

# Unité motrice

# Commande motrice

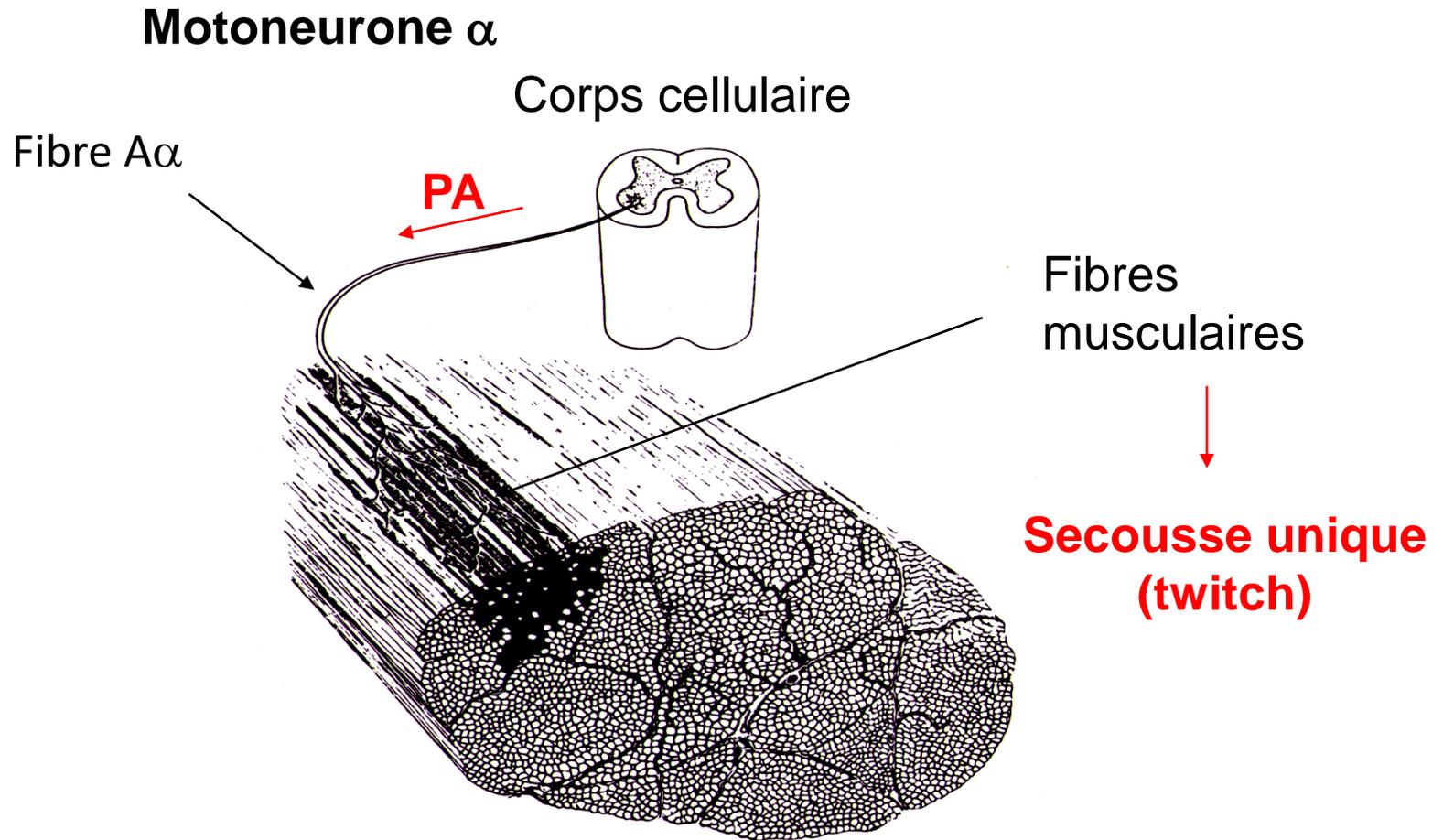
Marie-Agnès Giroux-Metges

EA 4324 ORPHY – Laboratoire de physiologie – UFR Médecine et sciences de la santé  
Explorations Fonctionnelles Respiratoires – CHRU de Brest

LAS – Enseignement de spécialité – Masso-kinésithérapie  
Année universitaire 2020-2021

