

# PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

## I. Les muscles striés squelettiques :

### La fibre musculaire striée squelettique (FMSS) :

#### 1. Généralités :

##### Les muscles striés squelettiques :

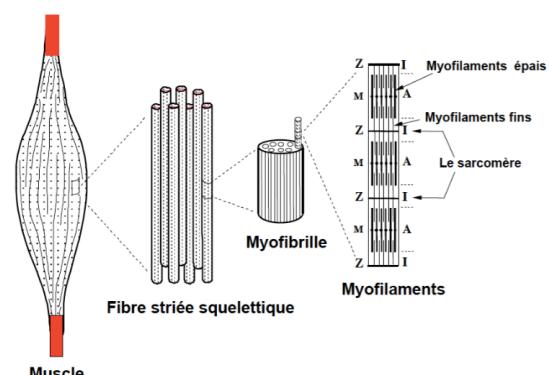
- représentent 40% de la masse corporelle
- ont une fonction dans la régulation thermique
- sont les organes effecteurs de la **motricité somatique** = fonction physiologique qui permet à l'individu :
  - D'assurer sa posture (**lutte anti-gravitaire**)
  - De se déplacer (**locomotion**)
  - Et d'échanger avec le milieu (**prélever, donner, modifier, communiquer**)
- Sont attachés aux pièces du squelette
- Leur contraction entraîne :
  - La stabilisation des articulations et interviennent donc dans la posture et l'équilibre = **motricité statique**
  - Le mouvement de ces pièces et le déplacement du corps = **motricité dynamique**
- Peuvent aussi s'insérer entre un os et un organe mou : ex : muscles oculomoteurs qui permettent au regard de se déplacer

##### Les muscles de l'organisme diffèrent :

- Par leur grande variété de formes et de dimensions :
  - Plats, longs, courts, annulaires
- Par leur fonction anatomique :
  - Fléchisseurs, extenseurs, bi-fonctionnels
- Par leurs propriétés métaboliques :
  - Ex : cinétique de la synthèse d'ATP
- Par leurs propriétés fonctionnelles :
  - Vitesse de contraction, résistance à la fatigue
- Par leur rôle physiologique :
  - Maintien postural (tonique) ou mouvement (phasique)

#### 2. Présentation anatomique et histologique :

- **Muscle** : quelques dizaines à plusieurs milliers de fibres musculaires
- **FMSS** :
  - Diamètre : 10 – 100 microns
  - Longueur : jusqu'à quelques dizaines de cm
  - Cellule multi nucléée
  - Myofibrilles : diamètre : 1 à 2 microns
  - Myofilaments

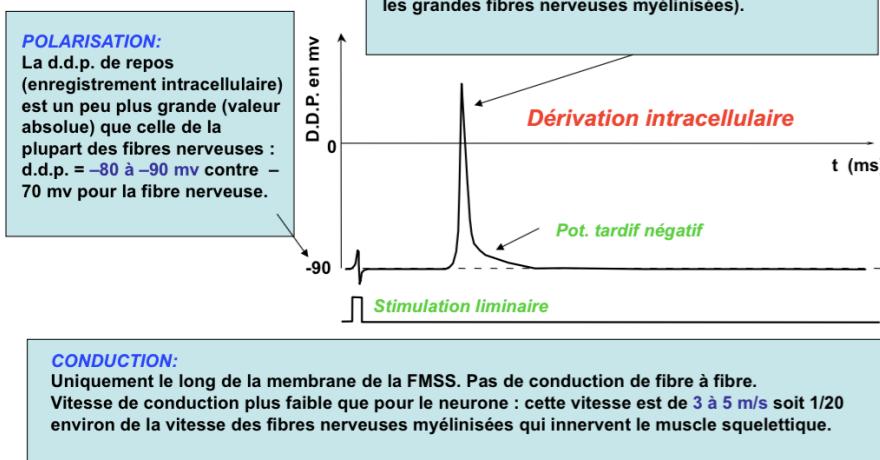


### 3. Etude physiologique :

#### a. Les propriétés électriques :

## 1- LES PROPRIETES ELECTRIQUES

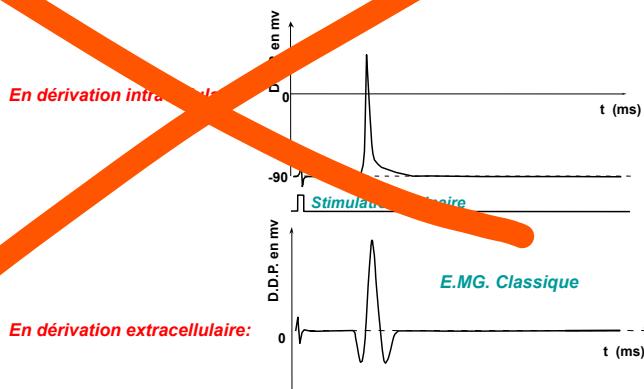
*Identiques à celles de la fibre nerveuse (mêmes mécanismes) avec quelques différences cependant:*



=> conduction + faible mais excitabilité + forte des FMMS comparées aux fibres nerveuses myélinisées.

### Morphologie des potentiels d'action électromyographiques :

MORPHOLOGIE DES POTENTIELS D'ACTION ÉLECTROMYOGRAPHIQUES:



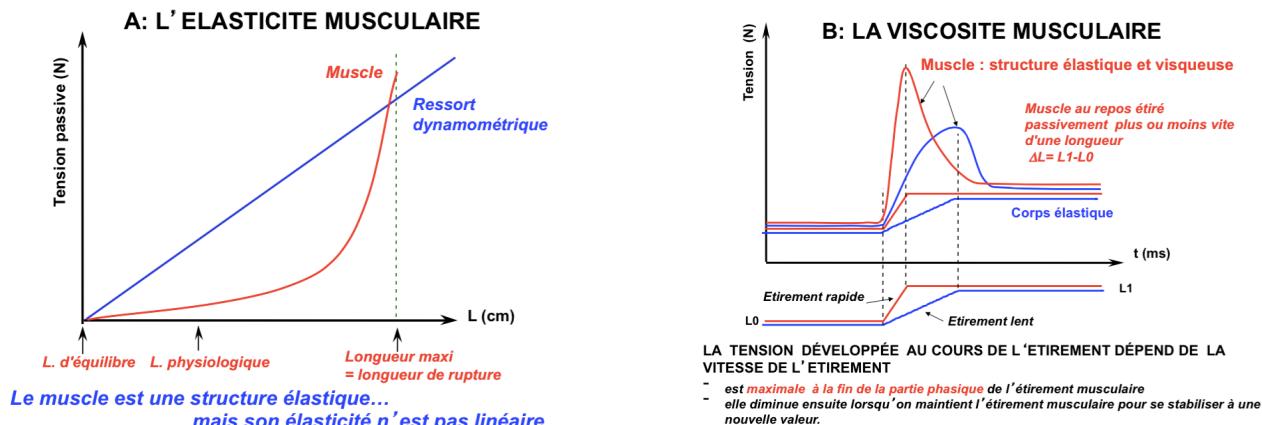
#### b. Les propriétés mécaniques :

- **Elasticité** : Propriété du muscle de se laisser **déformer** sous l'effet d'une force en opposant une résistance et de **reprendre sa forme** quand la force est supprimée.
- **Viscosité** : Propriété du muscle de faire varier sa résistance en fonction de la **vitesse de la déformation**.  
*Diminue quand la température augmente : principe de l'échauffement musculaire.*
- **Contractilité** : Propriété du muscle de développer une force, la tension musculaire, au niveau de ses tendons en se contractant.

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

### Les longueurs remarquables du muscle :

- **Longueur d'équilibre** : lorsque le muscle est détaché de ses insertions osseuses (= la plus petite longueur que peut avoir un muscle).
- **Longueur physiologique** : lorsque le muscle est en place (dans ses insertions) et que l'articulation est au repos (= **longueur de repos** du muscle).
- **Longueur de rupture** : lorsqu'à la suite d'un étirement passif se produisent les premières déchirures musculaires (= **longueur maximale** du muscle).



### Elasticité :

- Augmentation linéaire du ressort dynamométrique
- Pour le muscle, la tension passive augmente peu au début (longueur petite) mais quand au voisinage de la longueur de rupture, augmentation +++ de la tension passive (commence déchirement du muscle)

### Viscosité :

- Etirement lent : augmentation tension pendant période d'allongement, puis rediminution quand arrêt de l'étirement
- Etirement rapide : de même longueur mais sur période de temps 3/4 fois plus courte : quand sur un ressort (corps élastique), rien ne change, augmentation de la tension se produit de manière linéaire et directement proportionnelle à la longueur : pas d'augmentation de la tension due à cette augmentation de la vitesse d'allongement. Quand étirement d'un muscle (élastique et visqueux), grande augmentation de tension qui revient progressivement à une valeur plus faible. => la tension développée au cours de l'étirement dépend de la vitesse d'étirement, elle peut être maximale à la fin de l'étirement du muscle et diminue ensuite lorsqu'on maintient l'étirement musculaire pour se stabiliser à une nouvelle valeur.

### • Généralités sur la « contraction musculaire » :

#### a) La tension musculaire est une force mécanique (Newton) qui peut apparaître dans deux types de conditions :

- Condition active : lors d'une activité musculaire : (qu'elle soit tonique ou phasique, provoquée par une stimulation électrique, volontaire ou réflexe)...
- Condition passive : lorsque le muscle est soumis à un étirement passif (cette force ou tension se manifeste alors par une résistance à l'étirement)...

