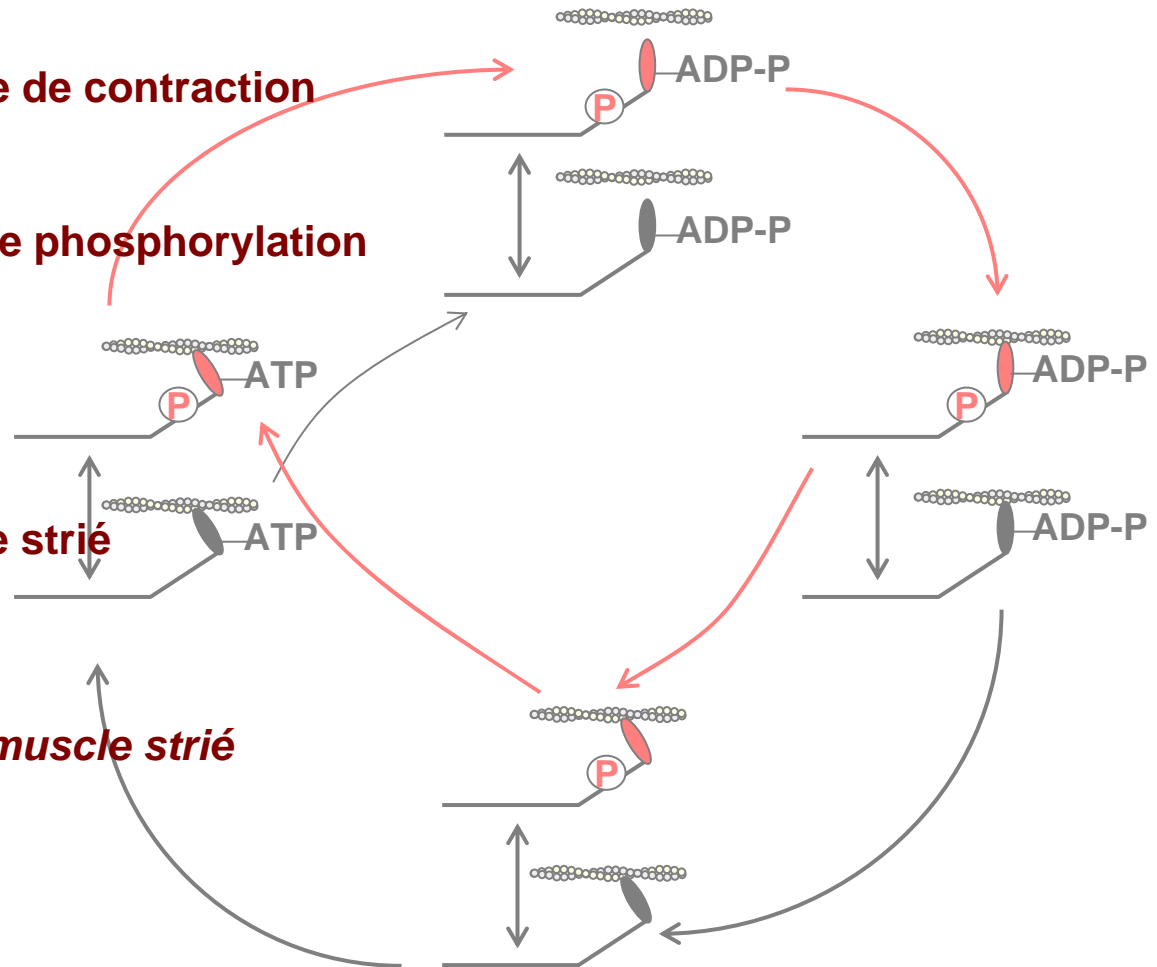
● phosphorylation de la MLC  
→ un ATP consommée à chaque phosphorylation

consommation d'ATP

● par cycle de contraction  
muscle lisse > muscle strié

**MAIS**

*vitesse muscle lisse < vitesse muscle strié*



## consommation d'ATP

● activité ATPasique de la MLC  
→ un ATP consommée par cycle de contraction

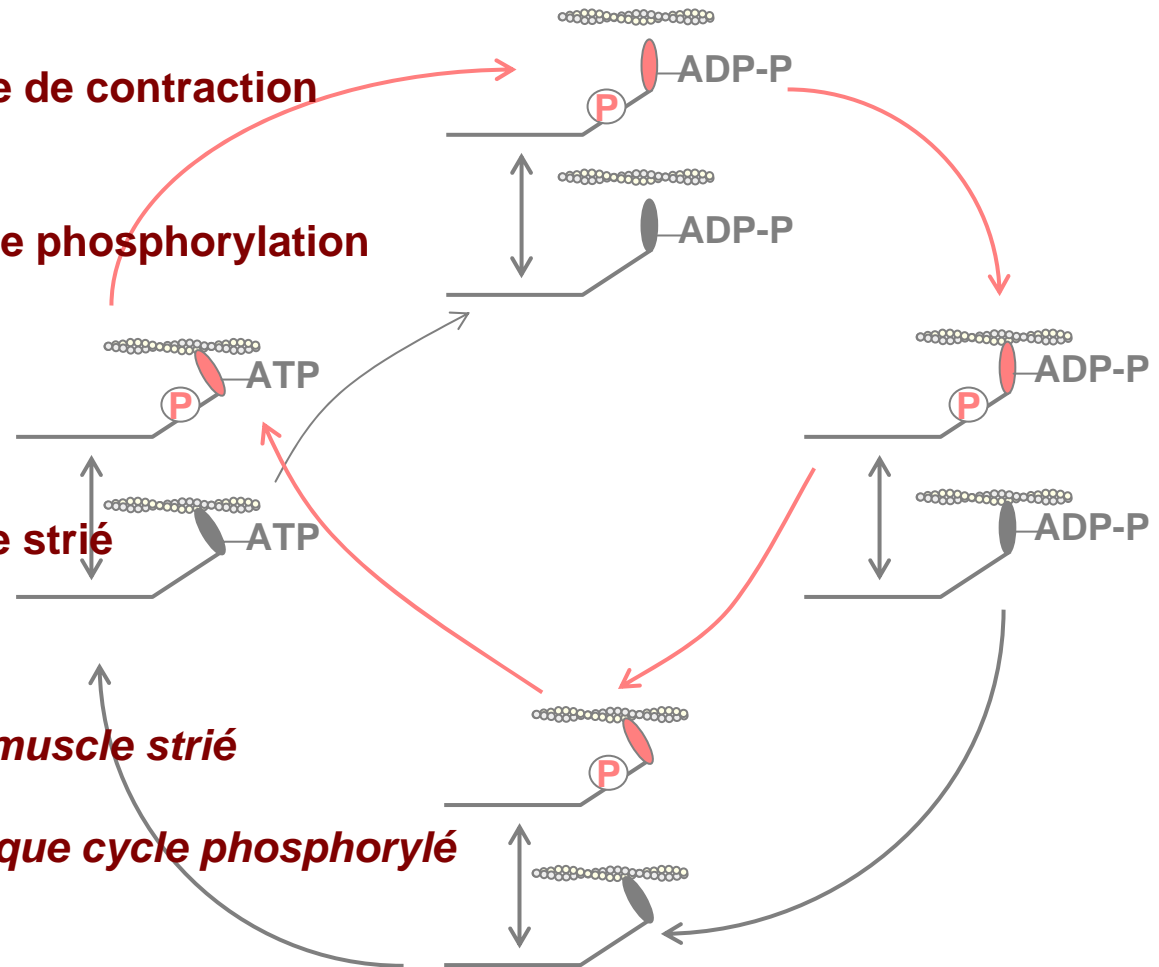
● phosphorylation de la MLC  
→ un ATP consommée à chaque phosphorylation

consommation d'ATP

● par cycle de contraction  
muscle lisse > muscle strié

**MAIS**

*vitesse muscle lisse < vitesse muscle strié*  
&  
*cycle déphosphorylé plus lent que cycle phosphorylé*



## 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

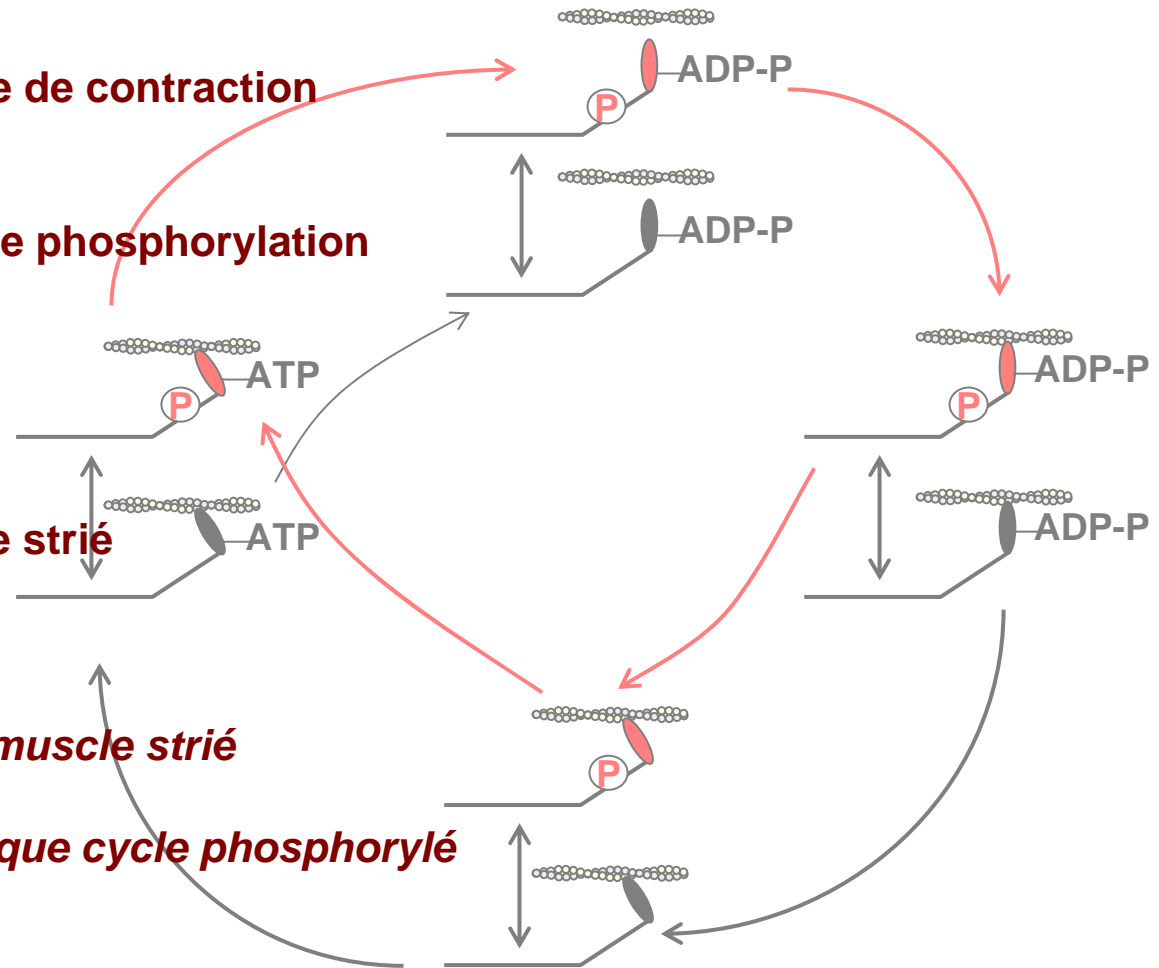
consommation d'ATP

● par cycle de contraction  
muscle lisse > muscle strié

**MAIS**

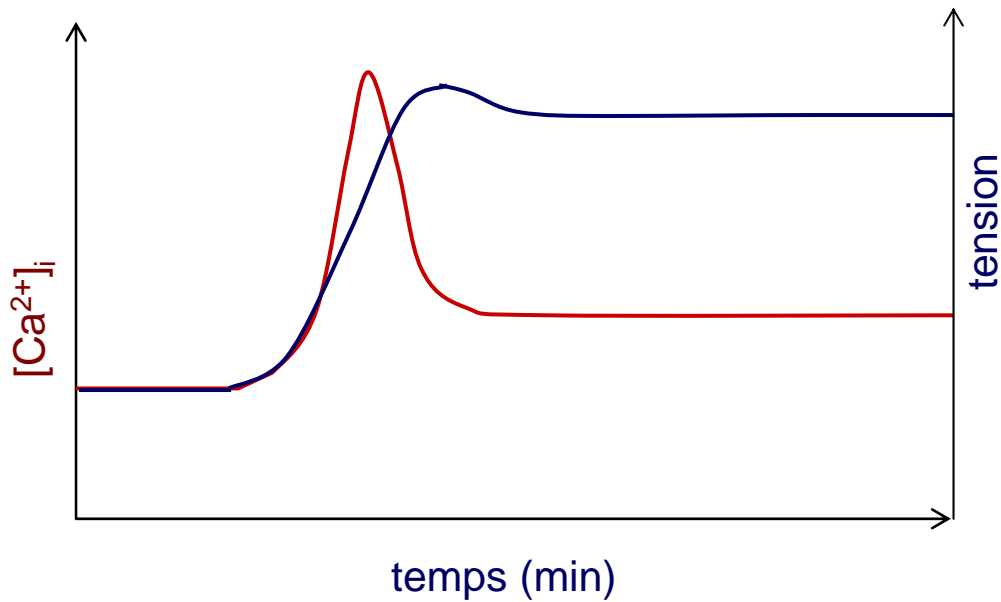
*vitesse muscle lisse < vitesse muscle strié*  
&  
*cycle déphosphorylé plus lent que cycle phosphorylé*