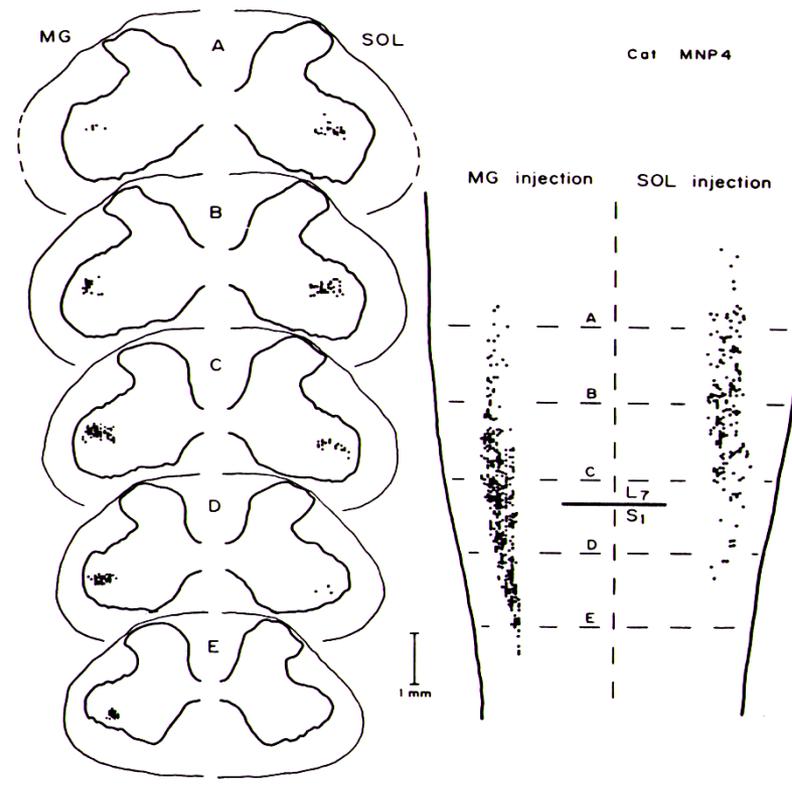


# Structure de l'unité motrice



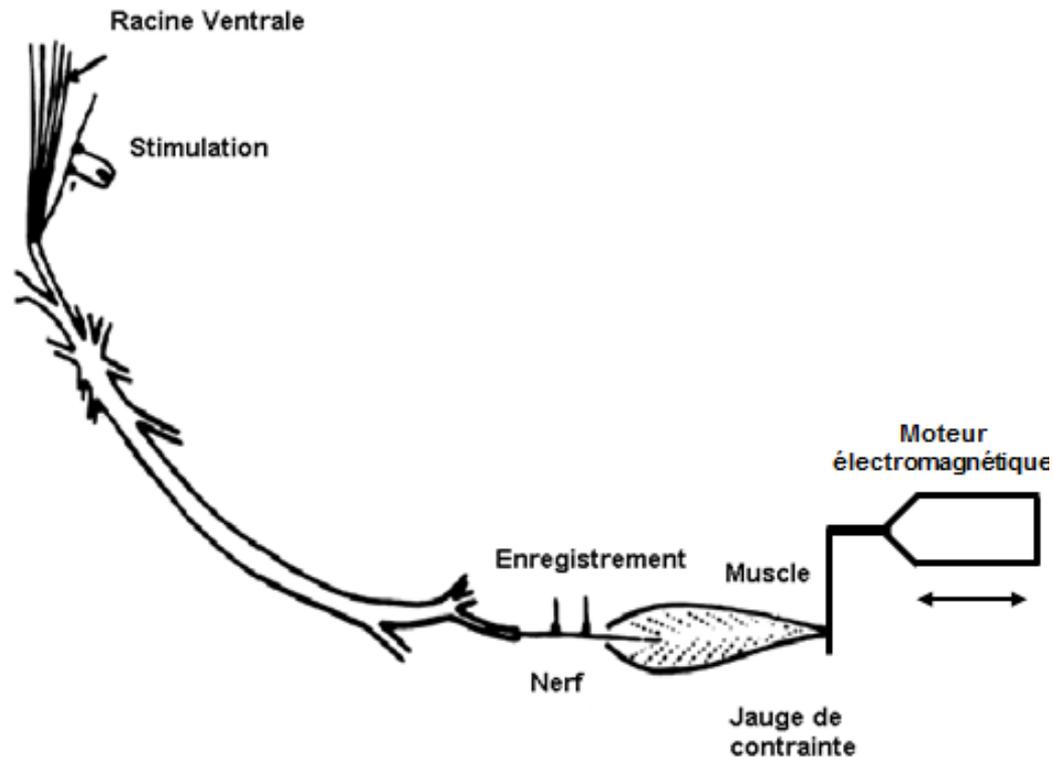
# Structure de l'unité motrice

L'ensemble des corps cellulaires des MN $\alpha$  destinés à un même muscle sont regroupés dans la moelle en noyaux moteurs (*comme les noyaux moteurs des nerfs crâniens*), s'étendant sur plusieurs niveaux segmentaires, ce qui correspond à une innervation motrice impliquant plusieurs racines.



# Etude des unités motrices

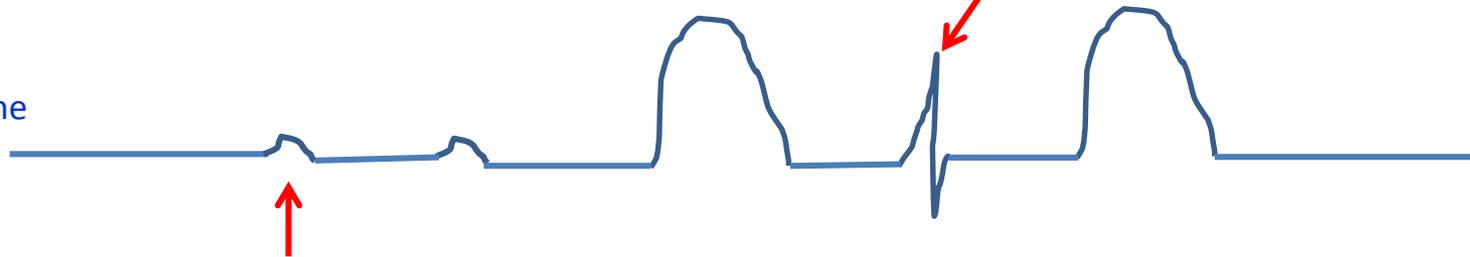
- Technique employée: Isolement fonctionnel d'un axone dans un filament de racine ventrale (moelle épinière)



# Etude des unités motrices

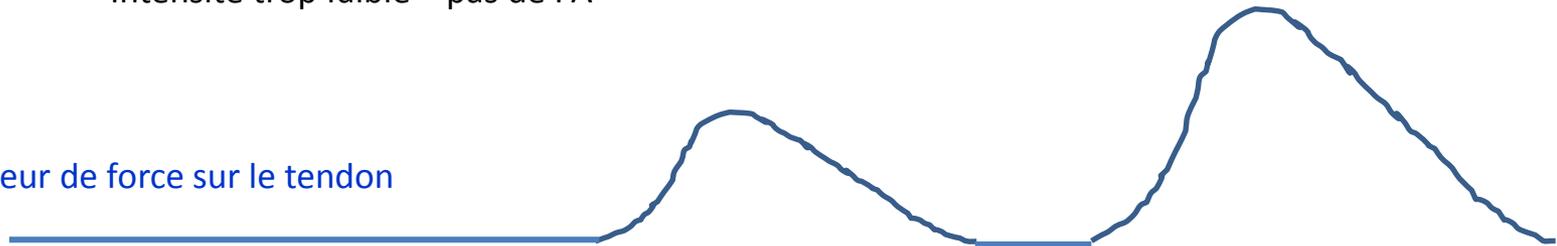
Artéfact de stimulation = ↑ avec l'intensité de la stimulation