#### b) La « Contraction » musculaire :

- « Activité musculaire » = suite de phénomènes aboutissant à la production de force par le muscle, (c.a.d. mise en jeu des ponts actine-myosine)
- pas forcément référence à un « raccourcissement » musculaire : le raccourcissement dépend des conditions de charges, des forces qui s'opposent au raccourcissement

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

### c) La contraction musculaire peut se faire :

- à longueur musculaire constante : elle est dite « **isométrique** », sert à maintenir en place une articulation, ex : lutter contre la pesanteur lors du maintien d'une posture
- avec un changement de longueur du muscle : elle est dite « **isotonique** » la force est alors utilisée pour mobiliser une articulation et donc un segment corporel (lorsque la charge mobilisée est constante).
- Question : le muscle soulève-t-il la charge ?
  - o Oui : isométrique
  - o Non : isotonique

### d) Terminologie :

- Tension = force exercée par la contraction du muscle sur un objet
- Charge = force exercée sur le muscle par le poids de l'objet
- Tension et charge sont donc deux forces qui s'opposent.
- Pour soulever une masse, il faut que le muscle exerce une tension supérieure à la charge.
- Au niveau d'une articulation, la force développée par les muscles s'exprime en terme de couple de forces.

### e) Au cours d'une contraction musculaire, la tension musculaire sert :

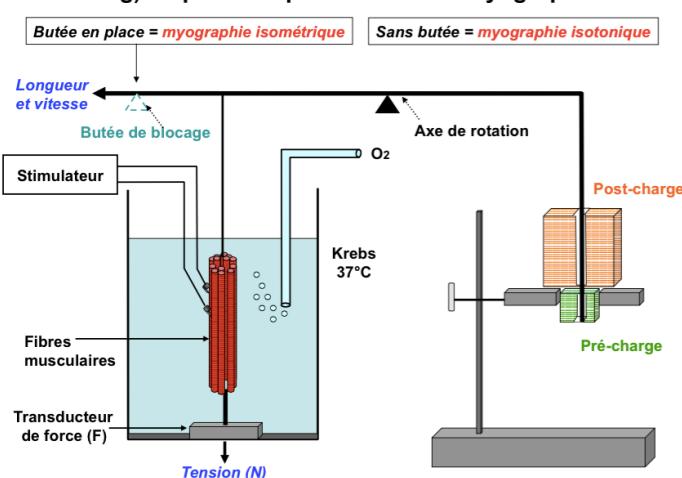
- à stabiliser une articulation (contraction isométrique)
- à déplacer une charge (contraction isotonique)

**Tension musculaire totale** = **TM active** (non mesurable directement) qui est l'activité de la machinerie contractile + **TM passive** due à la mise en tension des éléments visco-élastiques du muscle

### f) Enregistrement de la contraction musculaire = myographie (2 types) :

- Myographie **isotonique** : Raccourcissement ( $\Delta L$  en mm) en fonction du temps (t)
- Myographie **isométrique** : Tension (N) en fonction du temps (t)

### g) dispositif expérimental = le myographe



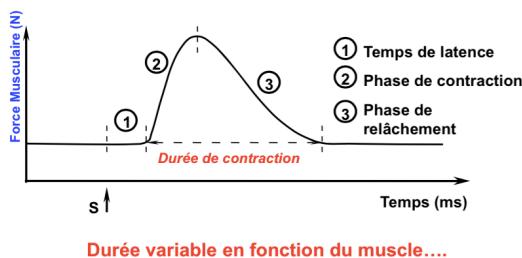
Isolement d'un muscle ou fibres musculaires prélevés dans un tampon constitué d'ions et nutriments (liquide physiologique) dans lequel on fait venir l'oxygène indispensable => maintenir en survie le muscle. Partie inférieure attachée à un transducteur de force (calculer la tension : N). Partie supérieure attachée à une barre avec un axe de rotation (en absence de butée de blocage), si système mobilisé : calcul de la longueur et vitesse du muscle. Stimulateur délivre un courant qui provoque la contraction du muscle.

- **La pré-charge** conditionne la longueur de la FMSS « avant » la contraction musculaire...  
Plus la pré-charge est importante, plus la longueur de la fibre est grande.
- **La post-charge** représente la charge mobilisée au cours de la contraction.
- Rajouter une butée de blocage : le muscle ne peut donc pas se raccourcir : équivalent d'une post-charge très importante qui empêche le raccourcissement musculaire.

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

- **Contraction musculaire isométrique :**

Réponse mécanique à un seul P.A = secousse musculaire



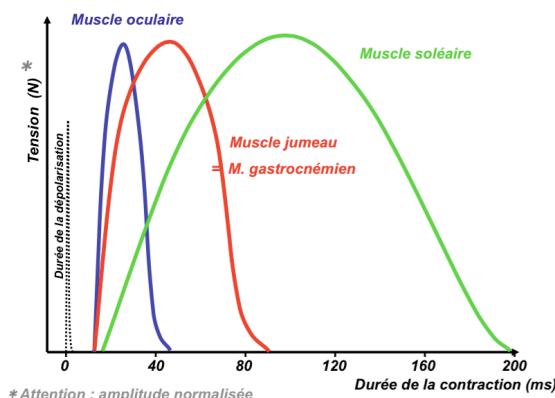
Durée variable en fonction du muscle....

**Secousse musculaire** : contraction d'un muscle en réponse à la génération d'un seul PA dans les fibres de ce muscle.

**Durée contraction** = temps de contraction + temps de relâchement

Variable en fonction des muscles.

a) contractions isométriques de trois types de muscle

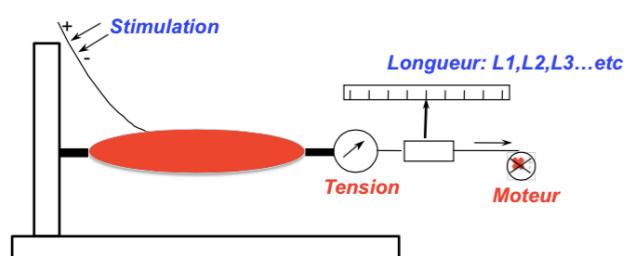


b) Ces durées de contraction sont adaptées à la fonction respective de chacun de ces muscles :

- Muscle oculaire : muscles très rapides (durée : 25 ms) pour permettre la fixation du regard : **phasique**
- Muscles jumeaux de la jambe (gastrocnémien) : muscles modérément rapides (60 ms) pour permettre une rapidité de mouvement suffisante pour la course et le saut : **phasique**
- Muscle soléaire : muscles lents (env. 200 ms) impliqués dans le maintien continu de la position du corps contre les forces de gravitation : **postural ou tonique**

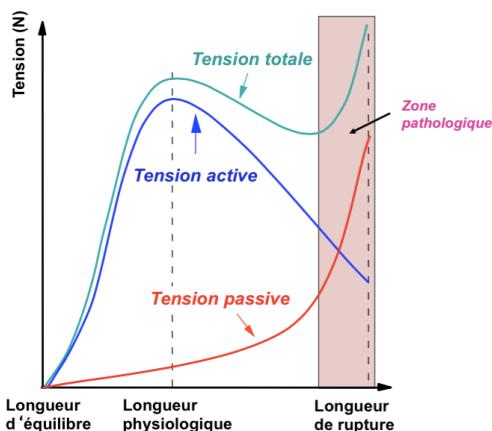
c) Les relations tension-longueur

Autre dispositif expérimental :



- **Myographie isométrique:** longueur musculaire constante (= précharge constante), stimulation électrique et enregistrement de la tension musculaire totale.
- Si on mesure cette force pour diverses longueurs musculaires (pré-charges), on obtient la **courbe relation tension-longueur**

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire



**Tension totale** : somme de la tension passive et de la tension active.

- **Tension passive** : augmente vite en fin de longueur

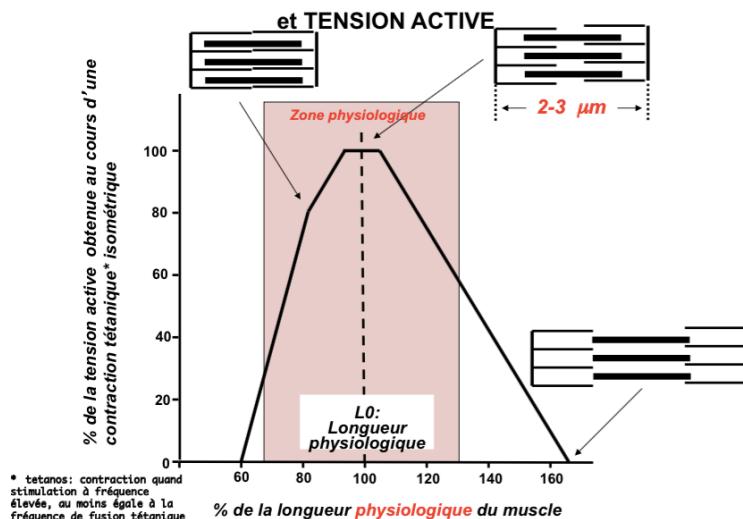
- **Tension active** : maximale en longueur physiologique

- **Tension totale** : maximum à la longueur physiologique : surtout le fait de la tension active, si on étire encore le muscle, la tension active chute mais la tension passive augmente donc la tension totale ne chute pas beaucoup.

Tension musculaire totale développée par un muscle lors d'une contraction isométrique : = TM active (non mesurable directement) qui est l'activité de la machinerie contractile + TM passive due à la mise en tension des éléments visco-élastiques du muscle :

- Passe par un pic lorsque le muscle est stimulé à sa longueur physiologique
- Redescend ensuite lorsque l'on quitte la longueur physiologique pour remonter et dépasser ce pic lorsque l'on entre dans la zone pathologique où vont apparaître les premières déchirures musculaires
- est maximale lorsque le muscle est stimulé à sa longueur physiologique

6è H      RELATION entre PRECHARGE (longueur du muscle)



**Abscisse** : pourcentage de la longueur physiologique du muscle.

**Ordonnée** : pourcentage de tension active obtenue au cours d'une contraction isométrique tétonique = tétonus : contraction quand on stimulate le muscle à fréquence élevée.