● par unité de temps  
muscle lisse < muscle strié



rôle du  $\text{Ca}^{2+}$

$[\text{Ca}^{2+}]_i \rightarrow$  proportion de cycle phosphorylé / déphosphorylé

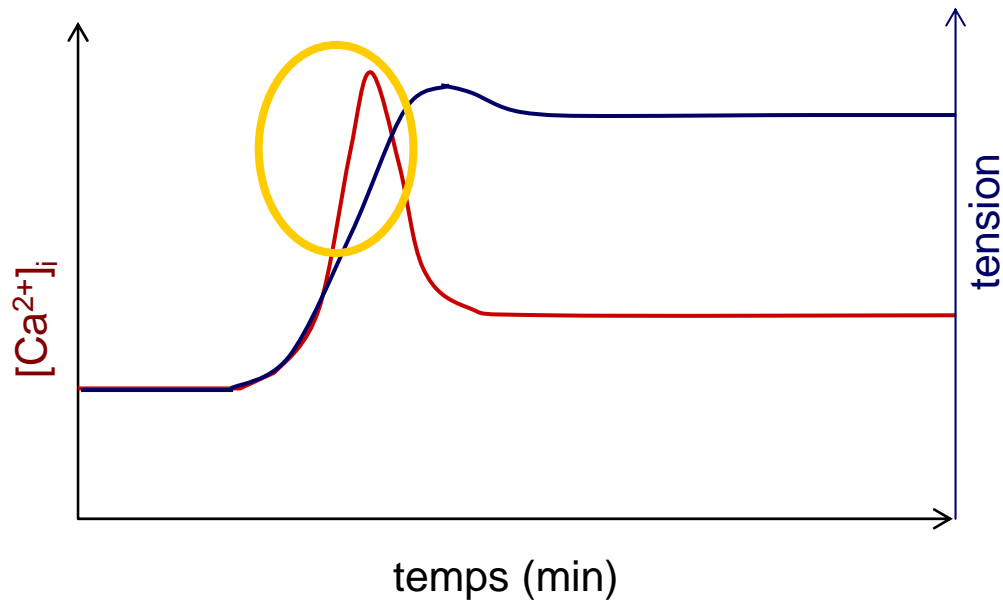


*mesure simultanée de la contraction et de la  $[\text{Ca}^{2+}]_i$*

## rôle du $\text{Ca}^{2+}$

$[\text{Ca}^{2+}]_i$  → proportion de cycle phosphorylé / déphosphorylé

$[\text{Ca}^{2+}]_i$  élevée : cycle phosphorylé :  
→ élévation rapide de la contraction  
→ consommation importante d'ATP  
ponts actomyosiques « labiles »



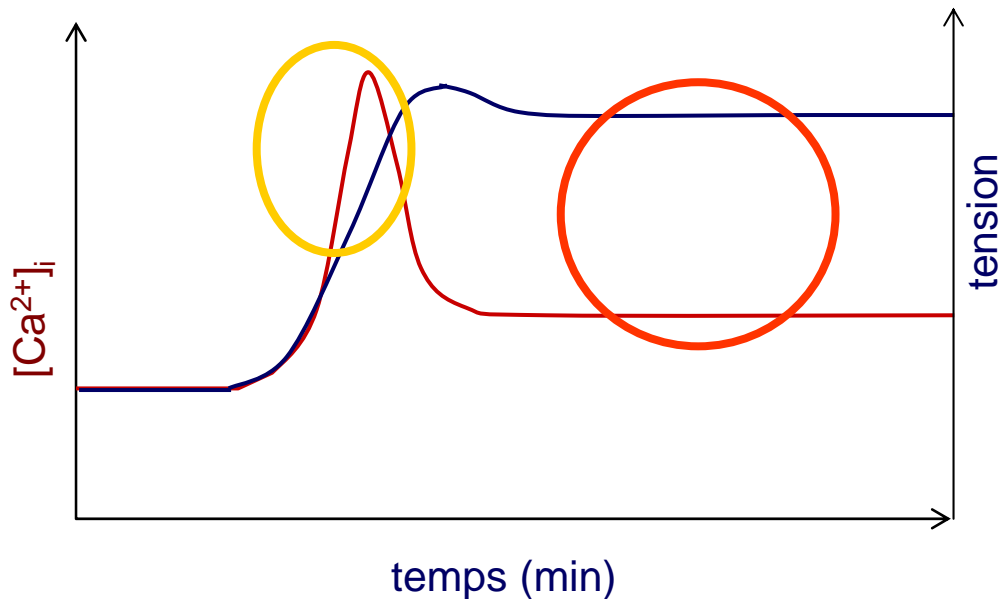
*mesure simultanée de la contraction et de la  $[\text{Ca}^{2+}]_i$*



## rôle du $\text{Ca}^{2+}$

$[\text{Ca}^{2+}]_i$  → proportion de cycle phosphorylé / déphosphorylé

$[\text{Ca}^{2+}]_i$  élevée : cycle phosphorylé :  
→ élévation rapide de la contraction  
→ consommation importante d'ATP  
ponts actomyosiques « labiles »



$[\text{Ca}^{2+}]_i$  faible : cycle déphosphorylé  
→ maintien de la contraction  
→ consommation faible d'ATP  
ponts actomyosiques « verrouillés »

*mesure simultanée de la contraction et de la  $[\text{Ca}^{2+}]_i$*

## physiologie du muscle lisse

- mécanisme d'action du  $\text{Ca}^{2+}$  : 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 »)**

## physiologie du muscle lisse

- mécanisme d'action du  $\text{Ca}^{2+}$  : 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)*

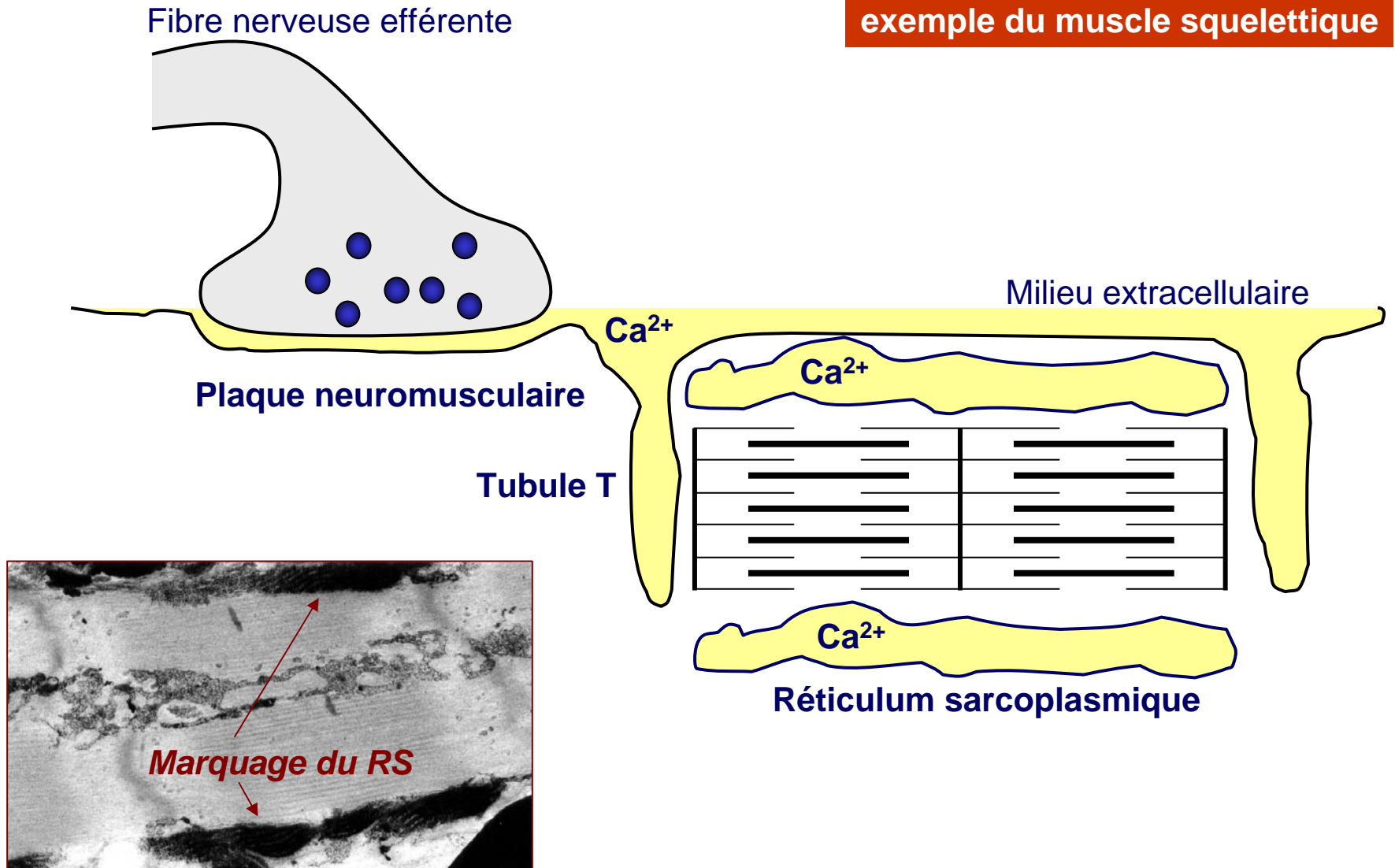
*autres explications possibles à l'existence de cycles de contraction déphosphorylés :*

- 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

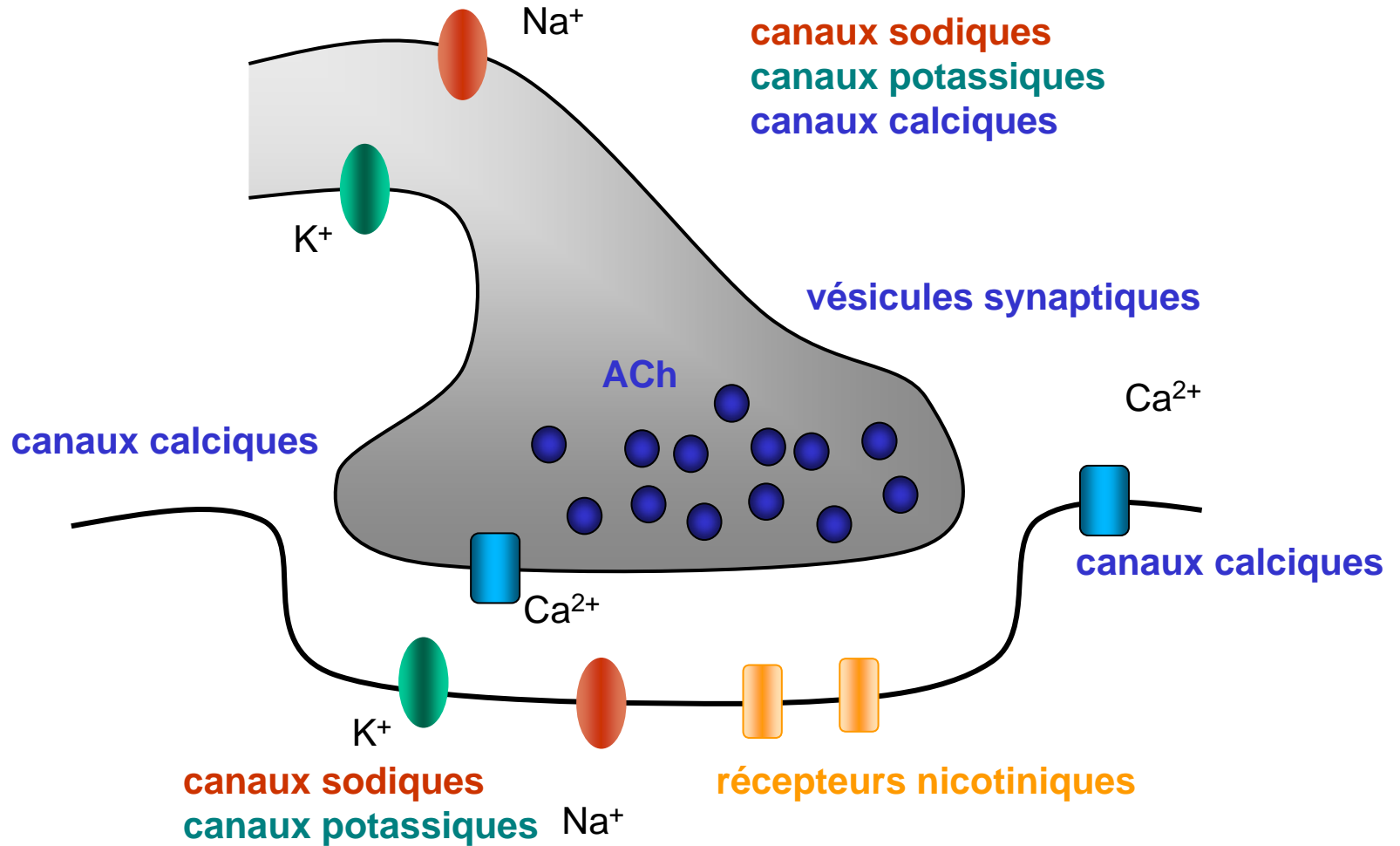
structure impliquée dans l'élévation de la  $[Ca^{2+}]_i$