axone

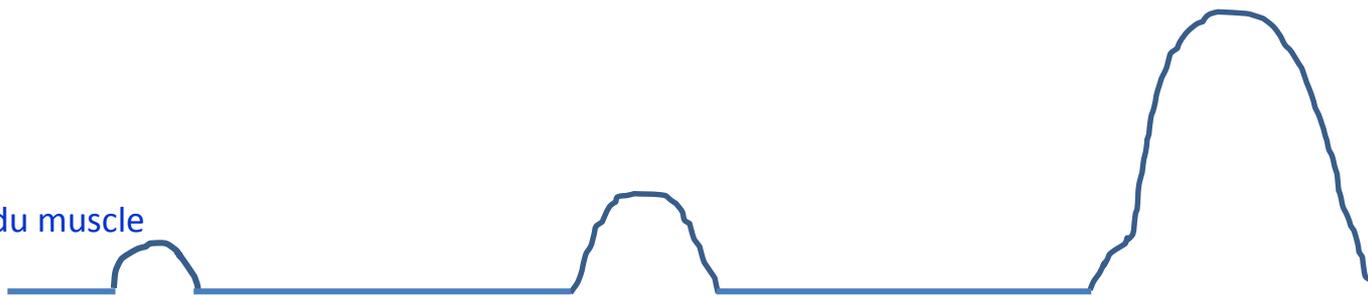


Intensité trop faible = pas de PA

Capteur de force sur le tendon



Nerf du muscle



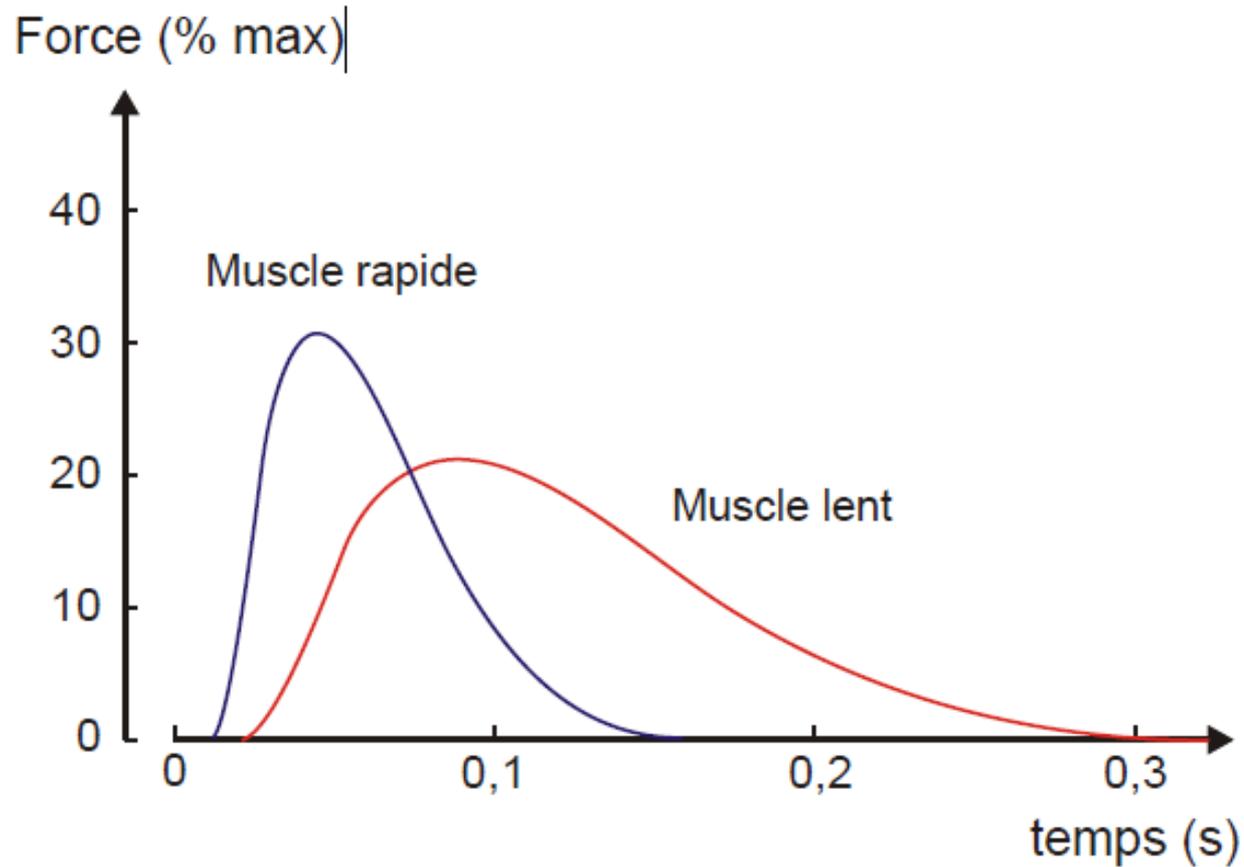
↑ Intensité stim

Très forte intensité de stimulation



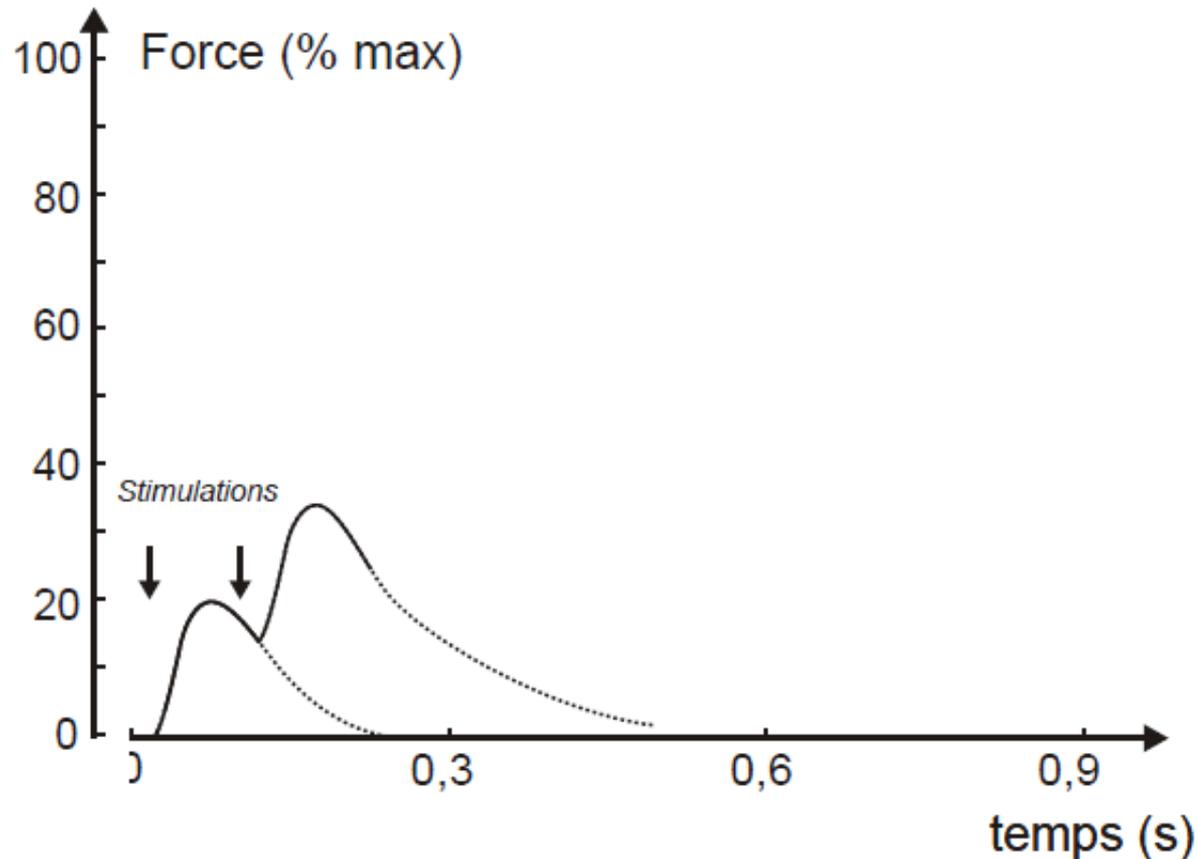