**A la longueur physiologique** : 100% de tension active obtenue au cours d'une contraction tétonique isométrique : maximum de contraction que peut faire le muscle.

Très faible zone de maximum mais chute vite : +30% ou -30% de la longueur physiologique, on passe en dessous de 60% de la tension tétonique maximale.

Cause : organisation particulière des sarcomères :

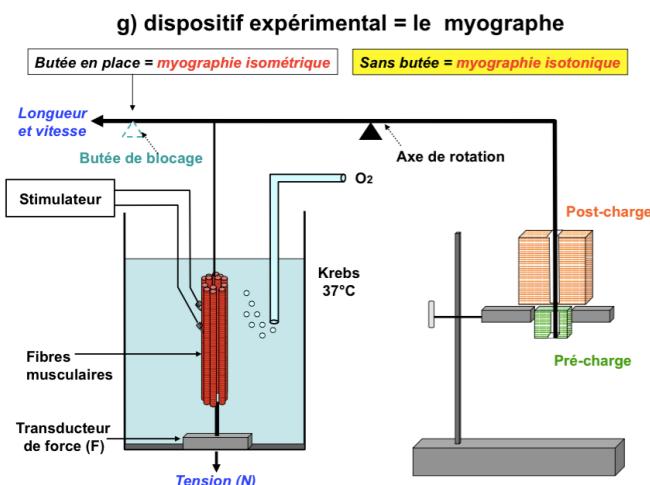
- longueur physiologique : chevauchement final entre les filaments fins et épais : les têtes de myosine interagissent avec les filaments fin d'actine de façon optimale : niveau d'interaction qui permet d'obtenir la longueur maximale
- Etirer de plus de 20% : plus cette organisation

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

- Totalement étirer le muscle : les filaments d'actine et de myosine ne sont plus en rapport : plus de tension active : **désengrainement**
  - Pas assez étirer le muscle (se rapproche de la longueur d'équilibre) : **surengrainement, chevauchement** : les filaments d'actine se chevauchent et gênent l'interaction avec la myosine : plus de relation actine-myosine => diminution de la tension
- => Importance de la pré-charge pour la force que peut développer le muscle

### Cette longueur physiologique du muscle :

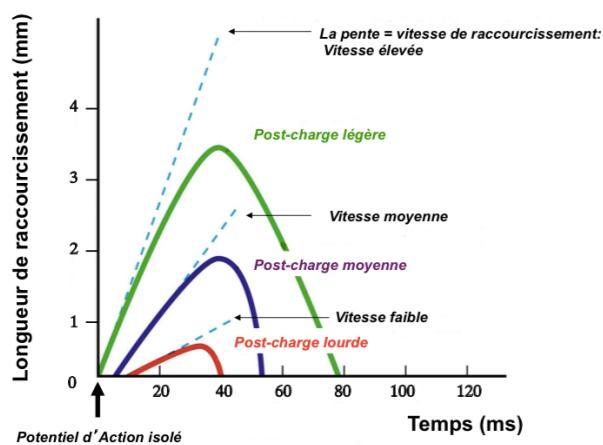
- Correspond à une longueur de sarcomère comprise entre 2 et 3  $\mu\text{m}$
- C'est la longueur qui donne la meilleure efficacité musculaire
- Ergonomie (*du grec ergon = travail et nomos = lois*) : ex. aménagement d'un poste de travail



### Conséquences de variations de post-charge :

#### C3 - CONTRACTION MUSCULAIRE ISOTONIQUE

##### a) Relations longueur, vitesse de raccourcissement et post-charge



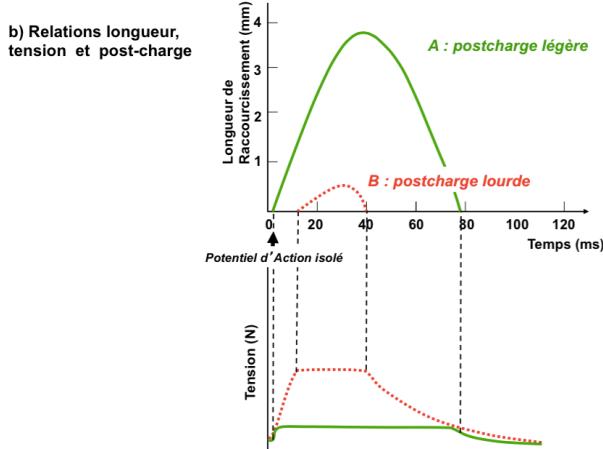
Post-charge légère : raccourcissement important

Post-charge moyenne : diminution du raccourcissement.

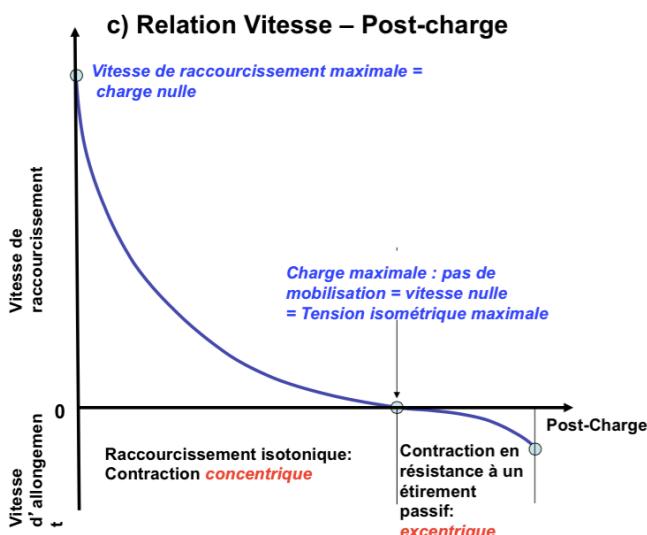
Post-charge qui dépasse la force de contraction du muscle = contraction **isométrique** (pas de raccourcissement).

Vitesse de raccourcissement élevée si la post-charge est légère et diminue ensuite et elle est d'autant plus faible que la post-charge est lourde.

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

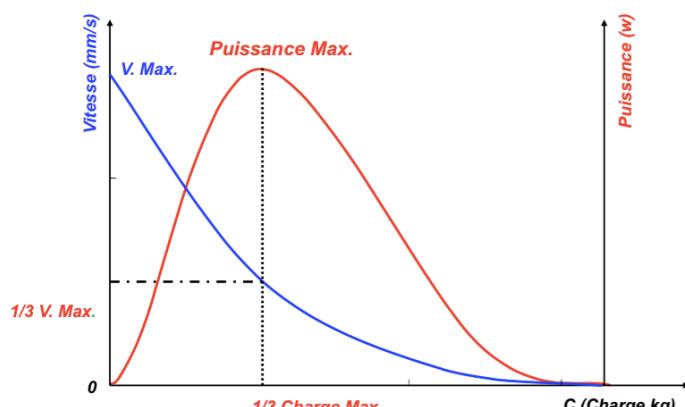


Etude de la **tension** développée par le muscle : Modeste en cas de post-charge légère, identique pendant toute la durée du raccourcissement (isotonique). Lorsqu'on augmente le poids de la post-charge, tension beaucoup plus élevée pour soulever cette post-charge. Ce n'est que lorsque cette tension est obtenue que le raccourcissement peut se produire.



**Post-charge nulle :** la vitesse de raccourcissement sera maximale. Elle diminuera dès qu'on augmente la post-charge. Elle arrive même à 0 lorsque cette post-charge dépasse la tension isométrique maximale (force que peut développer le muscle au maximum). Contraction en résistance excentrique : allongement du muscle augmente avec la post-charge.

### d) Relations postcharge, vitesse de contraction et puissance



#### Calcul de:

- la vitesse de raccourcissement  $V = \Delta L / t$
- Travail  $W = C \times \Delta L$
- la puissance musculaire  $P = W/t = C \times V$

- Point de référence des ergonomistes. C'est le point qui correspond **au meilleur rendement lors d'un acte moteur dynamique** : ex. utilisation d'un outil, développement d'un vélo

Lorsqu'on est au tiers de la charge maximale, on est au tiers de la vitesse de contraction maximale du muscle. C'est au tiers de la charge maximale qu'on développe la puissance maximale.  $\text{Puissance} = \text{Charge} \times \text{Vitesse}$ .