exemple du muscle squelettique



# Le couplage excitation-contraction \_\_\_\_\_ structures impliquées

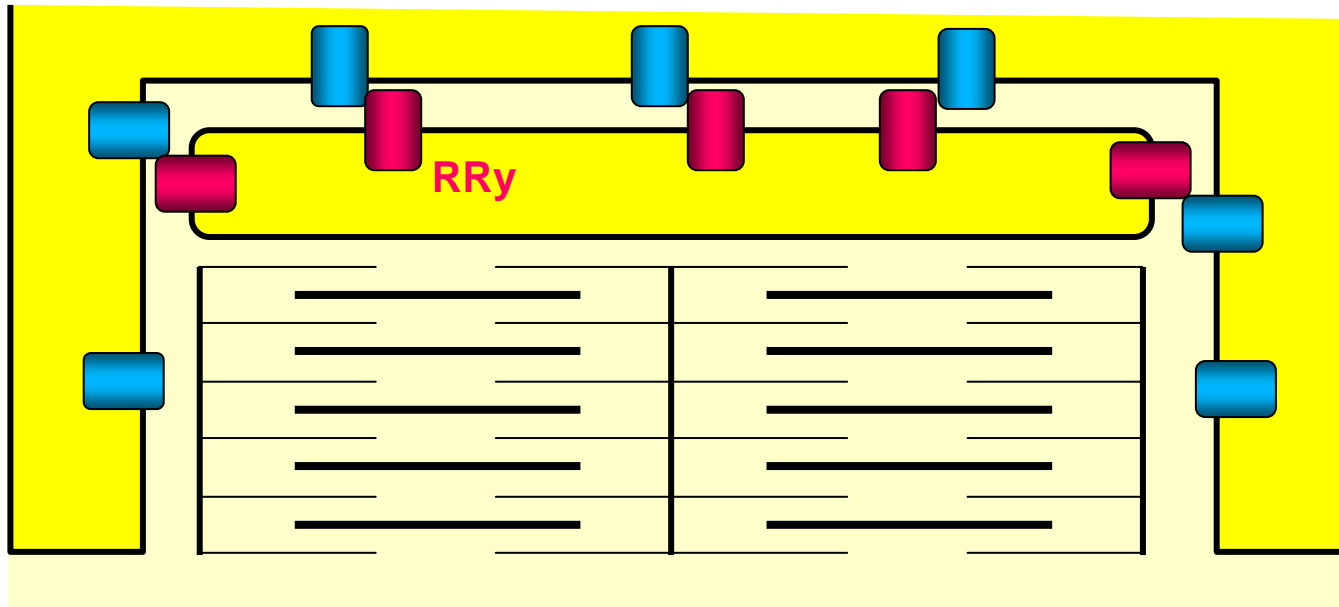
## jonction neuromusculaire



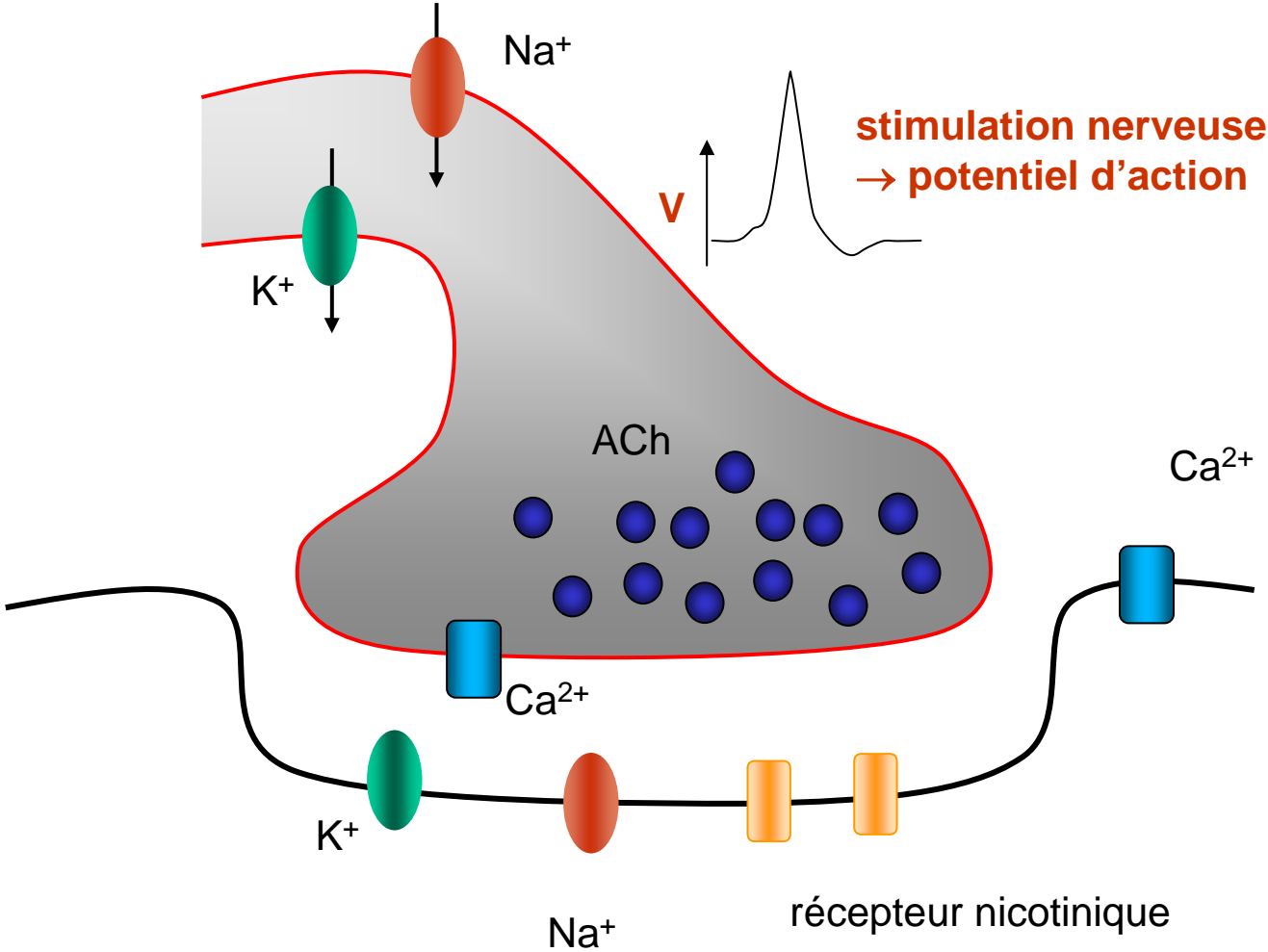
## Tubule T et réticulum sarcoplasmique

**VOC** : canaux calciques de la MP dépendant du potentiel (voltage-operated channel)

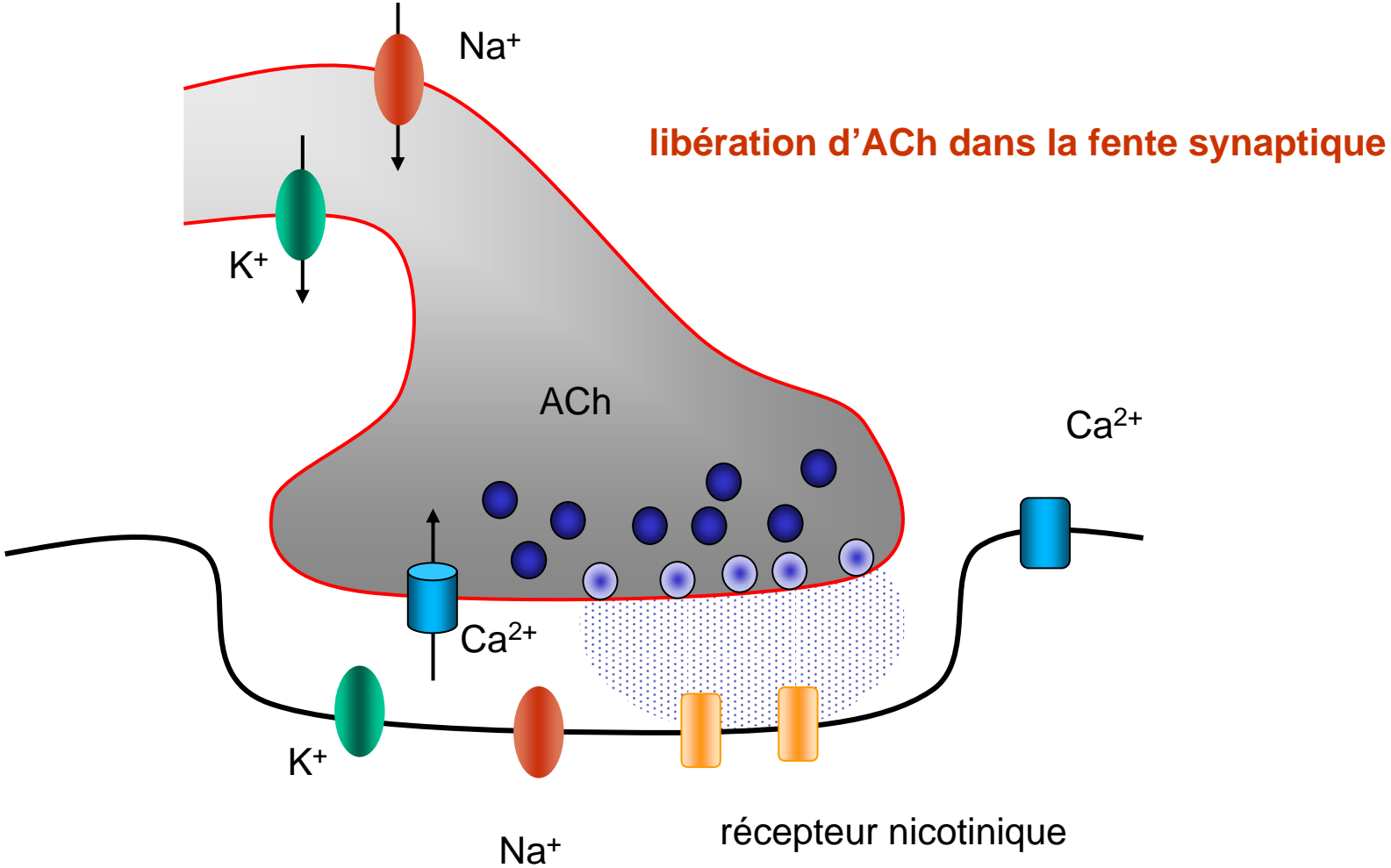
**RRy** : canaux calciques du RS sensibles à la ryanodine activés par :  
élévation de la  $[Ca^{2+}]_i$       couplage aux VOC