# Etude des unités motrices

Avec une stimulation unique  $\Rightarrow$  Secousse musculaire



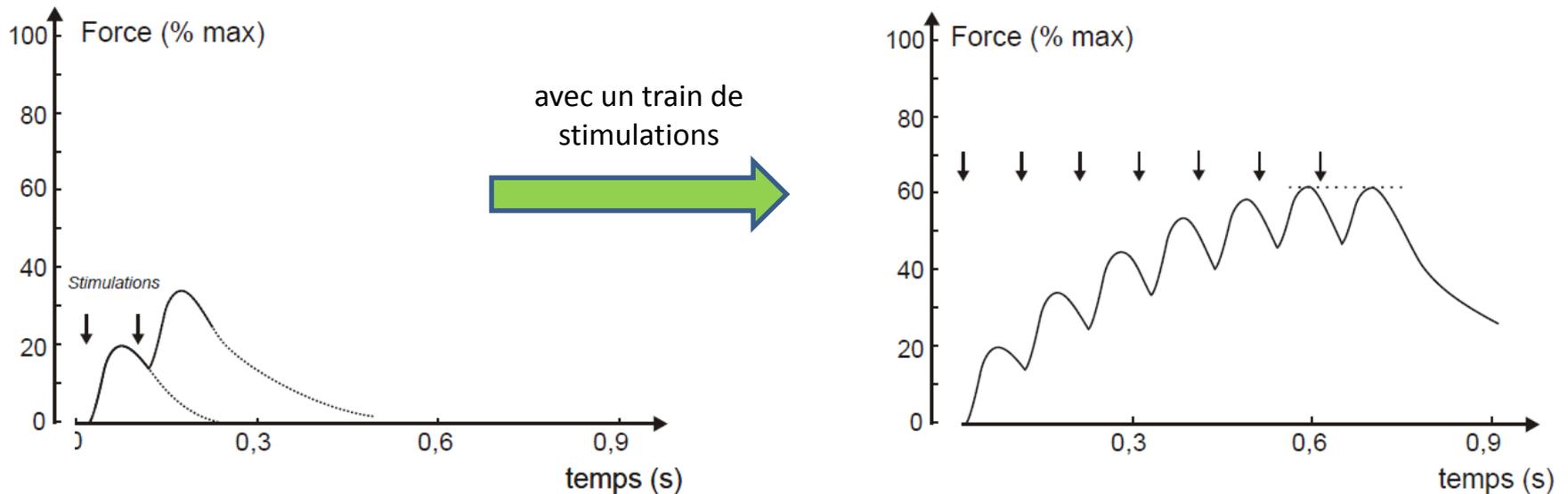
# Etude des unités motrices

Avec une seconde stimulation avant le relâchement du muscle  $\Rightarrow$  pic de force supérieure à celle de la contraction unique