**Puissance musculaire maximale développée au cours d'une contraction isotonique :**

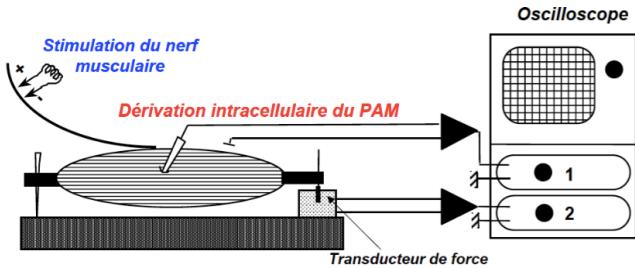
- Dépend de la charge du muscle
- Est **maximale pour 1/3 de la charge maximale**
- Ce qui correspond à **1/3 de la vitesse maximum** de contraction du muscle

# PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

## 4. Relation électromyogramme et mécanogramme :

### A- RELATION ELECTROMYOGRAMME EN DERIVATION INTRACELLULAIRE ET MECANOGRAMME

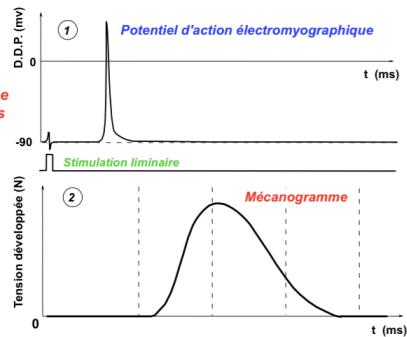
*Dispositif expérimental:*



### RELATION ELECTROMYOGRAMME (EN DERIVATION INTRACELLULAIRE) ET MECANOGRAMME

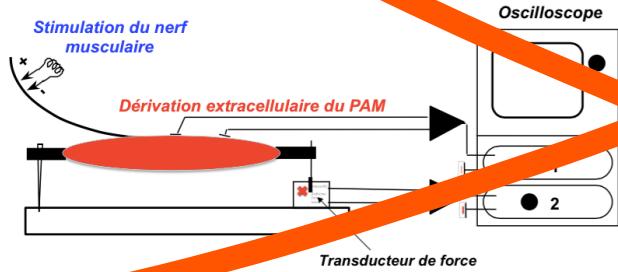
*Résultats:*

Le potentiel électromyographique précède de quelques millisecondes le mécanogramme



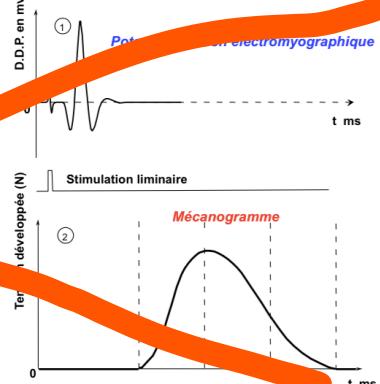
### B - RELATION ELECTROMYOGRAMME EN DERIVATION EXTRACELLULAIRE ET MECANOGRAMME

*Dispositif expérimental:*

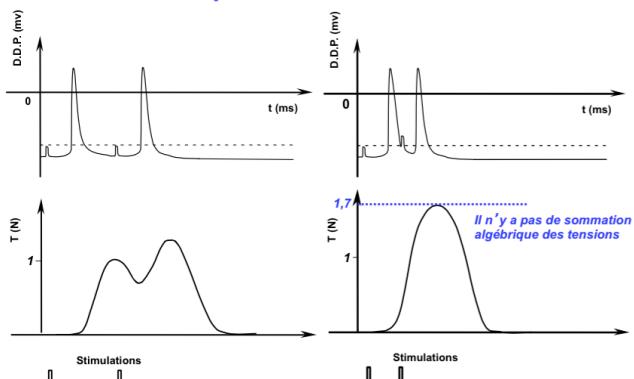


### RELATION ELECTROMYOGRAMME (EN DERIVATION EXTRACELLULAIRE) ET MECANOGRAMME

*Résultats:*

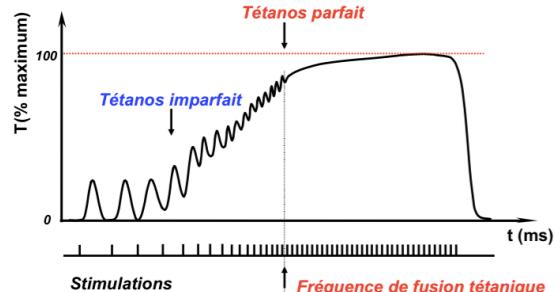


### Sommations imparfaites      Sommations parfaites



Pas de sommation algébrique des tensions.

La tension développée par le muscle dépend de la fréquence de stimulation



La tension d'un tétanos parfait est égale à 3 à 5 fois la tension d'une secousse

Tétanos *imparfait* : fréquence de stimulation ne permet d'avoir une tension continue (encore des oscillations qui correspondent à chacune des stimulations). A partir d'une certaine fréquence de stimulation on a une **fréquence de fusion tétanique** pour laquelle on arrive à un tétanos *parfait* : la contraction du muscle est permanente (il n'y a plus d'oscillation).

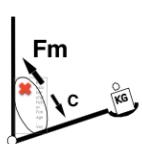
La fréquence de fusion tétanique est fonction des caractéristiques des fibres.

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

### 4- LES MODALITÉS DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE ET LE TRAVAIL MUSCULAIRE:

*Fm= force musculaire ou tension musculaire C= charge imposée*

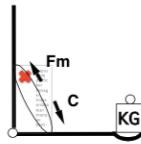
**Fm > C : contraction « en partie » isotonique concentrique**



#### Travail dynamique actif

Quand un muscle se contracte en soulevant une charge

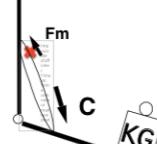
**Fm = C : contraction isométrique**



#### Travail statique

Pas de raccourcissement du muscle, équilibre entre tension et charge, la charge est immobile

**Fm < C : contraction isotonique excentrique**

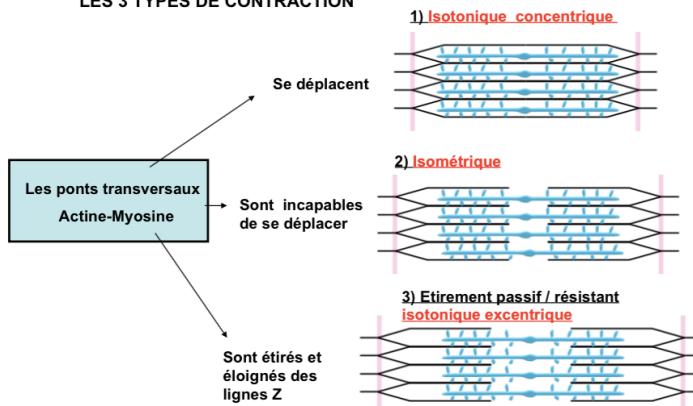


#### Travail dynamique résistant

Le muscle se contracte en freinant la descente de la charge

Dans les 3 cas, la FMSS activée est le siège de phénomènes électriques, mécaniques, thermiques, vasculaires et biochimiques similaires sauf ...

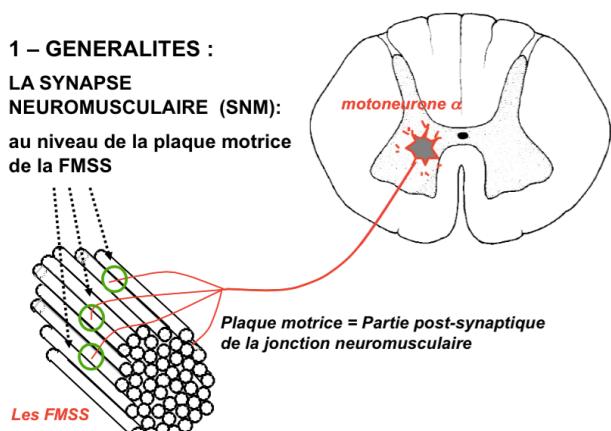
#### LES 3 TYPES DE CONTRACTION



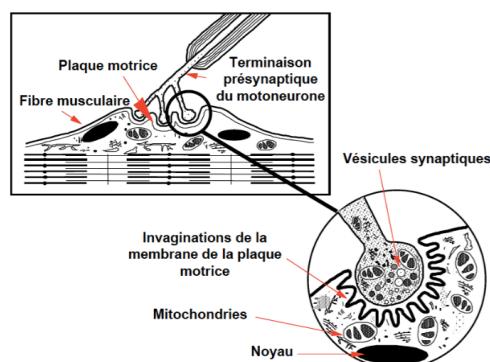
## IV – LA SYNAPSE NEUROMUSCULAIRE

### 1 – GENERALITES :

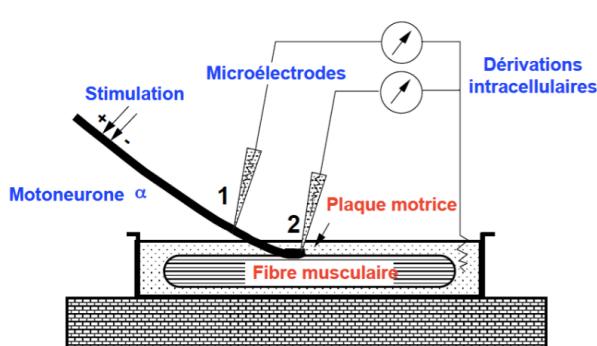
LA SYNAPSE NEUROMUSCULAIRE (SNM):  
au niveau de la plaque motrice de la FMSS



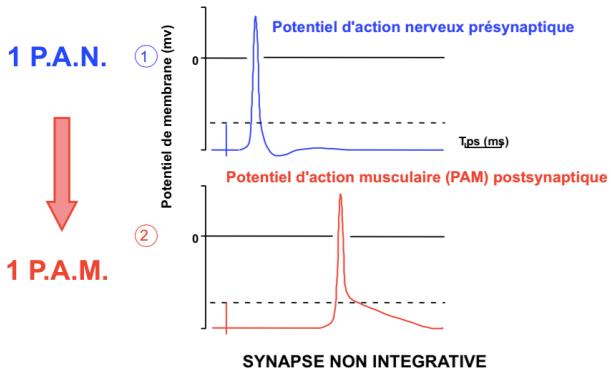
### 2 – PRESENTATION HISTOLOGIQUE :



### 3- ETUDE PHYSIOLOGIQUE: DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR ETUDIER LE FONCTIONNEMENT DE LA SYNAPSE NEUROMUSCULAIRE