excitation-contraction

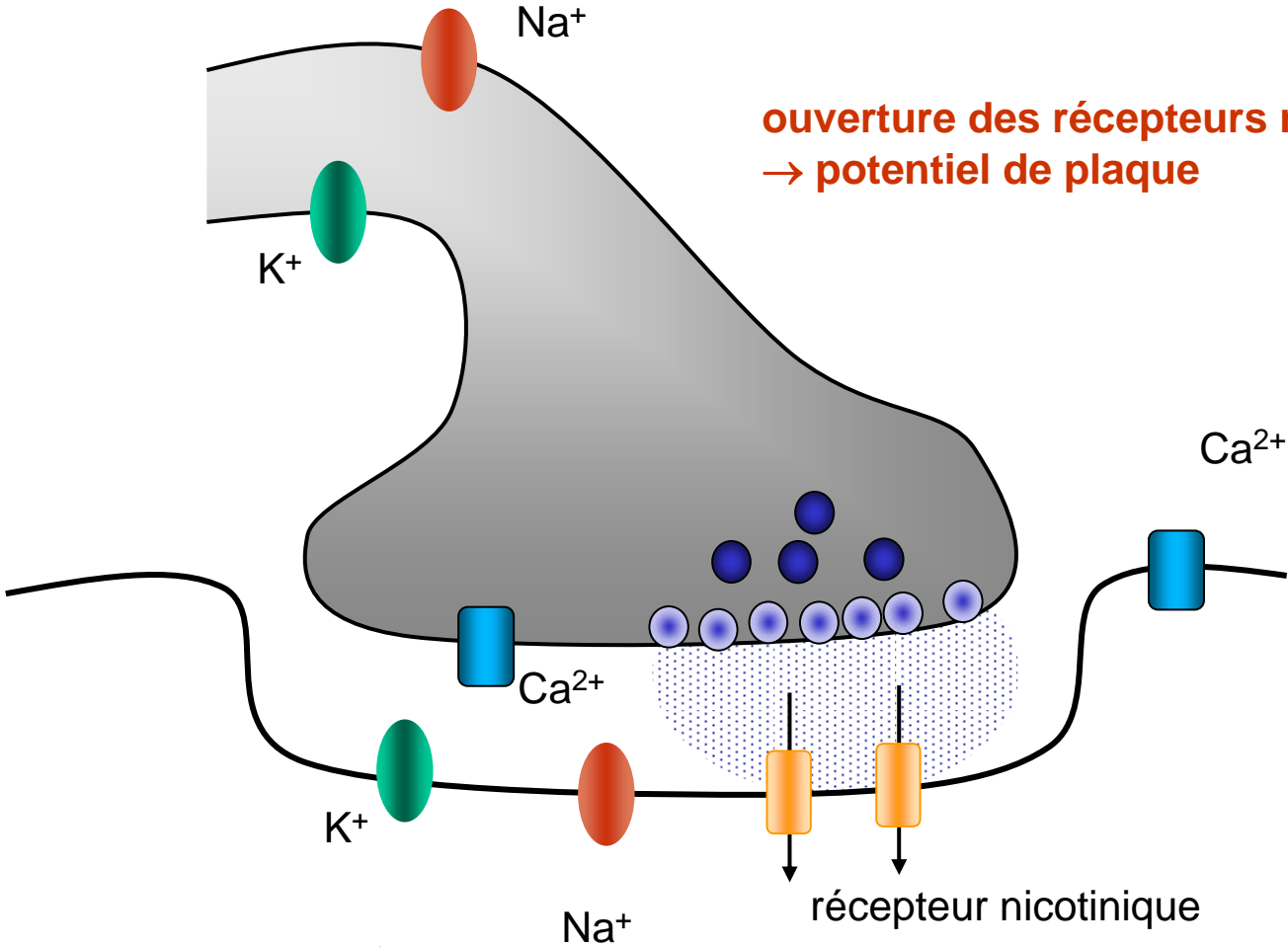


excitation-contraction





excitation-contraction

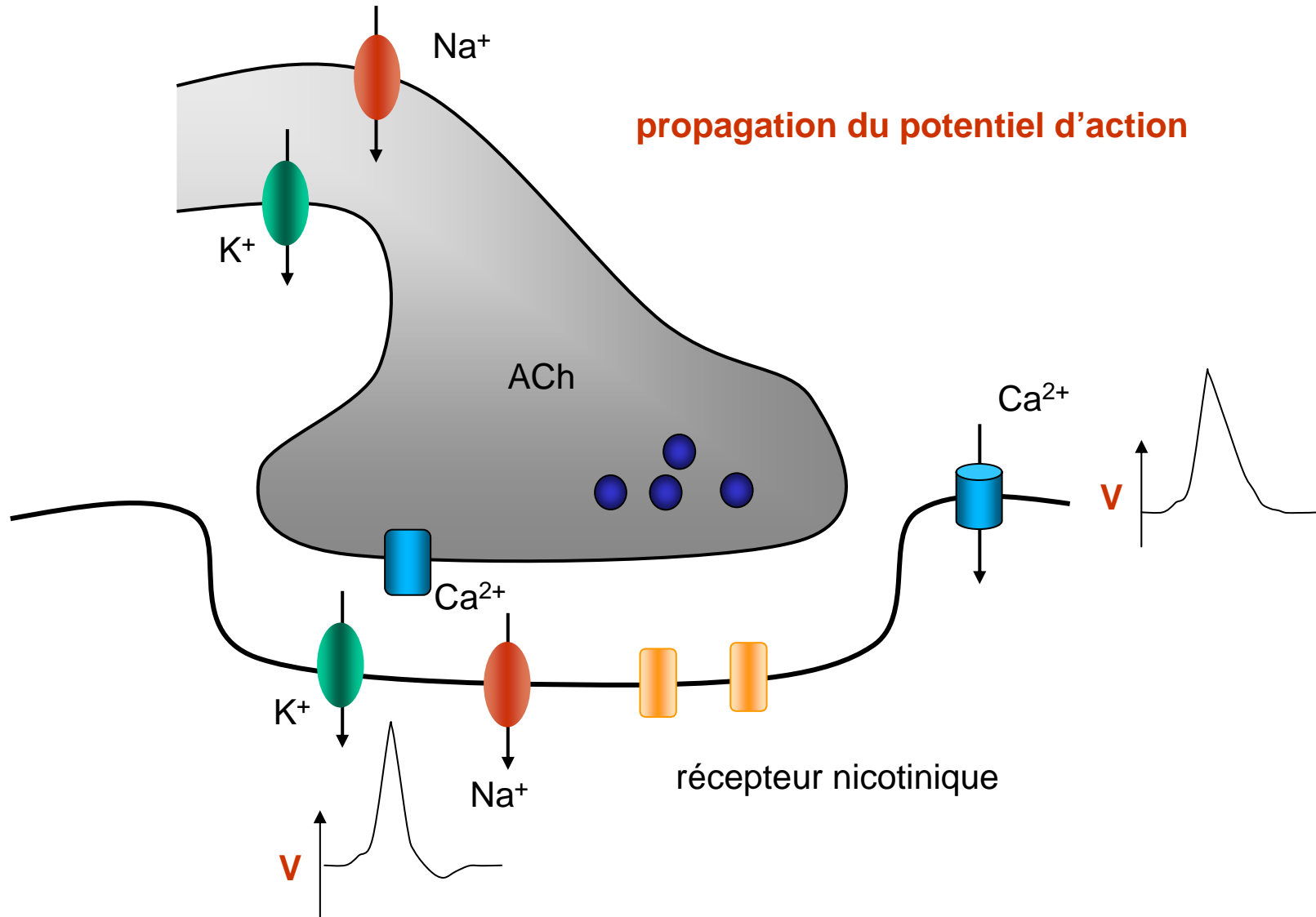


ouverture des récepteurs nicotiniques  
→ potentiel de plaque



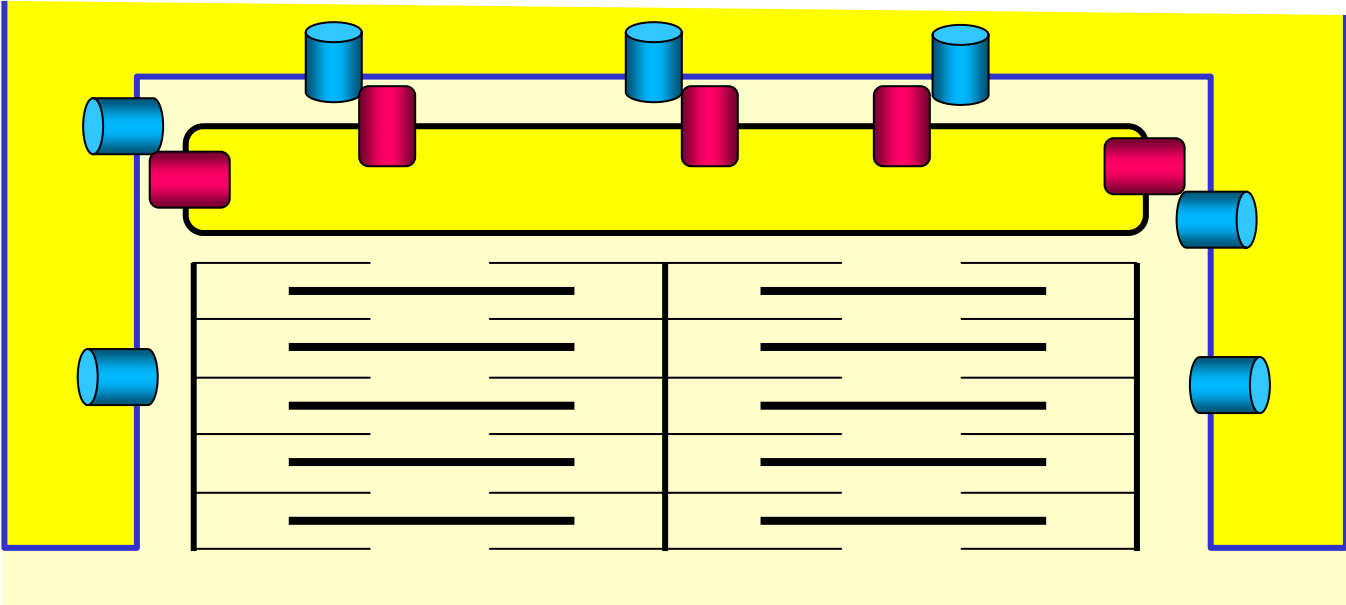
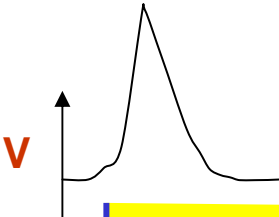


excitation-contraction



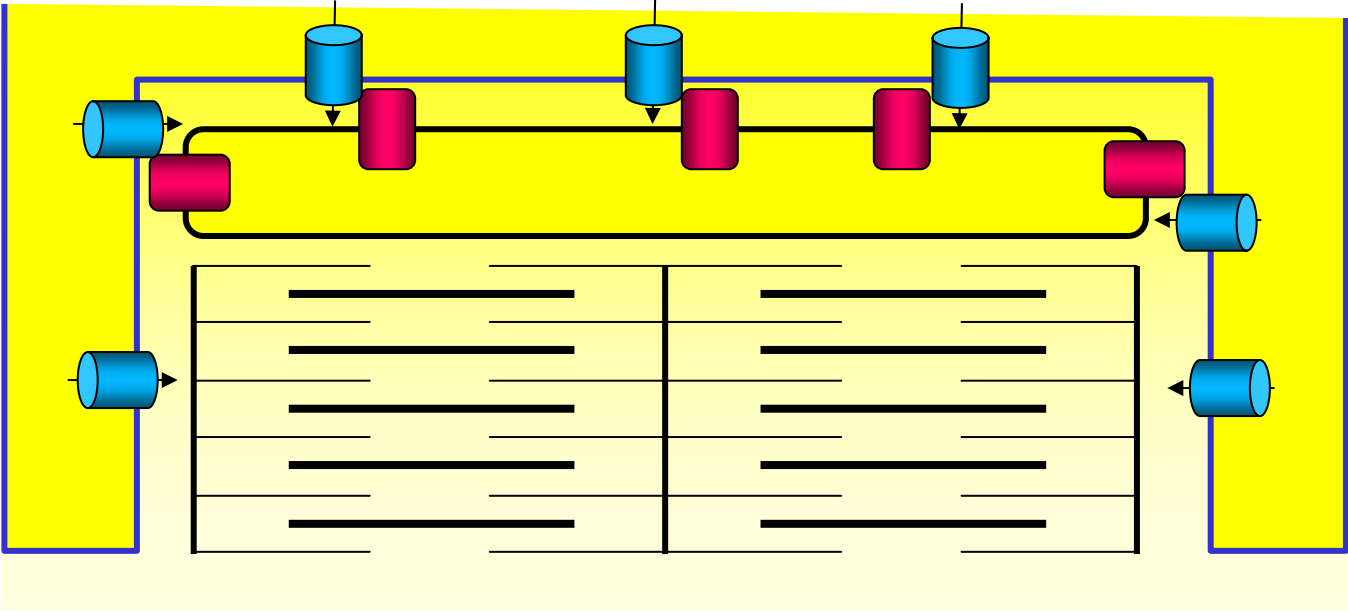
excitation-contraction

potentiel d'action → ouverture des VOC



excitation-contraction

stimulation → potentiel d'action → ouverture des VOC  
→ entrée de  $Ca^{2+}$  dans la cellule

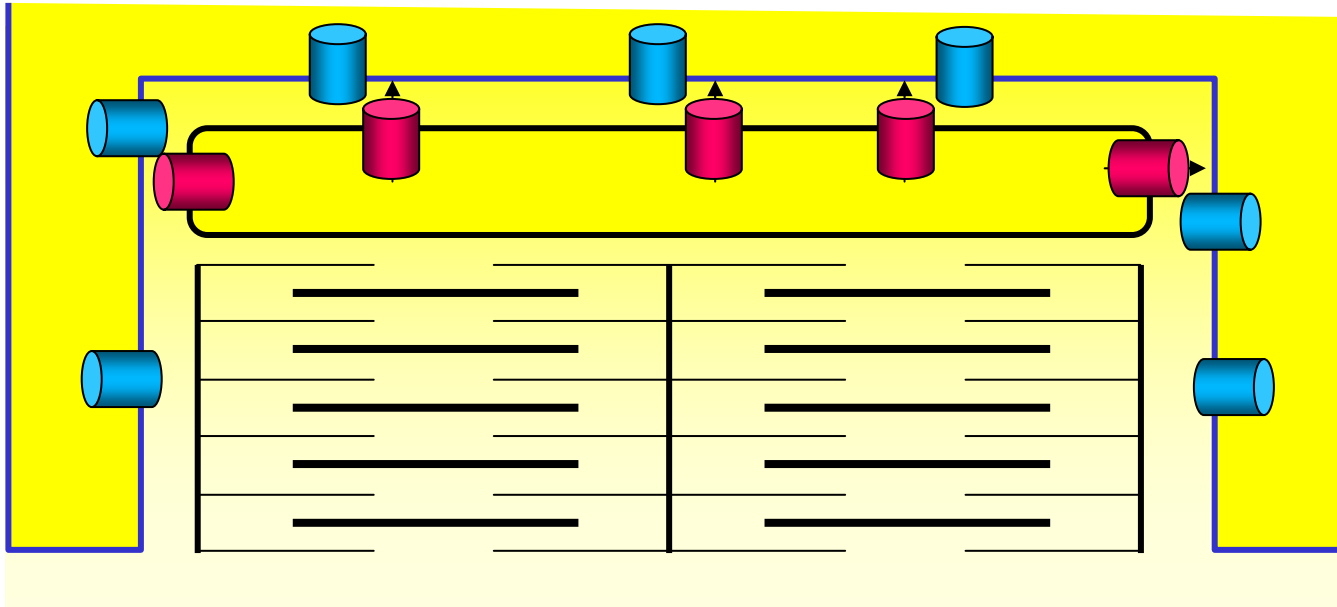


## excitation-contraction

stimulation → potentiel d'action → ouverture des VOC

→ entrée de  $\text{Ca}^{2+}$  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  $[\text{Ca}^{2+}]_i$**