# Etude des unités motrices

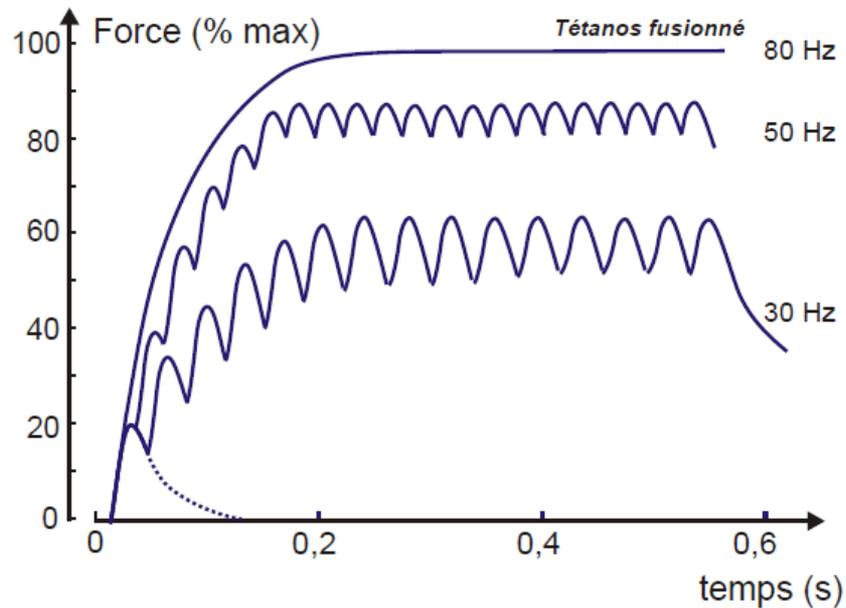
Avec une seconde stimulation avant le relâchement du muscle  $\Rightarrow$  pic de force supérieure à celle de la contraction unique



# Etude des unités motrices

A partir d'une certaine fréquence de stimulation (fréquence de téτανisation) :

- plateau de force
- disparition des oscillations



# Types d'unités motrices

- Il existe une correspondance entre :
  - la taille de l'UM
  - les caractéristiques de son motoneurone
  - et les caractéristiques de ses fibres musculaires
- Pour déterminer la taille d'une UM, on peut donc se servir de :
  - La vitesse de conduction de l'axone
  - La taille du corps cellulaire du neurone
  - Le temps de contraction de l'UM
  - La force développée par l'UM



# Taille de l'UM

- La taille des UM varie de quelques fibres (5-10) pour les oculomoteurs jusqu'à environ 2000 pour les fessiers chez l'humain

muscle	Nombre			
	UM	fibres musc	fibres musc/UM	∅ moy fibres musc (μm)
Oculaire externe	1740	22 000	13	15
Tenseur du tympan	55	1100	20	
Lombicaux	95	10 300	108	19
Biceps brachial	774	580 000	750	50
Gastrocnémien médian	579	1 000 000	1730	54

(d'après Aubert et al., 1976)