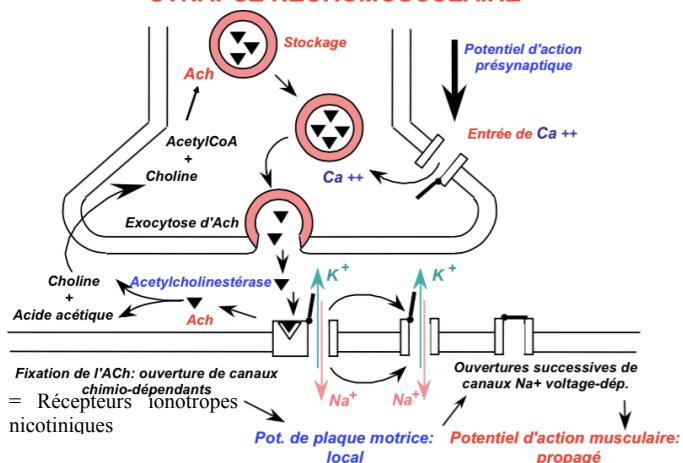


#### A - REPONSE DU TYPE « COUP POUR COUP »



## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

### 4 - RESUME DU FONCTIONNEMENT DE LA SYNAPSE NEUROMUSCULAIRE



Quand un potentiel d'action arrive, ouverture des canaux calciques voltage dépendant, fusion des vésicules, libération du NT qui va stimuler des récepteurs canaux nicotiniques : entrée du sodium et dépolarisation de la membrane. Propagation de proche en proche grâce à l'ouverture de canaux sodiques voltage dépendant. L'Ach dégradée grâce à l'acétylcholinestérase, puis resynthèse d'Ach. Cette acétylcholinestérase est extrêmement active et dégrade très rapidement l'Ach pour que le système puisse répondre très rapidement à un nouveau potentiel.

### C – SNM et potentiel de plaque motrice :

- Une plaque motrice : en moyenne de **15 à 40 millions de récepteurs à l'Ach** (R de type **nicotinique**)
- Environ **300 000 vésicules d'Ach** dans une terminaison présynaptique.
- Chaque P.A. présynaptique libère environ **300 vésicules d'Ach**.
- Chaque vésicule synaptique contient approximativement **10 000 molécules d'Ach**
- L'activation des récepteurs de type nicotinique par l'Ach provoque une dépolarisation locale (PPSE) de la plaque motrice = **Potentiel de plaque motrice (PPM)** => atteint le seuil d'ouverture des canaux voltage-dépendants => **PAM propagé**.
- La quantité d'Ach libérée est de **3 à 4 fois supérieure** à celle qui est nécessaire pour produire un PPM suffisant pour atteindre le seuil et donner naissance à un PA musculaire = **synapse à très haut coefficient de sécurité**.
- Cependant, au repos, la terminaison nerveuse présynaptique du motoneurone alpha libère, parfois de façon aléatoire, le contenu d'une vésicule d'Ach (quantum). Chacun de ces quanta produit une petite dépolarisation d'environ 0,5 mV d'amplitude = **un potentiel de plaque miniature**.

Le PPM est donc normalement masqué car le déclenchement du P.A. musculaire est immédiat.

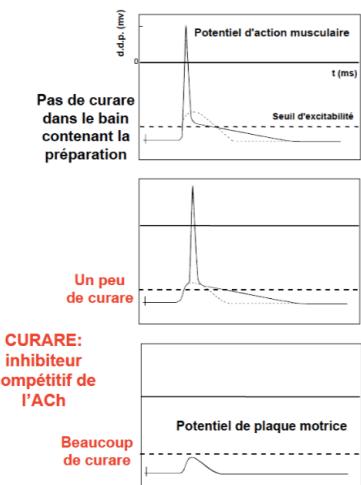
Pour l'observer, il faut le rendre infra-liminaire par l'utilisation d'un inhibiteur compétitif de l'Ach :

#### Le curare :

- **occupe la place de l'Ach sur le site de liaison du récepteur nicotinique et bloque son activation**
- le curare est une drogue paralysante utilisée :
  - o Par les Indiens (Amérique du Sud) pour empoisonner leurs flèches => paralysie
  - o En médecine, au cours des interventions chirurgicales pour provoquer la relaxation musculaire.

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

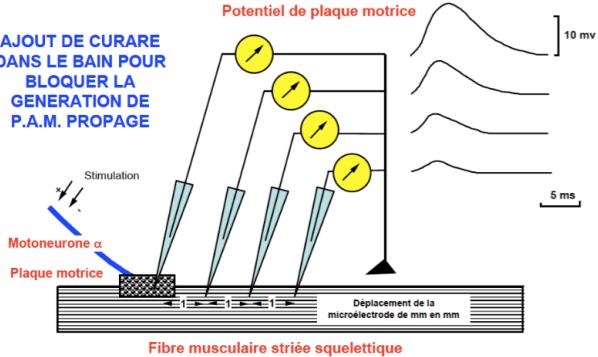
D - UTILISATION DU CURARE POUR DEMONTRER L'EXISTENCE DU PPM



Autre exemple de blocage de la SNM:  
**Toxine botulinique** qui bloque la libération d'ACh

E - MISE EN EVIDENCE DU CARACTERE LOCAL DU PPM

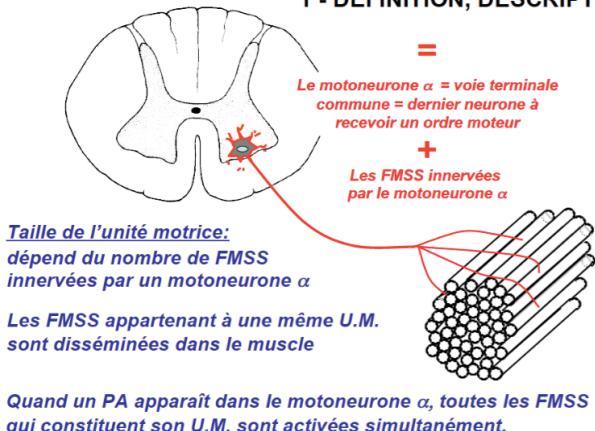
AJOUT DE CURARE DANS LE BAIN POUR BLOQUER LA GENERATION DE P.A.M. PROPAGE



Conclusion : PPM = PPSE particulier

## V – L'UNITE MOTRICE

### 1 - DEFINITION, DESCRIPTION



### 2 – La taille de l'unité motrice conditionne la précision de la contraction musculaire :

Précision max. serait 1 UM = 1 motoneurone + 1 FMSS. En pratique :

- **UM de petite taille** : grande précision
  - o ex. muscles qui contrôlent les mouvements très fins de l'œil : 3 à 10 FMSS par motoneurone.
- **UM de grande taille** : faible précision
  - o ex. quadriceps, mouvements puissants extenseurs de la jambe: env. 2000 FMSS par motoneurone.

### 3 – La tension développée au cours d'une contraction musculaire va dépendre :

De la nature et du nombre de plus en plus grand d'UM recrutées : **recrutement spatial**.

De l'augmentation progressive de la fréquence de décharge de chacune des UM recrutées : **recrutement temporel**.

→ Les 2 phénomènes sont concomitants : le recrutement spatial accompagne le recrutement temporel : graver l'intensité de la force musculaire développée.

### 4. Muscles rouges et muscles pâles :

Il existe 2 types de FMSS en fonction de leur teneur en myoglobine (coloration) : les **fibres rouges** et les **fibres blanches**.

Il y a 2 sous-types de fibres rouges en fonction de leur vitesse de contraction : les **fibres rouges lentes** et les **fibres rouges rapides**.

Les muscles possèdent en proportions variables les trois sortes de fibres : selon la prédominance en fibres rouges et blanches, on distinguera des muscles rouges et des muscles pâles (blancs).

**Il existe donc trois types de fibres :**

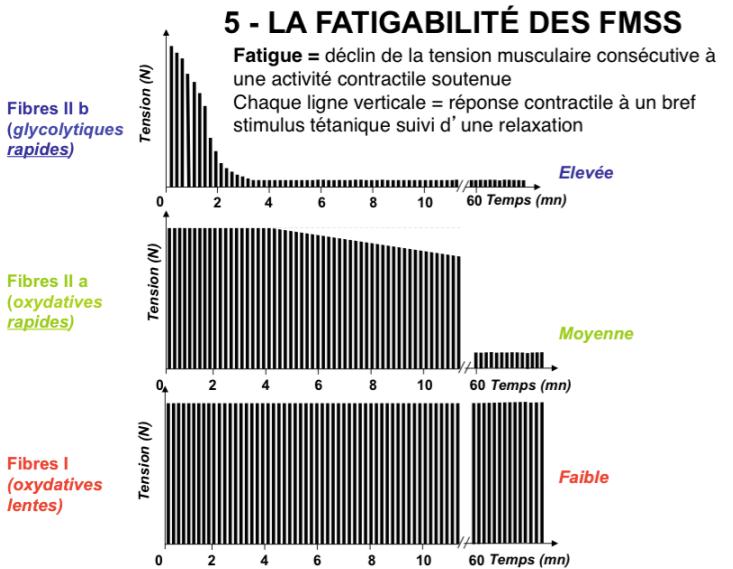
- Les **fibres rouges lentes oxydatives et résistantes** à la fatigue :

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

- Type I ou S (Slow)
- Les fibres rouges rapides et résistantes à la fatigue (intermédiaire entre I et IIb):
  - Type IIa ou FR (Fast Resistant)
- Les fibres blanches rapides et fatigables :
  - Type IIb ou FF (Fast Fatigable)