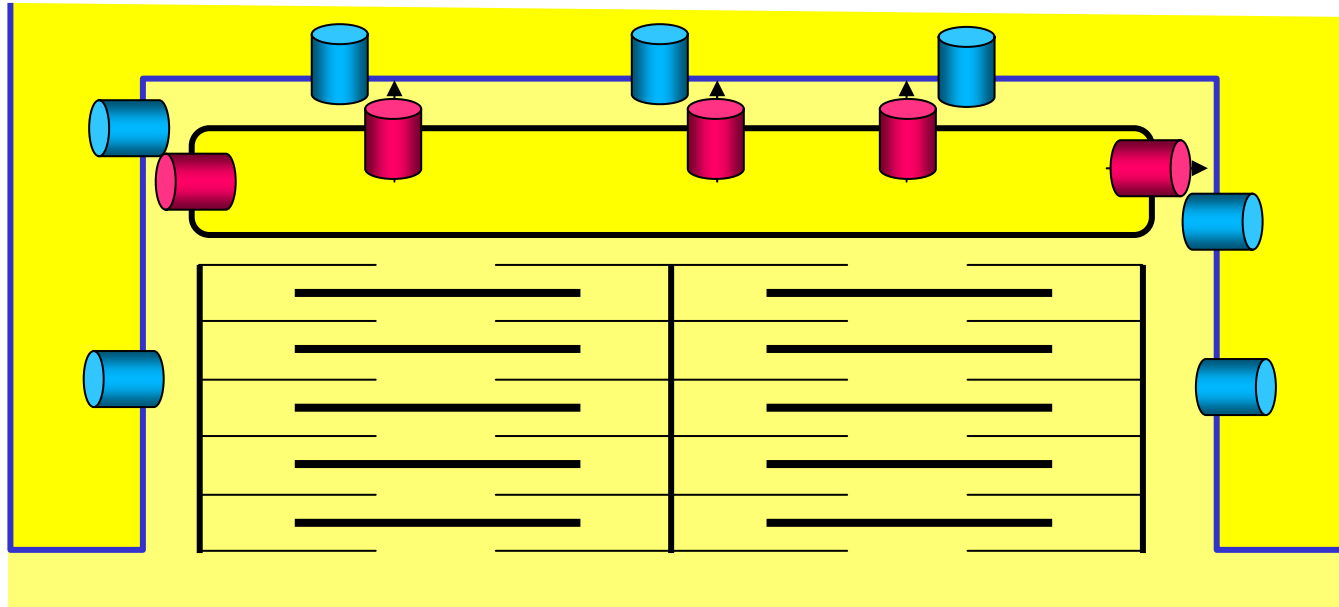
## excitation-contraction

**stimulation → potentiel d'action → ouverture des VOC**

→ **entrée de  $\text{Ca}^{2+}$  dans la cellule**

→ **ouverture des R Ry**

→ **libération de calcium du RS**



## excitation-contraction

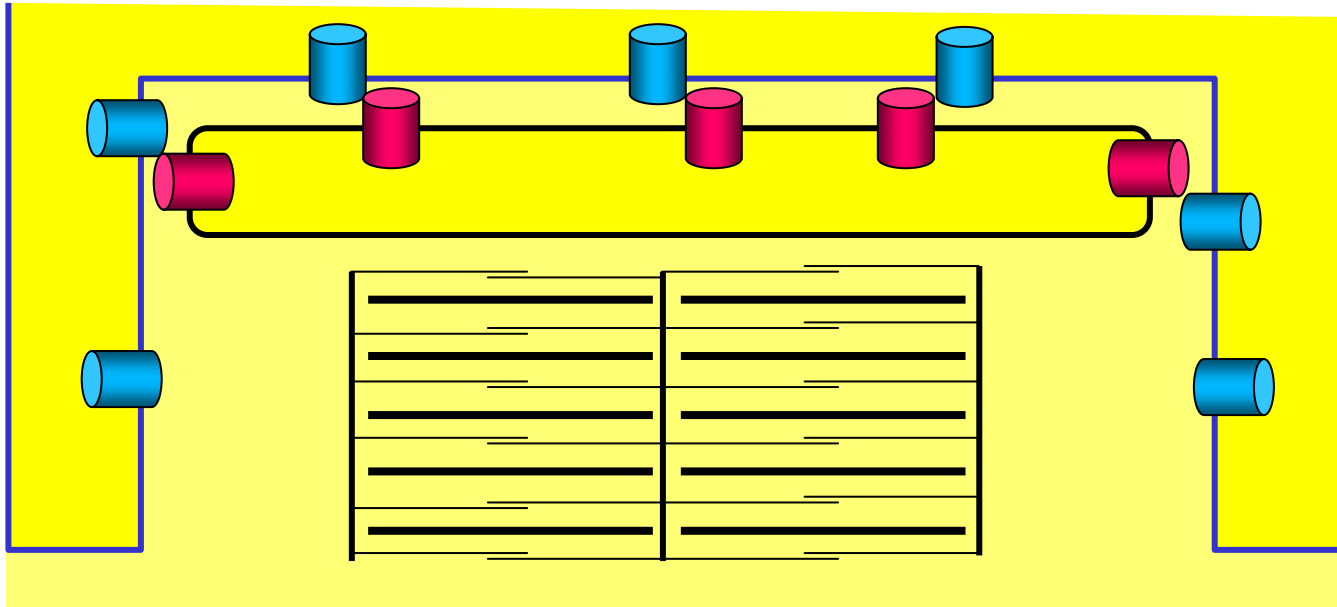
**stimulation → potentiel d'action → ouverture des VOC**

→ **entrée de  $\text{Ca}^{2+}$  dans la cellule**

→ **ouverture des R Ry**

→ **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  $\text{Ca}^{2+}$  du RS :**

**pas de couplage direct VOC-RRy**

**activation des RRy par l'élévation initiale de  $\text{Ca}^{2+}$  due aux VOC**

**modulation neurohormonale de l'intensité de la contraction**

## 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 R Ry

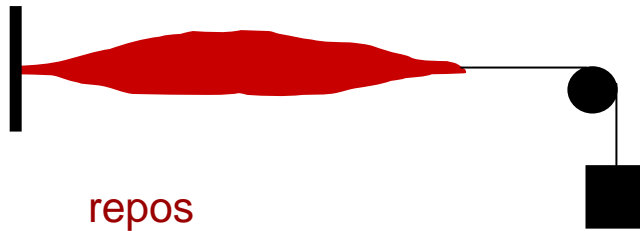
### couplage pharmacomécanique

stimulation → activation d'un récepteur membranaire  
→ réaction enzymatique et production de messagers intercellulaires  
→ libération de  $\text{Ca}^{2+}$  du RS et/ou influx de  $\text{Ca}^{2+}$  extracellulaire

modulation neurohormonale de l'intensité de la contraction

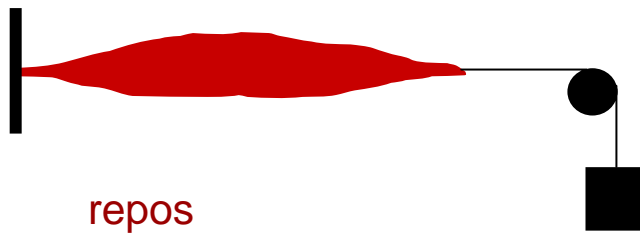
les différents types de contraction

**contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante**



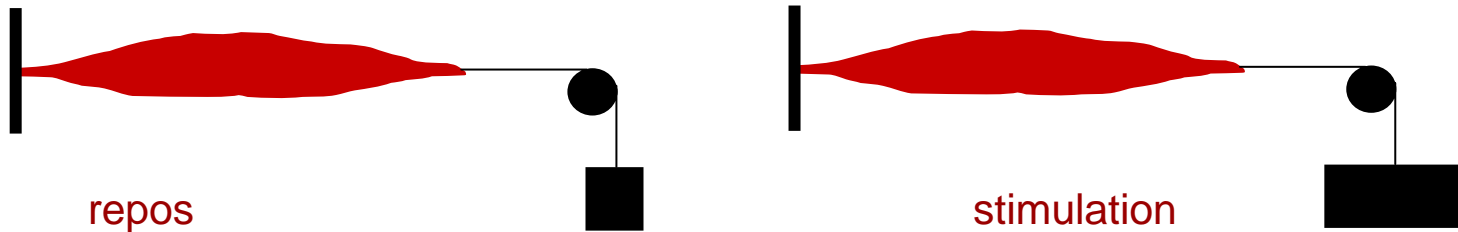
les différents types de contraction

**contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante**

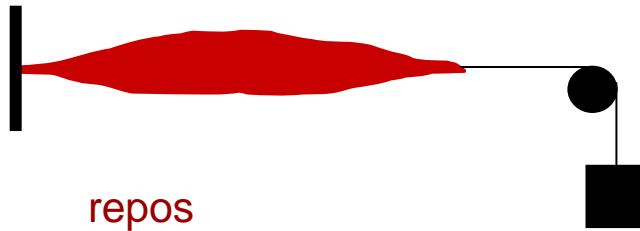


les différents types de contraction

**contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante**

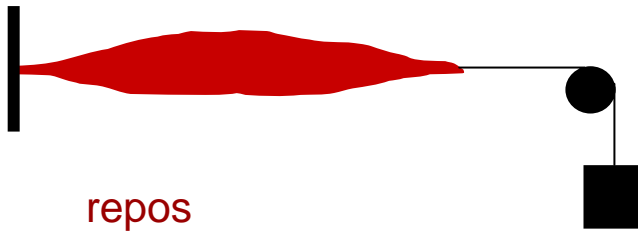


**contraction isotonique : contraction qui s'effectue à charge constante**

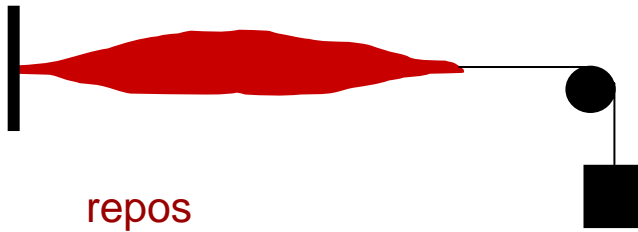


les différents types de contraction

**contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante**

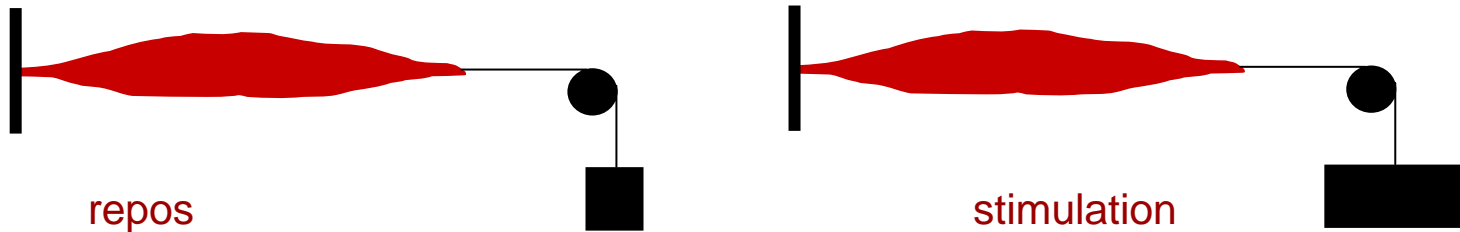


**contraction isotonique : contraction qui s'effectue à charge constante**

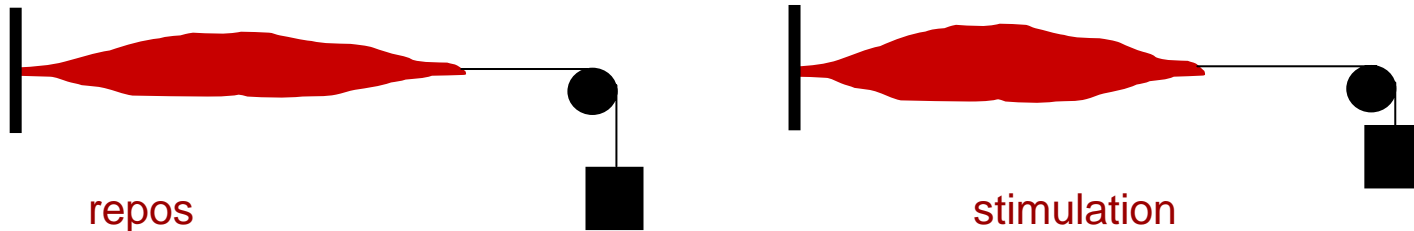


les différents types de contraction

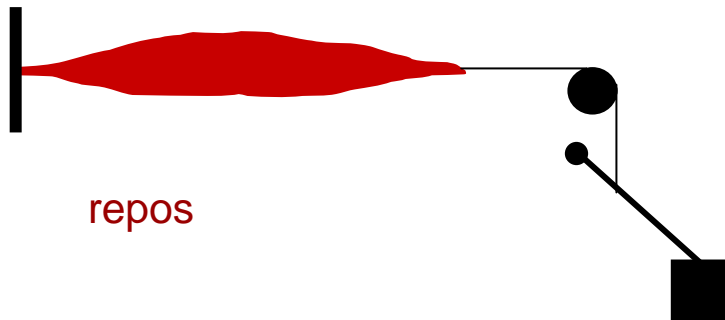
**contraction isométrique : contraction qui s'effectue à longueur constante**