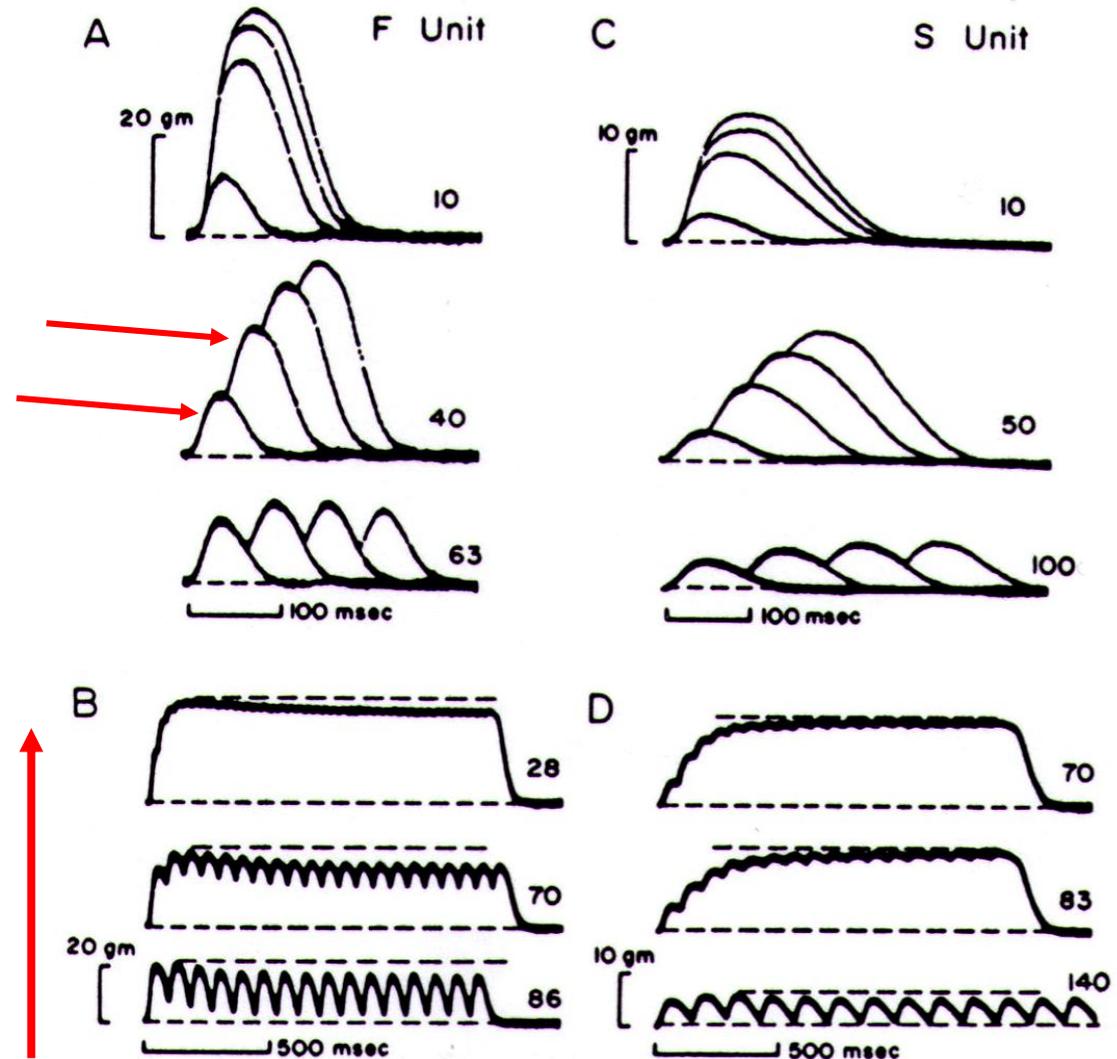


# Force de contraction des UM

Addition des secousses mécaniques

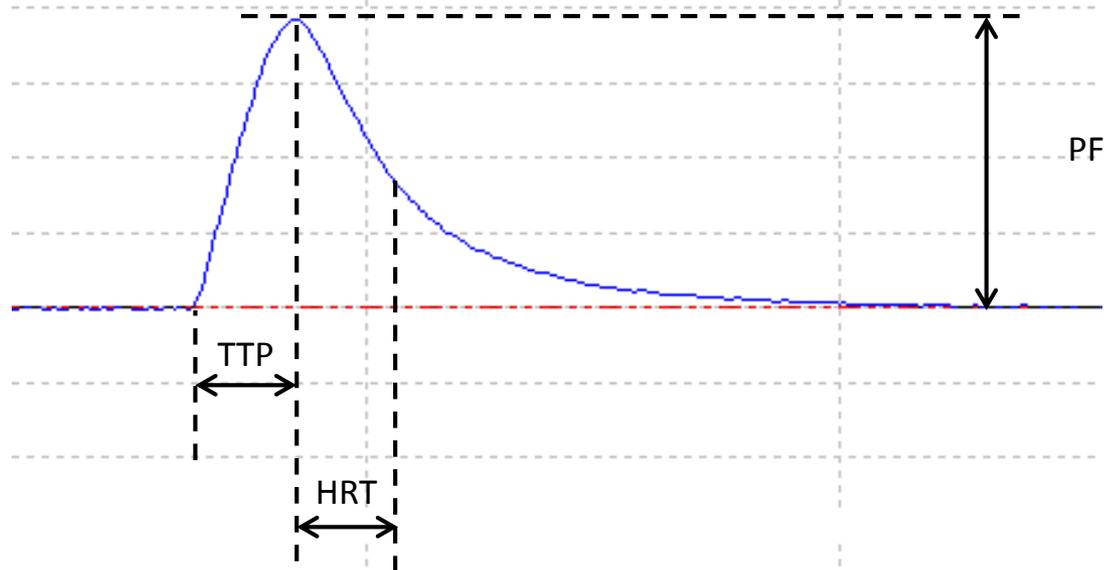
Stimulation en fréquence

Fréquence des PA ↑↑



# Caractéristiques de la secousse d'une UM

- TTP = Time To Peak (temps de contraction)
- HRT = Half Relaxation Time (temps de demi-relaxation)
- PF = Peak force (force au pic)



- Les paramètres cinétiques de la contraction unique influent sur la fréquence d'activation des UM
- Une unité motrice lente (S) a un TTP et un HRT longs donc une contraction lente et la fusion des secousses sera obtenue pour une fréquence d'activation plus basse que dans le cas d'une unité rapide FR ou FF (qui ont des secousses rapides)