### MUSCLES ROUGES ET MUSCLES PÂLES

Caractéristiques	Fibres rouges lentes oxydatives I	Fibres rouges rapides oxydatives IIa	Fibres blanches rapides glycolytiques IIb
Teneur en myoglobine	+++	+++	+
Teneur en mitochondries	+++	+++	+
Diamètre de la fibre	+	++	+++
Quantité de myofibrilles	+	++	+++
Richesse en capillaires	+++	+++	+
Teneur en glycogène	+	++	+++
Activité ATPasique de la myosine	+	+++	+++
Activité glycolytique	+	++	+++
Phosphorylation oxydative	+++	+++	+
Type de fonctionnement	Aérobiose	Mixte	Anaérobiose



### 6 – Unités motrices (UM) toniques et phasiques :

- Toutes les fibres d'une même UM sont identiques
- Les UM prennent le nom des fibres qui les composent : **types I, IIa et IIb**
- Les muscles possèdent en proportions variables les différents types d'UM (suivant la prédominance, on aura des muscles **toniques** ou des muscles **phasiques**)
- On va distinguer :
  - **U.M. Toniques** : impliquées dans le maintien du tonus musculaire et donc la posture
  - **U.M. Phasiques** : impliquées dans la réalisation des mouvements
- **Tonus musculaire** = l'état de tension permanente (et modérée) de certains muscles afin de s'opposer à l'action de la gravitation sur le corps humain
  - maintien de la posture (équilibre)
  - travail statique (essentiellement fibres de type I)

### UNITES MOTRICES TONIQUES ET PHASIQUES

Unités motrices caractéristiques	Type I lentes (S)	Type IIa: rapides et résistantes (FR)	Type IIb: rapides et fatigables (FF)
<b>Identification des fibres</b>	Rouges lentes	Rouges rapides	Blanches
<b>Taille = dimension de l' UM</b>	Petite	Moyenne	Grande
<b>Fréquence de fusion tétanique*</b>	Faible	Intermédiaire	Elevée
<b>Temps = durée de contraction</b>	Long	Moyen	Bref
<b>Fatigabilité</b>	Faible	Moyenne	Elevée
<b>Tension tétanique maximale**</b>	Faible: petite unité	Assez élevée	Elevée: grande unité
<b>Motoneurone (vitesse axone)</b>	$\alpha$ toniques 60m/s	Intermédiaire	$\alpha$ phasiques 80m/s
<b>Motoneurone (taille du soma)</b>	Petite	Intermédiaire	Grande
<b>Excitabilité trans-synaptique du motoneurone <math>\alpha</math> ***</b>	Elevée	Intermédiaire	Faible
<b>Rôle fonctionnel physiologique</b>	<b>Tonique:</b> maintien postural	<b>Mouvements peu amples : ex.marche</b>	<b>Phasique:</b> Mouvements rapides grande amplitude

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

- **Taille** : la dimension de l'UM (un motoneurone + ses FMSS associées) : plus elle sera grande, plus le nombre de FMSS sera élevé
  - o Croissante des I aux IIb
- **Taille du soma** :
  - o Croissante des I aux IIb
  - o Proportionnalité entre la taille du soma et la taille de l'axone, hors plus la taille de l'axone est grande et plus la vitesse de conduction est grande
  - o La vitesse sera donc également croissante des I aux IIb
- **Excitabilité trans-synaptique** : une centaine de synapses activatrices vont déclencher un PPSE qui va avoir une incidence d'autant plus que le neurone est petit (excitabilité trans-synaptique élevée). En revanche, si on met le même nombre de PPSE sur un gros neurone, on n'atteindra certainement pas le seuil pour déclencher un PA (excitabilité trans-synaptique faible : il faudra donc un plus grand nombre de PPSE pour déclencher un PA.) => quand on active la commande motrice d'un muscle, on commence par recruter les UM de type I, ensuite les IIa et enfin les IIb
- **La durée de contraction** : décroissante des I aux IIb
- **Fréquence de fusion tétanique** : croissante des I aux IIb : on atteint plus facilement le tétanos avec des fibres I.

### La fréquence de fusion tétanique :

- C'est la fréquence de stimulation d'un muscle ou d'une UM à partir de laquelle on obtient un tétanos parfait (cf. une succession de sommations musculaires parfaites)

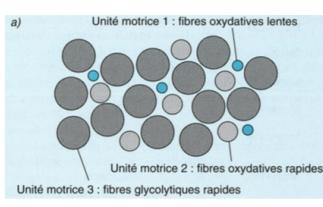
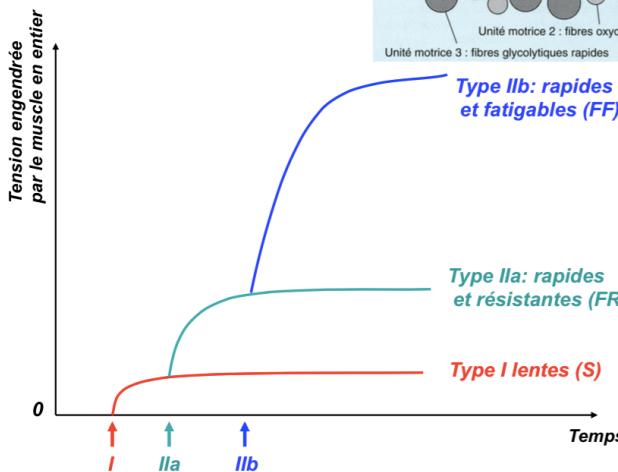
### La tension téanique maximale :

- C'est la tension musculaire totale développée par un muscle ou une UM lorsqu'il (ou elle) est stimulé(e) à la fréquence de fusion tétanique. Faible pour I car UM de petite taille et élevée pour IIb car UM de grande taille

### L'excitabilité trans-synaptique :

- C'est l'excitabilité du motoneurone  $\alpha$  au niveau de la synapse du SNC dans la corne antérieure de la moelle épinière. Facilité à déclencher un PA avec motoneurone alpha.

## 7 - RECRUTEMENT DES UNITES MOTRICES



Lorsqu'on augmente progressivement la force musculaire au niveau d'un muscle qui contient les 3 types de fibres. Quand on commence à contracter de façon légère, on recrute d'abord les fibres de type I (excitabilité trans-synaptique forte). Lorsqu'on augmente le niveau de contraction (tension), on recrute ensuite les IIa (rapides et résistantes) puis les fibres IIb (rapides et fatigables).

La proportion de fibres recrutées dépend beaucoup d'un muscle à un autre.

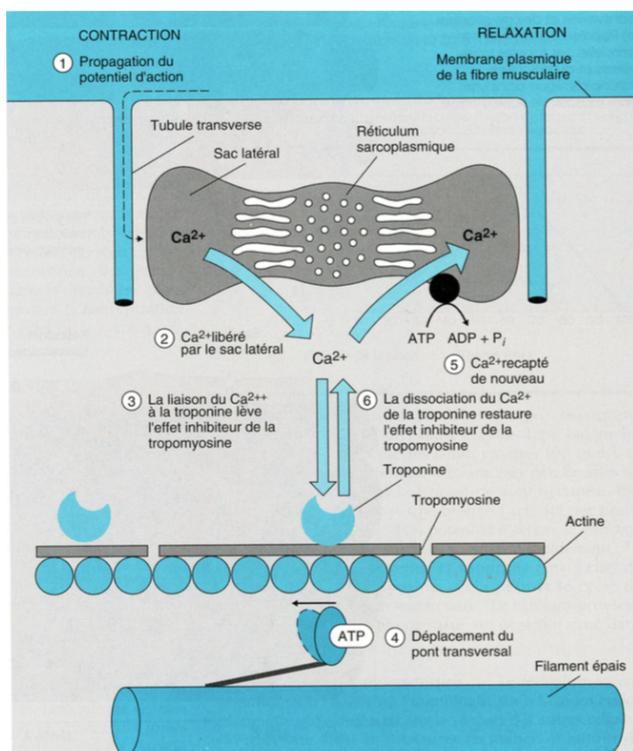
## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

### En résumé : Recrutement

- Petites unités motrices, type I : recrutées les premières
  - o Résistantes à la fatigue
  - o Responsables du tonus musculaire : Ex. posture *Phénomène de rotation des U.M → faire contracter les UM selon un système de rotation, à l'instant t 50% des UM et à t+1 50 autres % en place et les 50% premiers au repos ce qui permet d'éviter la fatigue de ces fibres musculaires et d'assurer leur fonction de maintien de la posture.*
- Unités motrices intermédiaires, type IIa : recrutées ensuite
  - o Fibres rapides et résistantes à la fatigue
  - o Sollicitées pour des mouvements peu amples et de vitesse modérée : Ex. marche, exercice d'endurance
- Grandes unités motrices, type IIb : recrutées les dernières
  - o Fibres rapides et fatigables
  - o Sollicitées pour des mouvements amples, de forte puissance et de vitesse élevée, mais de durée limitée : Ex. course (sprint), soulever des haltères

### Déterminants de la taille des muscles et de la composition musculaire en fibres I, IIa et IIb :

- **Entrainement** : haltérophile (résistance de courte durée) vs marathonien (endurance)
- **Hormones** : androgènes (permettent une hypertrophie musculaire)
- **Génétique/Espèces** : Grands mammifères (Homme) davantage de fibres lentes (I et IIa prédominant) que les rongeurs (souris) (IIb prédominant)
- **Innervation** : activité électrique=déterminant des caractéristiques des MSS, expérience de ré innervation croisée (si capable de changer les nerfs qui entraînent la contraction d'un muscle rapide et d'un muscle lent : inversion des caractéristiques de ces muscles).



Le PA arrive au niveau de la membrane, passe dans les tubules transverses. Libération du calcium du RE en intra cellulaire → liaison à la troponine qui lève l'inhibition de la tropomyosine : il peut y avoir interaction entre tête de tropomyosine et l'actine.