**contraction isotonique : contraction qui s'effectue à charge constante**

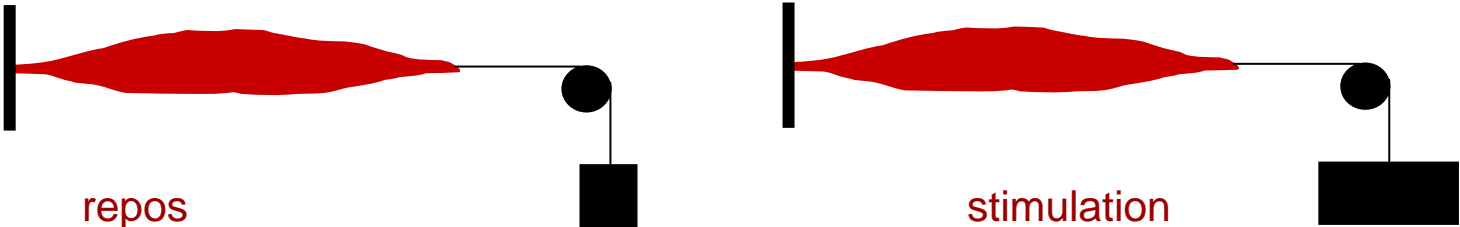


**contraction auxotonique : contraction qui s'effectue à charge et longueur variables**

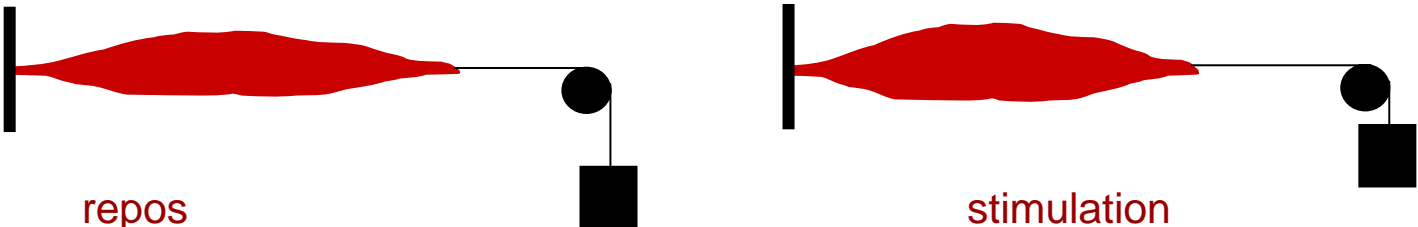


les différents types de contraction

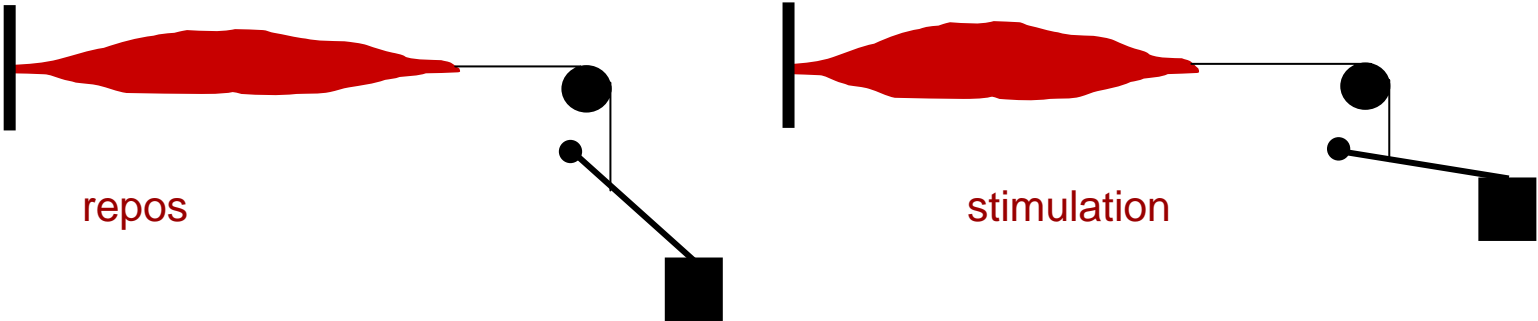
**contraction isométrique :** contraction qui s'effectue à longueur constante



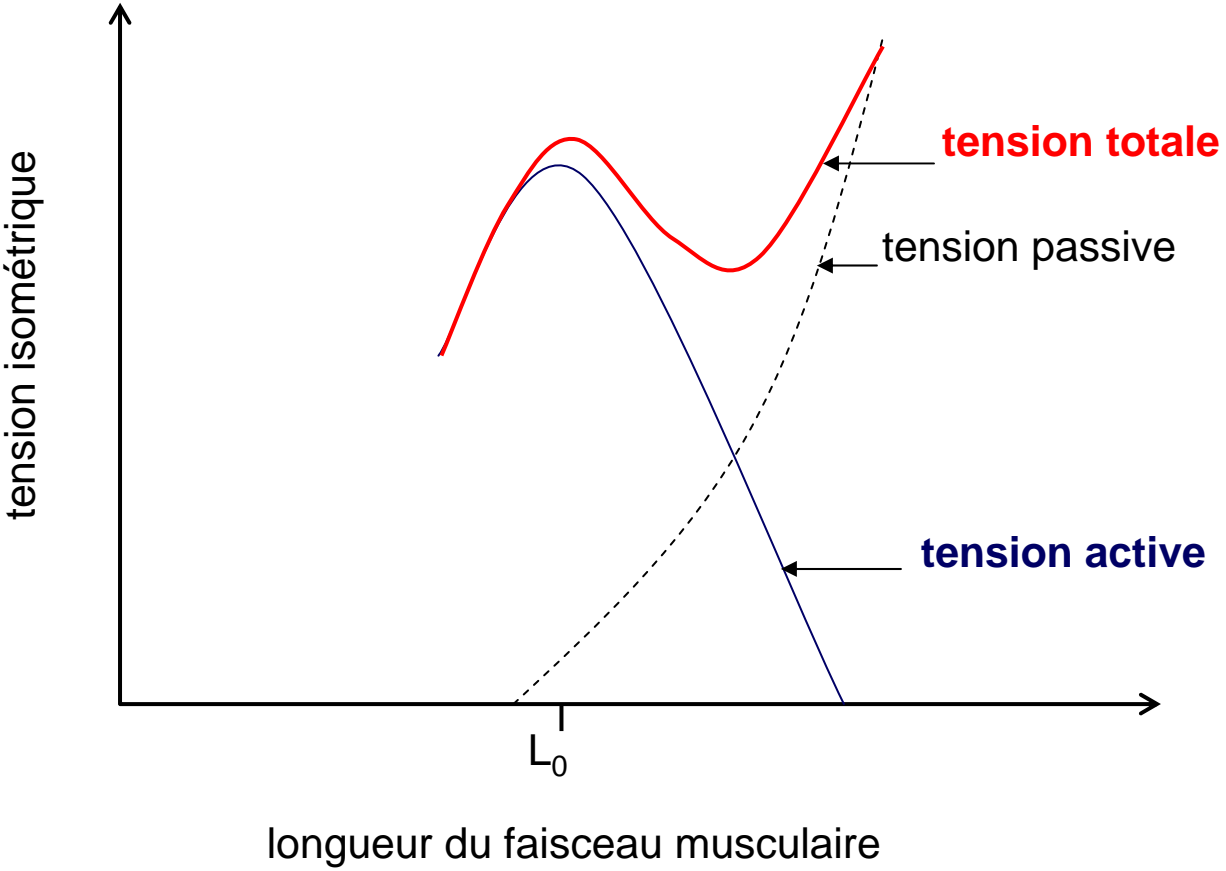
**contraction isotonique :** contraction qui s'effectue à charge constante