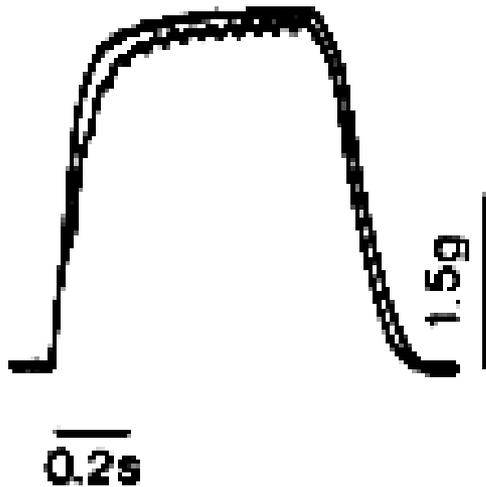


# Caractérisation des unités motrices

Stimulation électrique à une fréquence  
de 20 Hz et de 40 Hz

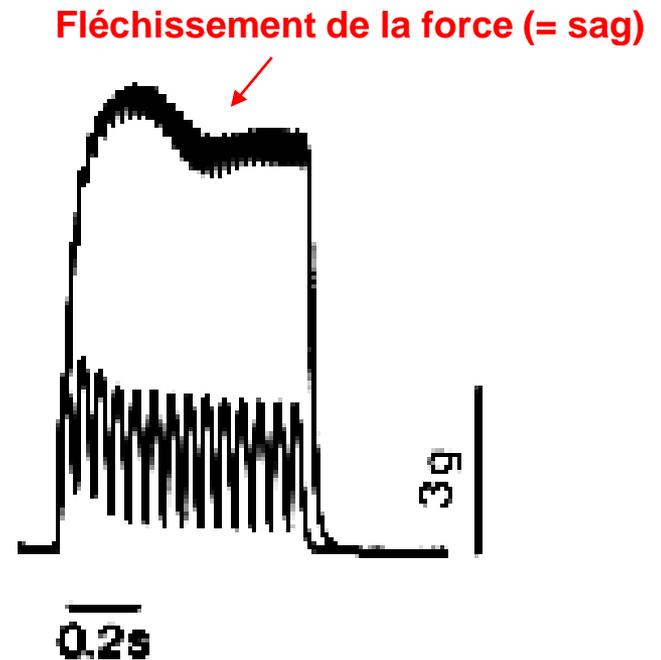
UM lentes

S



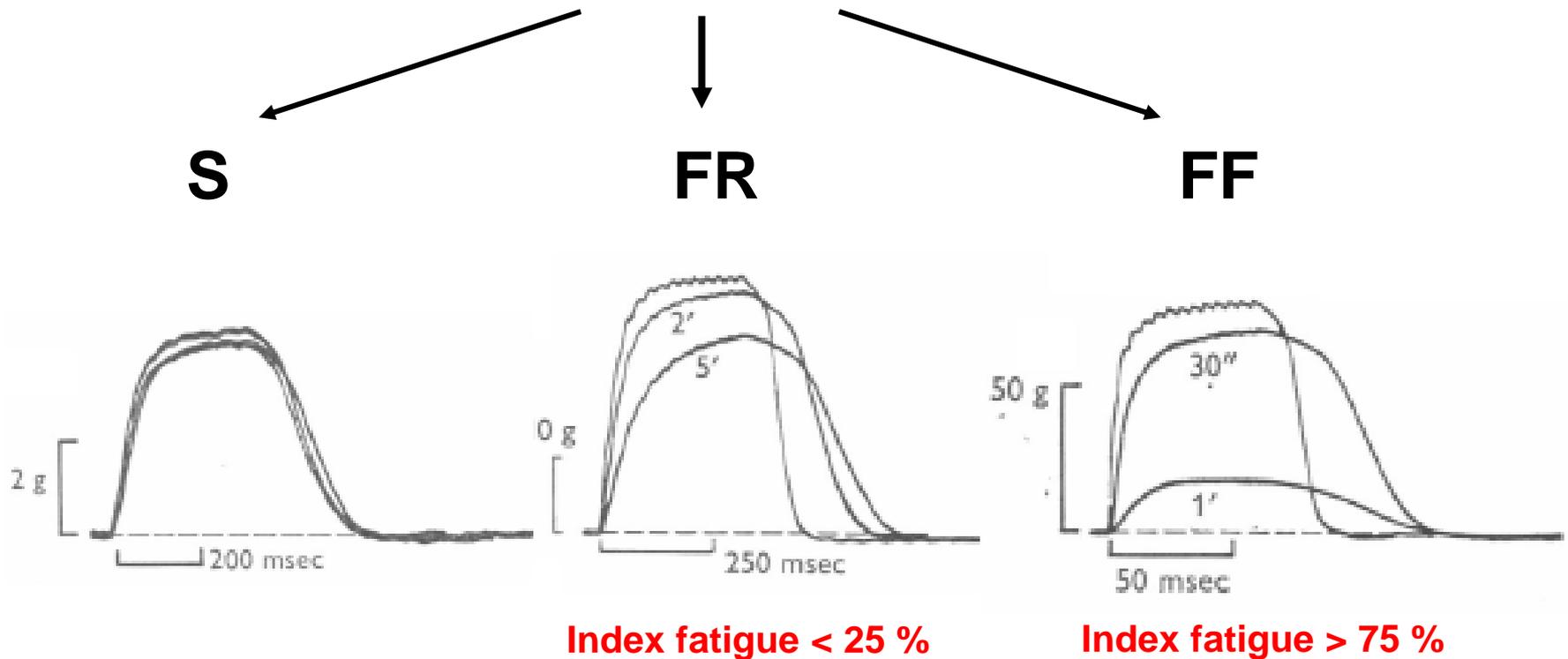
UM rapides

F



# Caractérisation des unités motrices

Test de fatigue (train de stimulation de 330ms à 40 Hz une fois par min, durée totale de 2 min) (d'après *Burke et al., 1973*)



- Il existe des UM non fatigables (type S lent) et des UM fatigables (UM rapides surtout les FF)
- La fatigue = diminution de la force en cours de stimulation



# Types d'unités motrices

- Selon le nombre de divisions terminales de l'axone du motoneurone  $\alpha$  donc de fibres musculaires (une seule synapse neuromusculaire par fibre musculaire)

## ⇒ Taille de l'unité motrice

- Selon la dimension du corps cellulaire et le diamètre de l'axone du motoneurone

(donc sa vitesse de conduction) ⇒ **Propriétés fonctionnelles de l'UM**

Type	S (Slow)	FR (Fast Resistant)	FF (Fast Fatigable)
Dimension du corps cellulaire	petite	moyenne	grand
Diamètre de l'axone	petit	moyen	grand
Nombres de fibres musculaires : <b>taille de l'UM</b>	faible	moyen	élevé



# Types d'unités motrices

- Les fibres musculaires d'une UM sont toutes du même type histologique et peuvent être classées selon:
  - Activité enzymatique :
    - ATPases myofibrillaires : I (faible activité), IIA (plus colorées) et IIB (forte activité)
    - Enzymes de la glycolyse (LDH, phosphorylase)
    - Enzymes du métabolisme oxydatif (SDH, NADH déshydrogénase de la chaîne respiratoire)
  - Chaînes lourdes de myosine :
    - 4 types d'isoformes dans les fibres des muscles striés squelettiques des mammifères :
    - Formes adultes : I-slow- $\beta$ , IIA, IIB, IIX.
    - Isoformes développementales : embryonnaire  $\epsilon$ , néonatale et l'isoforme I slow- $\alpha$  exprimée également dans des muscles spécifiques comme les muscles extrinsèques de l'œil, de la mandibule et le muscle cardiaque .

Type	<b>S</b> (Slow)	<b>FR</b> (Fast Resistant)	<b>FF</b> (Fast Fatigable)
Dimension du corps cellulaire	petit	moyen	grand
Taille de l'UM	petite	moyenne	grande
Type des fibres musculaires	<b>I</b> (Slow Oxydative)	<b>Ila</b> (Fast Oxydative Glycolytic)	<b>Ilb</b> (Fast Glycolytic)

# Types d'unités motrices

- Les fibres musculaires d'une UM sont **toutes du même type histologique** :  
mais
- Il existe un certain **polymorphisme des fibres musculaires** en particulier sur la composition en myosine myofibrillaire.
- Une fibre musculaire peut exprimer différents types de CLM → **fibre « hybride »**.

## Exemples:

- *Dans le muscle long péronier (peroneus longus) , nous avons retrouvé 12 fibres sur les 35 “typées” qui exprimaient plus de 5 % d'une seconde isoforme de MHC ⇒ index de polymorphisme d'environ 33 % dans le PL (Rannou et al., J Physiol, 2010).*
- *Cet index de polymorphisme varie selon les muscles. Dans les muscles de la patte postérieure chez le rat, Caiozzo et al. (2003) ont rapporté un index de polymorphisme allant de 13% pour le Sol à 58% pour l'EDL.*



# Relation vitesse de conduction – temps de contraction

- Relation linéaire
- Le travail initial de Bessou *et al.* (1963) sur le 1<sup>er</sup> lombrical du chat a démontré l'existence d'une corrélation entre la vitesse de conduction de l'axone et le temps de contraction d'une secousse isométrique unique de l'UM.
- Plus la vitesse de conduction est élevée, plus le temps de contraction est court



# Relation vitesse de conduction – force tétranique

- Relation exponentielle
- Il existe des variations individuelles
- Il existe une corrélation entre cette vitesse de conduction axonale et la force tétranique développée par l'UM correspondante (Emonet-Denand *et al.*, 1988).