→ Mécanisme consommateur d'ATP et conduit à la **contraction**.

La relaxation se fait suite à la recapture du calcium dans le RE, dissociation du calcium de la troponine et détachement de l'actine et de la myosine.

→ **Relaxation**.

### Métabolisme énergétique :

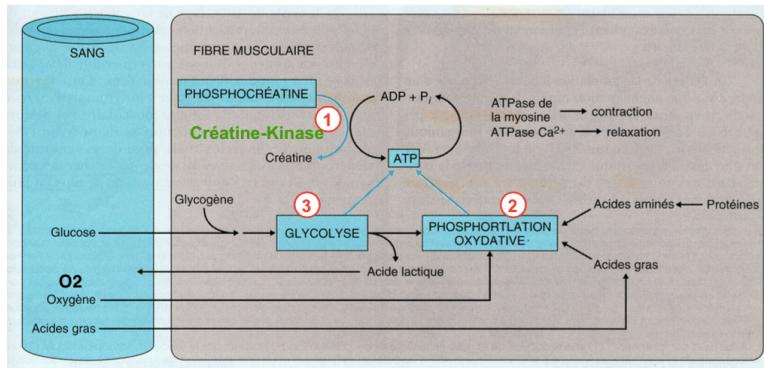
L'ATP est nécessaire aux fonctions liées directement à la contraction et à la relaxation des FMSS.

FMSS = type cellulaire qui connaît les plus grandes variations de vitesse de dégradation de l'ATP : entre l'état de repos et de contraction, la vitesse de dégradation de l'ATP peut augmenter de 20 à plusieurs centaines de fois.

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

L'équivalent de la quantité d'ATP présente dans la FMSS au commencement de l'activité contractile est consommé au bout de quelques secondes.

Il faut que le métabolisme produise de l'ATP aussi rapidement qu'il est dégradé par les mécanismes de contraction et de relaxation.



- ① Immédiat, le temps aux autres voies d'être mises en œuvre:
- ② Si  $O_2$ , phosphorylation oxydative (cycle de Krebs, 36 ATP/mol. Glucose)
- ③ Si pas d' $O_2$ , glycolyse anaérobie (seulement 2 ATP/mol. Glucose, et acidose par accumulation d'acide lactique)

Créatine kinase qui catalyse la création de l'ATP (avec **phosphocréatine** → créatine). Fonctionnement de l'ATPase de la myosine comme avec l'activation par le calcium.

La plupart du temps, le muscle dispose suffisamment d'oxygène et de nutriments → **phosphorylation oxydative** (36 molécules d'ATP par molécule de glucose consommée).

On peut également produire de l'ATP par les acides gras.

La phosphorylation oxydative ne fonctionne qu'en présence suffisante d'oxygène.

En cas d'incapacité de l'organisme à amener suffisamment d'oxygène, on ne pourra pas aller jusqu'à la phosphorylation oxydative mais on s'arrêtera seulement à la **glycolyse anaérobie** (2 molécules d'ATP par molécule de glucose + production d'acide lactique, avec accumulation d'acide lactique et risque d'acidose).

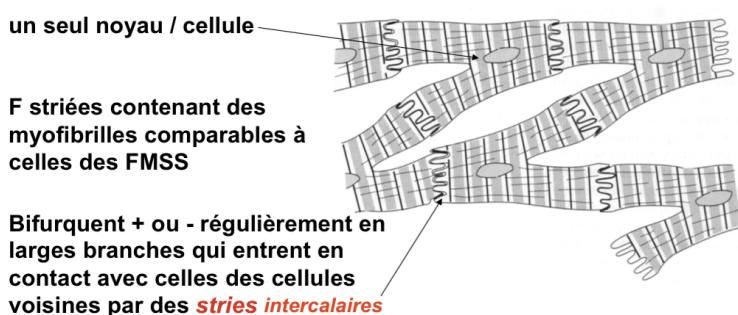
## II. La fibre musculaire striée cardiaque :

### A. Généralités : les fibres musculaires cardiaques sont de 2 sortes :

Les **fibres myocardiques** qui forment le muscle cardiaque proprement dit, et dont la *contraction* est responsable de la circulation du sang.

Les **fibres du tissu nodal** qui sont responsables de *l'activité rythmique* (et de la contraction) automatique du cœur, car elles sont **autorythmiques** en se dépolarisant spontanément à un rythme régulier.

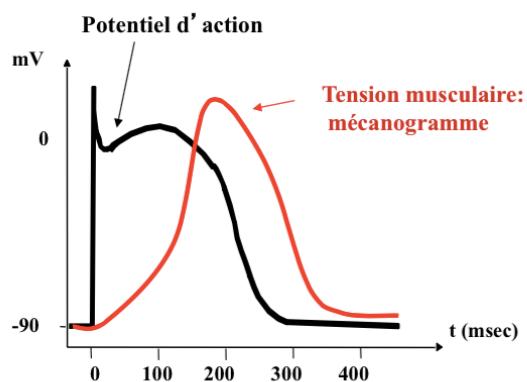
### B. La fibre myocardique : cardiomyocyte :



#### Stries intercalaires :

- les membranes des cellules voisines sont étroitement accolées sur une très grande surface par des prolongements en doigts de gant qui s'engrènent entre eux.
- constituent des jonctions étroites = **gap junctions** au niveau desquelles l'excitation est transmise d'une cellule à l'autre sans l'intervention d'un médiateur chimique.
- Conséquence fonctionnelle : **étroit couplage excitation – contraction**

### C. couplage excitation – contraction :



**Remarque : Dans des conditions physiologiques, le muscle cardiaque n'est pas tétanisable.**

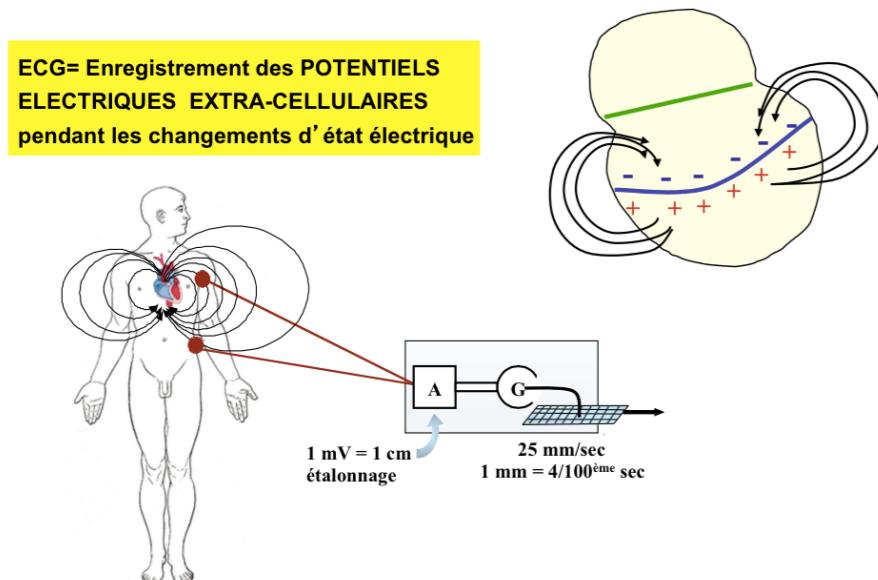
Repos : - 90 mV

Phase ascendante rapide, mais après, on assiste à une durée de 250ms environ du PA (beaucoup plus long que pour les FMSS). Le muscle cardiaque n'est pas tétanisable, s'il l'était le débit cardiaque s'arrêterait spontanément et donc entraînerait la mort.

→ Une des caractéristiques principales du cardiomyocyte.

On observe ensuite, sur le mécanogramme, une augmentation de la tension musculaire (phénomènes mécaniques faisant suite aux phénomènes électriques).

### D. Exploration de l'activité électrique cardiaque : ECG :



Electrodes à la surface du corps qui enregistrent l'activité électrique cardiaque. Il faut que l'individu soit au repos (relâchement musculaire) pour ne pas parasiter cet enregistrement par l'enregistrement de l'activité des FMSS.

### III. La fibre musculaire lisse :

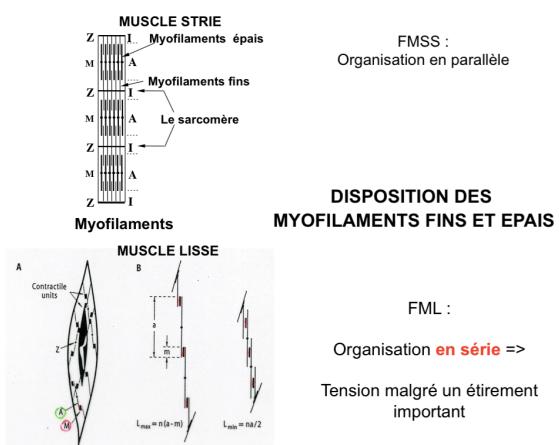
#### A. Généralités :

- fusiforme, noyau unique
- beaucoup plus petite que la FMSS
- diamètre : 2 à 10  $\mu\text{m}$
- longueur : utérus 500  $\mu\text{m}$ , tube digestif 200  $\mu\text{m}$ , vaisseaux sanguins 20  $\mu\text{m}$
- organisation différente : pas d'aspect strié = fibre lisse
- pas de troponine (remplacée par la calmoduline)
- innervation par le SNV

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

### B. Propriétés mécaniques :

- **Tonicité** : les FML même lorsqu'elles sont prélevées hors de l'organisme conservent un état modéré de contraction d'intensité plus ou moins forte pendant plusieurs minutes.
- **Plasticité** : la plupart des FML ne sont **pas élastiques**, elles ne retrouvent pas une longueur donnée lorsque la force qui les a allongées est supprimée. Elles sont **plastiques**.
- **Viscosité** : elle est élevée, la résistance à l'allongement dépend beaucoup de la vitesse de l'allongement.
- **Contractilité** : la contraction est extrêmement lente.
  - o Le temps de contraction est de l'ordre de plusieurs **secondes**.
  - o Une contraction tétanique parfaite peut être obtenue pour une stimulation répétitive de fréquence très basse.