**contraction auxotonique :** contraction qui s'effectue à charge et longueur variables

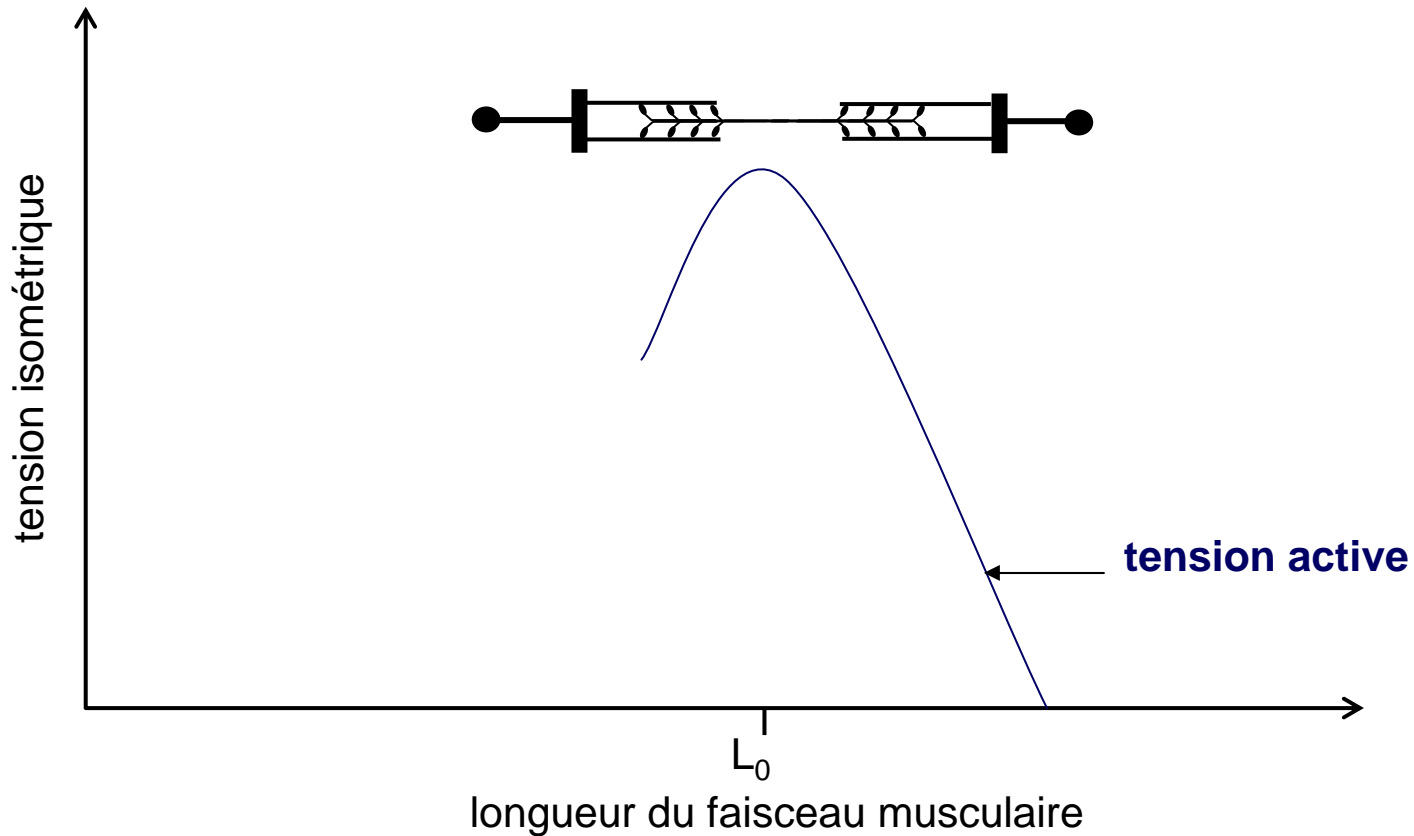




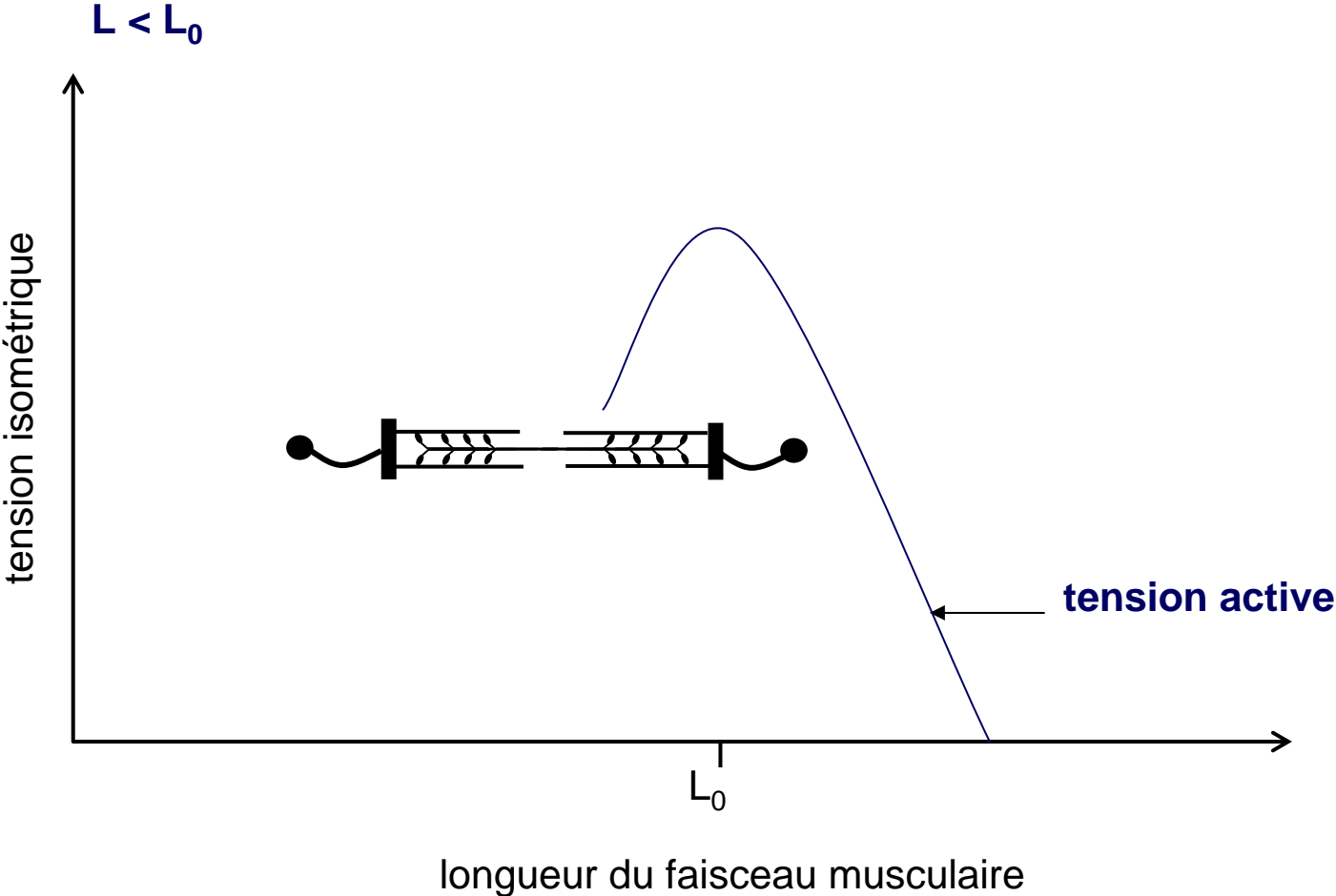


$L_0$  : longueur du muscle pour lequel la tension générée est maximale

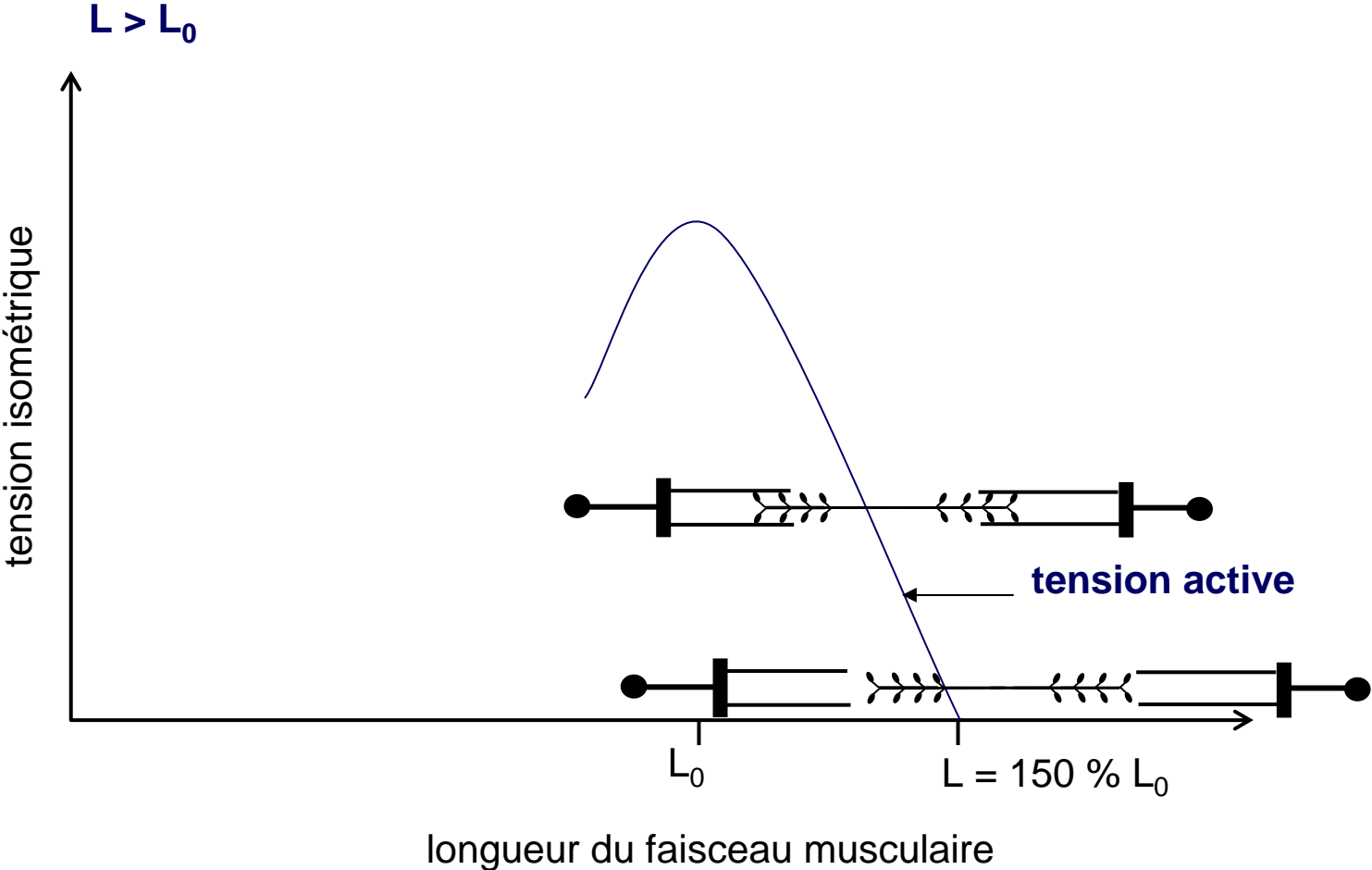
$L_0$  : longueur du muscle pour lequel la tension générée est maximale



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

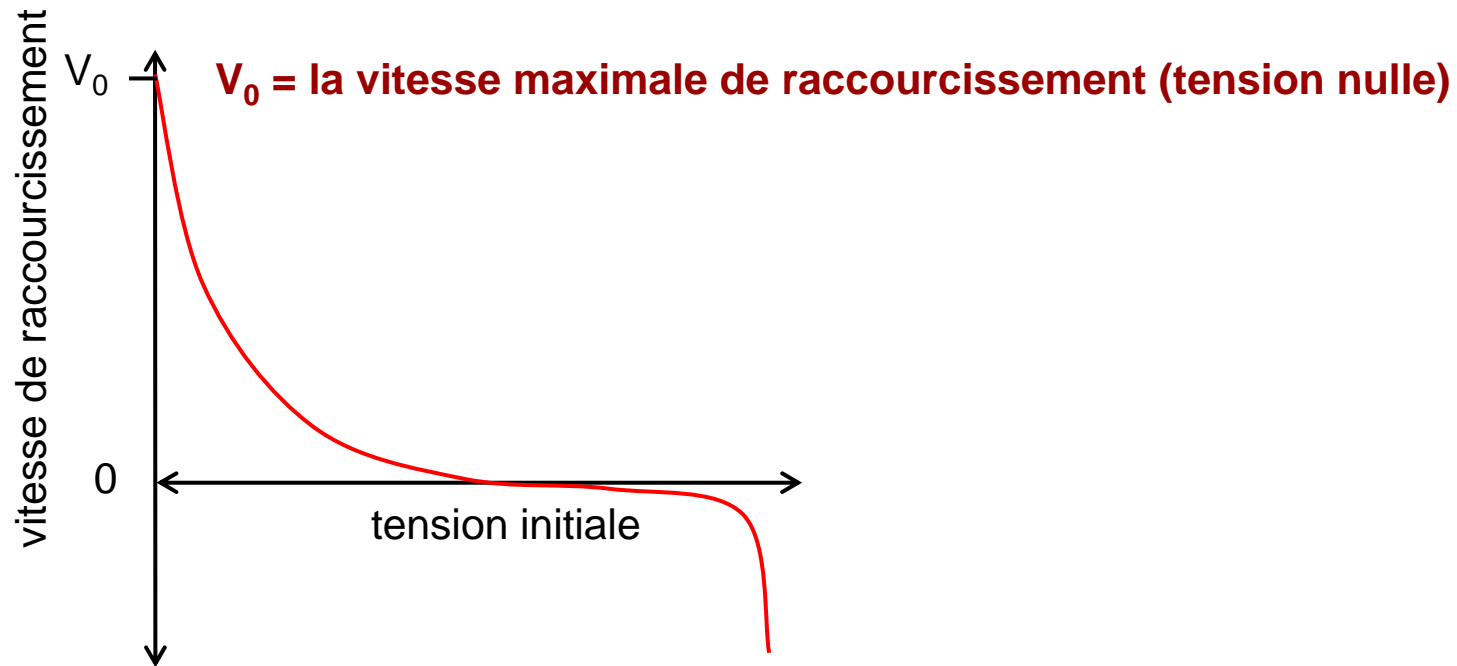


**les éléments élastiques ne sont pas sous tension**



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

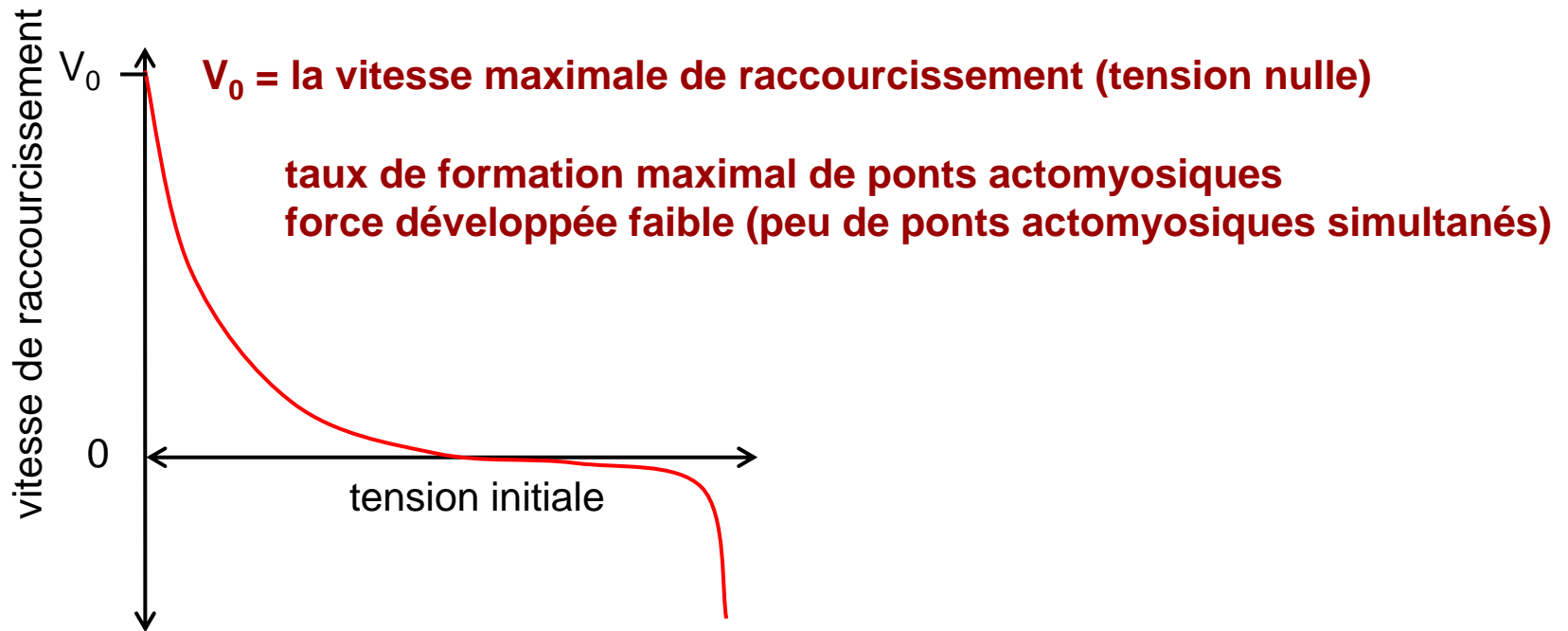
**vitesse de raccourcissement  $V$  dépend de la tension passive exercée sur le muscle**