Les relations longueur – tension dans le muscle lisse seront beaucoup moins contraintes que dans le muscle strié : on pourra beaucoup plus étirer le muscle lisse, il pourra se contracter malgré son étirement important (pas le cas pour le muscle strié).

### C. FML unitaire et FML multi-unitaires :

#### a. FML unitaire :

##### 1. Généralités :

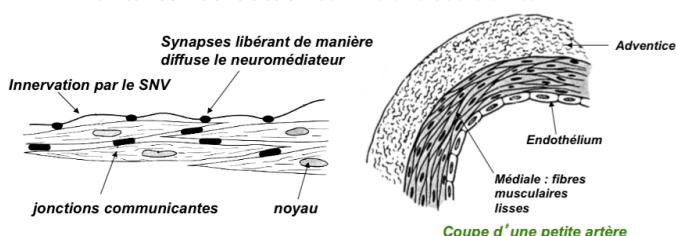
On les trouve par ex. dans la paroi de la plupart des viscères, tube digestif, voies biliaires, uretères, vessie, utérus, artères de petit calibre...

Appellation qui peut prêter à confusion :

- ne signifie pas FML isolées
- mais signifie qu'**une seule et même masse de millions de FML peuvent se contracter en même temps**

Les FML sont agrégées en tuniques ou en feuillets et leurs membranes adhèrent entre elles en de multiples endroits de sorte qu'**une force générée au niveau d'une fibre peut être transmise aux autres**.

#### 2- FML unitaires : Contraction comme une seule unité

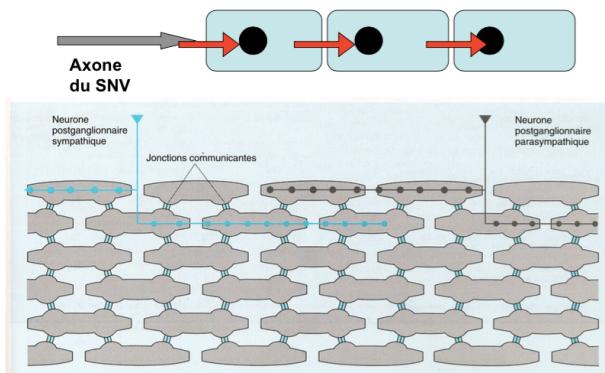


Les membranes sont reliées entre elles par des **jonctions communicantes** à travers lesquelles les ions peuvent circuler librement d'une cellule à l'autre, de sorte que les PA peuvent circuler d'une fibre à l'autre et entraînent les différentes fibres à se contracter toutes ensemble = **muscle lisse syncytial**

Ces fibres ont un potentiel de repos qui spontanément ou à la suite d'un étirement ou d'une déformation mécanique peut présenter des oscillations de plusieurs dizaines de mV. Au moment où la dépolarisation est maximum, quelques PA peuvent apparaître et se propager à l'ensemble du viscère

ex: péristaltisme intestinal : contraction de proche en proche.

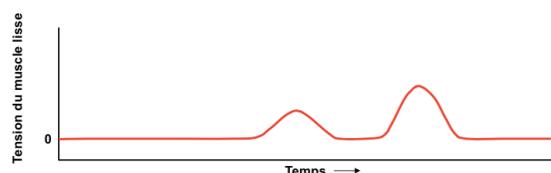
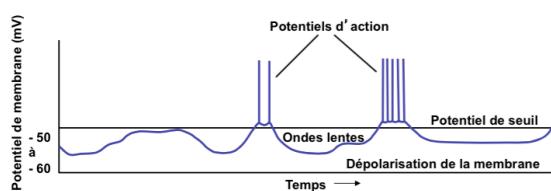
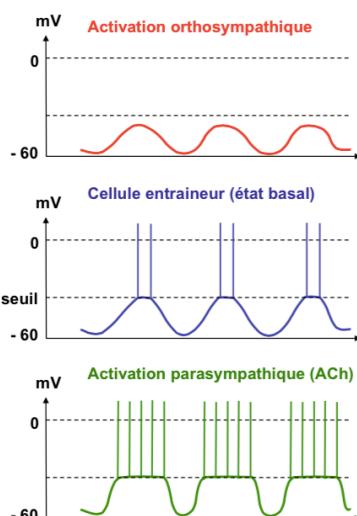
### 3. Propagation de l'influx dans les FML unitaires : « en vague » :



**4 - L'activité spontanée et rythmiques des FML des viscères, et sa régulation par le SNV**

Une minorité des FML sont des c. « entraîneurs » qui engendrent spontanément des PA.

Pot. Membrane instable



Les FML sont reliées entre elles par les jonctions communicantes, il y a également une innervation des cellules unitaires.

Cette innervation ne porte pas sur la totalité du ML unitaire, mais seulement sur une fraction : les « cellules entraîneurs » (minoritaires), qui engendrent spontanément des PA.

Etat basal : 2 PA puis repolarisation.

Ces cellules sont principalement innervées par les systèmes ortho et para sympathiques.

L'ortho va entraîner un abaissement du PM, il n'atteint plus son seuil et il n'y a donc plus de déclenchement de PA.

Le para va rapprocher le PM de son seuil, il va y rester plus longtemps et va donc déclencher un plus grand nombre de PM.

Il suffit donc de contrôler les cellules entraîneurs pour contrôler l'ensemble (syncytium).

Lorsqu'il atteint le seuil : 2 PA : petite contraction.  
Plus de 2 PA : contraction plus importante.

### b. FML multi-unitaires :

#### 1. Généralités :

Ce type de tissu musculaire lisse est composé de FML :

- isolées les unes des autres (non reliées par des ponts), chaque FML peut se contracter indépendamment des autres
- pas de contraction spontanée ou rythmique : elles ont un potentiel de membrane stable
- sous la dépendance directe des nerfs moteurs du SNV (riche innervation)

*Exemples :*

Muscles ciliaires (yeux) : accommodation du cristallin (vision de près)

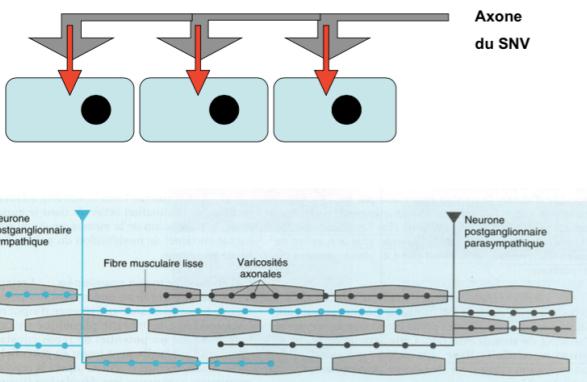
Muscles de l'iris (de l'œil) : règlent le diamètre de la pupille

Muscles érecteurs des poils et des cheveux : entraînent la pilo-érection (chair de poule)...

Muscles des grosses voies aériennes (bronches) et des grosses artères.

## PHYSIOLOGIE : Physiologie musculaire

### 2. Propagation de l'influx dans les FML multi-unitaires : « en bloc » :



Très riche innervation (la plupart des FM sont à proximité d'une terminaison nerveuse). Ces cellules ne sont pas reliées entre elles par des jonctions communicantes.

#### VI - COMPARAISON DES FIBRES MUSCULAIRES STRIEES SQUELETTIQUES ET LISSES

Caractéristiques	Muscles squelettiques	Muscle lisse	
		Unitaire (Digestif, Utérus Artères petit calibre)	Multi-unitaire (Voies aériennes Artères gros calibre)
Filaments fins et épais	Oui	Oui	Oui
Sarcomères, aspect strié (alignement transversal régulier Des filaments)	Oui	Non	Non
Tubules transverses	Oui	Non	Non
Jonctions communicantes entre les fibres	Non	Oui	Peu
Réticulum sarcoplasmique (RS)*	+++	+	+
Source du calcium	RS	RS et ExtraCel.	RS et ExtraCel.
Site de fixation du calcium et régulation de la contraction	Troponine	Calmoduline	Calmoduline
Vitesse de contraction	Rapide à lente	Très lente	Très lente
Activité ATPasique de la myosine	Importante	Très faible	Très faible

\* Le nombre de signes positifs (+) indique la proportion relative de réticulum sarcoplasmique présent dans un type musculaire donné.

#### COMPARAISON DES FIBRES MUSCULAIRES STRIEES SQUELETTIQUES ET LISSES (suite)

Caractéristiques	Muscles squelettiques	Muscle lisse	
		<u>Unitaire</u> Digestif, Utérus, Artères petit calibre	<u>Multi-unitaire</u> Œil, Voies aériennes, Artères gros calibre
Production de potentiels d'action spontanés par des cellules entraîneurs	Non	Oui	Non
Innervation végétative	Non	Cellules entraîneurs	Riche
Effet de la stimulation nerveuse	Excitation	Excitation ou inhibition	Excitation ou inhibition
Effets physiologiques des hormones sur l'excitabilité et la contraction	Non	Oui	Oui
Tonus (faible niveau de tension maintenu en l'absence de stimuli externes)	Non	Oui	Non
Induction de la contraction de la fibre par son étirement	Non	Oui	Non