**$V$  : dépend du nombre de sarcomères en série  
→  $V$  exprimée par longueur de demi-sarcomère**

# biophysique de la contraction \_\_ relation tension-vitesse de raccourcissement

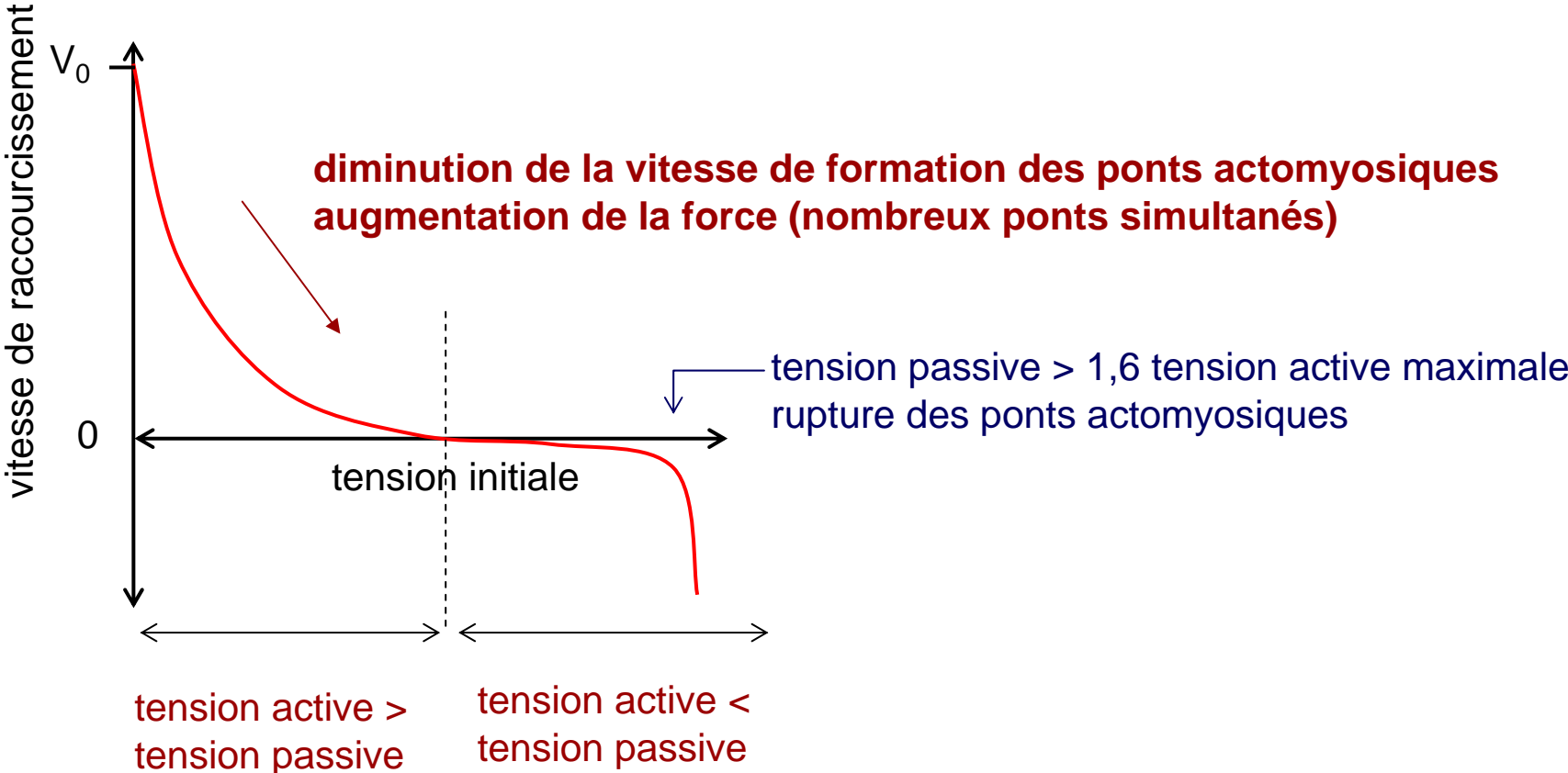
**vitesse de raccourcissement  $V$  dépend de la tension passive exercée sur le muscle**  
**vitesse d'hydrolyse de l'ATP dépend de la tension passive exercée sur le muscle**

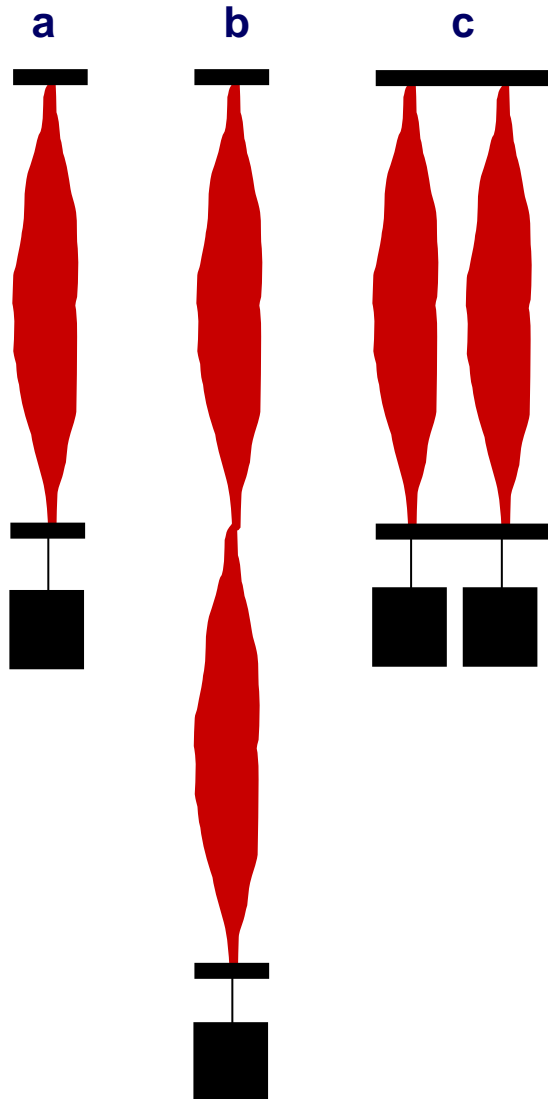


**$V$  : dépend du nombre de sarcomères en série**  
**→  $V$  exprimée par longueur de demi-sarcomère**

# biophysique de la contraction \_\_ relation tension-vitesse de raccourcissement

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





**force**

**proportionnelle à la densité de ponts actomyosique**

densité des filaments contractiles par surface de section musculaire = constante

la longueur d'un sarcomère = constante (2,5  $\mu\text{m}$ )

→ **proportionnelle à l'aire de section d'un muscle**  
**39,3 à 49 N/cm<sup>2</sup>**

→ **force a = force b = 1/2 force c**

*muscle rétracteur de la moule*

*sarcomère = 25  $\mu\text{m}$*

*force maximale générée = 100 N/cm<sup>2</sup>*



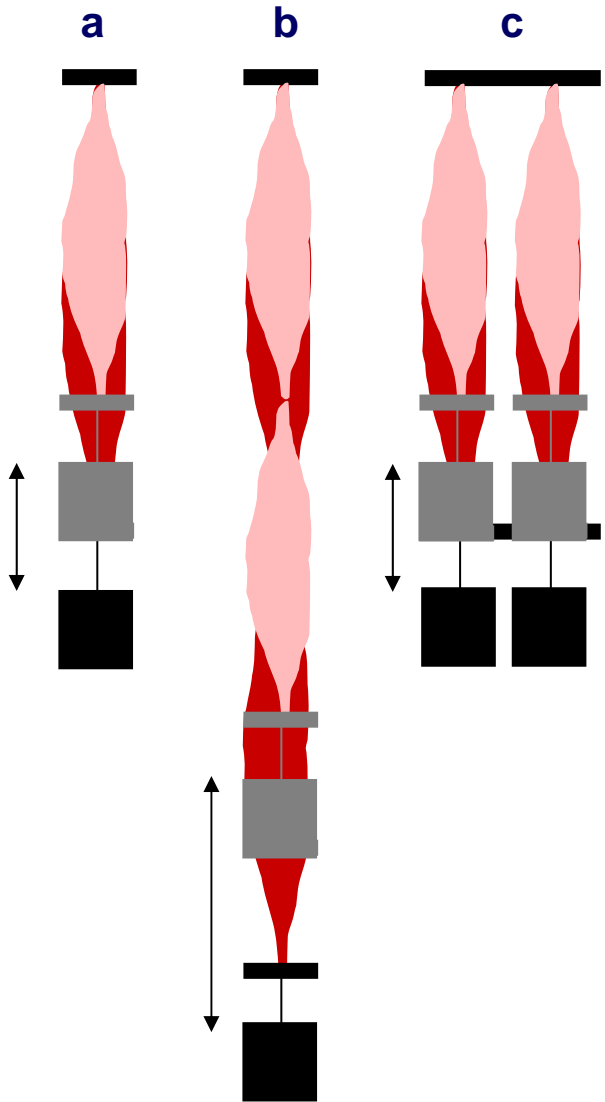
travail

travail = force x distance de déplacement

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

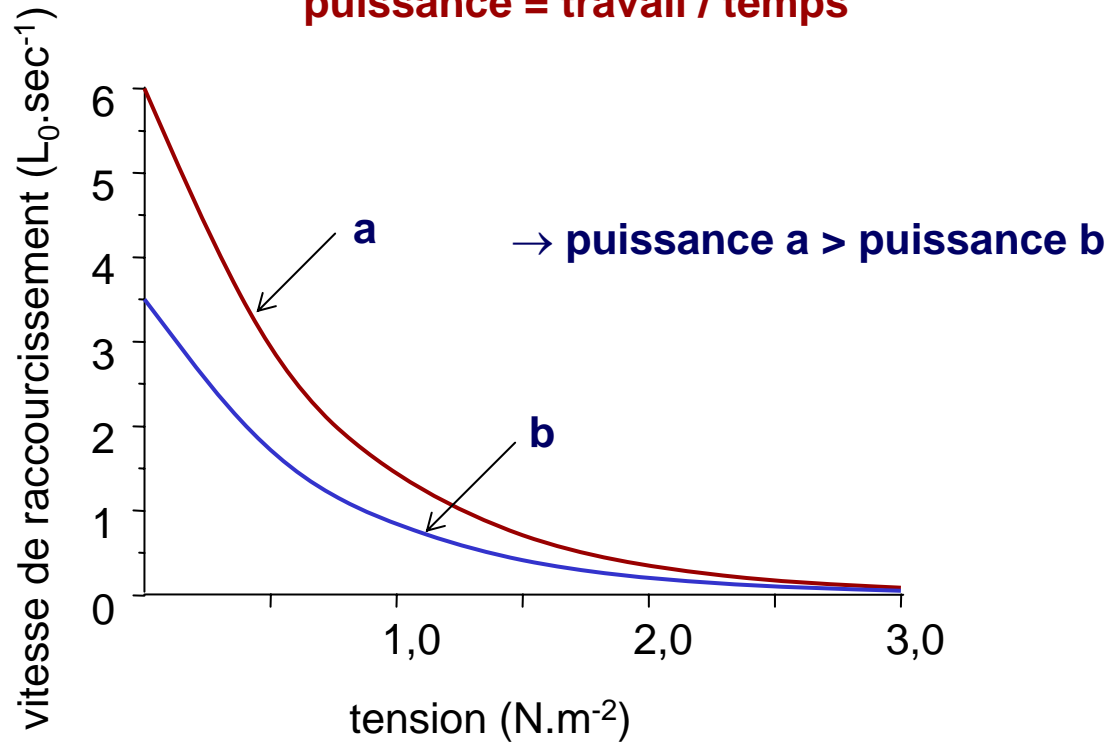
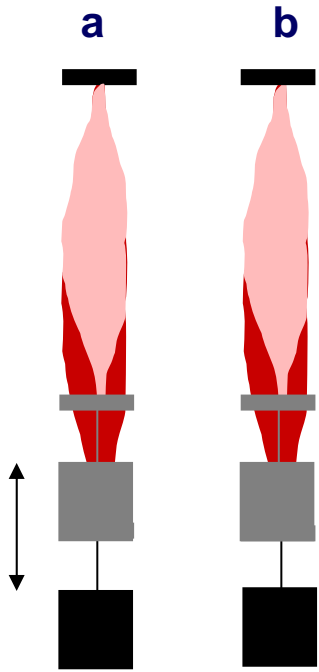
travail maximal : généré pour une force équivalent à 40 % de la forece maximale

(si la force augmente, le raccourcissement diminue)



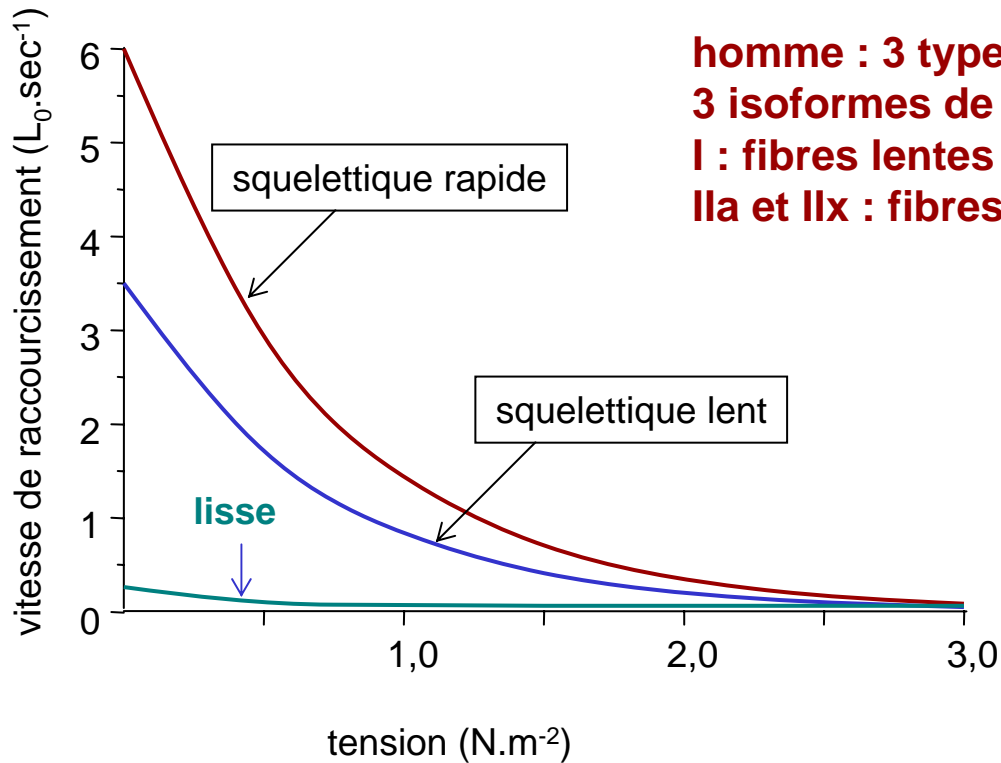
puissance

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



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)**

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 ( $\mu\text{m}^2/\text{fibre}$ )	I	IIa	IIx
marathoniens	4800	4500	4600
sprinters	5000	7300	5900