# Composition du muscle en UM

- Chaque muscle de mammifère contient les trois types d'UM : proportions relatives entre ces types varie selon la fonction mécanique du muscle dans le squelette
- Chez les mammifères, un muscle entier, même sélectionné en fonction de ses propriétés mécaniques « lent » ou « rapide » exprime toujours un mélange de différents types de fibres.
- Muscle postural dans la marche : surtout des unités S et FR ⇒ **force modérée** pendant des temps longs
- Muscle impliqués dans la course : unités FR et surtout des FF ⇒ **force et puissance importantes** pendant des temps brefs
- C'est le nerf qui impose la typologie du muscle
- Mais l'expérience motrice peut aussi avoir une influence sur la typologie du muscle (entraînement de différents types, apesanteur)



# Composition du muscle en UM

## Muscle lent soléaire (*soleus*):

- Stimulation unique (1 seul choc électrique) : on obtient une seule contraction ou contraction unique
- Puis stimulations répétées à une fréquence croissante (5/sec soit 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, ....100 Hz) :
- Quand la fréquence de stim est  $\uparrow \rightarrow$  force mesurée augmente, la vitesse d'établissement de cette force  $\uparrow$  jusqu'à la force maximale augmente aussi.
- Temps de contraction = temps pour atteindre le max de la force
- Le soléaire n'a pratiquement que des fibres lentes donc tps de contraction long.



# Composition du muscle en UM

## Muscle rapide gastrocnémien (*gastrocnemius*):

- Beaucoup d'UM rapides et quelques UM lentes : muscle mixte
- Vitesse de conduction sur l'axone est plus élevée que sur le soléaire
- Force maximale tétanique plus élevée que pour le soléaire
- Il existe une relation entre la vitesse de conduction sur l'axone et la force développée par l'UM.
- Plupart des muscles: beaucoup de petites UM
- Comparaison m. rapide et m. lent : fibres lentes soléaire  $\neq$  fibres lentes des M. rapides



# Force musculaire

- **Dépend du type de myosine** présente dans les fibres
  - Chaîne lourde de myosine:
    - Myosin Heavy Chain (MHC) I → fibres lentes → unités S
    - MHC IIa → fibres rapides → unités rapides FR
    - MHC type IIx → fibres rapides → unités rapides FF
    - MHC de type IIb : n'existe pas chez l'homme. Existe chez les petits rongeurs.
  - *La composition en MHC varie avec*
    - L'entraînement:
      - $I \leftrightarrow IIa, IIa \leftrightarrow IIx, IIx \leftrightarrow IIb$
      - *Le passage de fibres lentes vers rapides plus facile*
    - *Dans ce cas, on trouve des fibres IIax et les caractéristiques de contraction dépendent des proportions relatives des ≠ types de MHC.*
    - L'immobilisation fait toujours passer du type lent au type rapide.
    - Le vieillissement : perte progressive de fibres musculaires et d'abord les fibres rapides (utiles pour mvt balistiques)



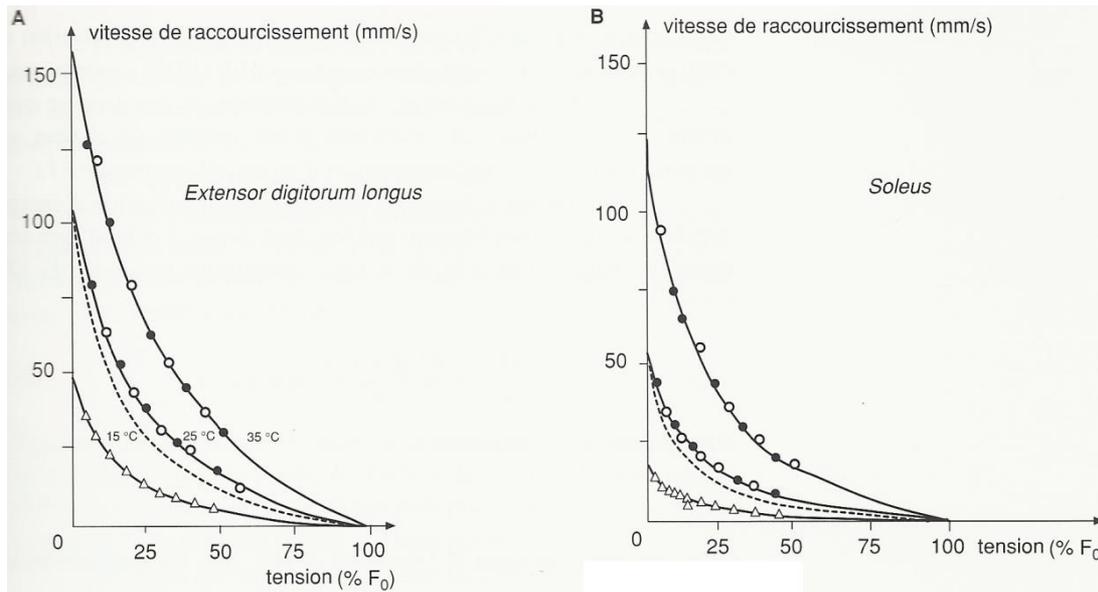
# Force musculaire

- Dépend du type de fibres
- Dépend du nombre de fibres musc/UM (= taille)
  
- Dépend aussi de la fréquence d'activation de l'UM
- Si on mesure la force maximale développée par la stimulation des fibres I ou II seules
  - Force fibres I < force fibres IIa
  - Force fibres IIa < force fibres IIb
  - Ces forces maximales sont appelées = force spécifique de la fibre musculaire
- Les unités motrices S ont moins de fibres musc que les unités FR qui elles-mêmes ont moins de fibres que les unités FF.
  
- Pour une même fréquence d'activation:
  - La force développée par les unités S < force unités FR < force unités FF



# Vitesse de contraction

- On calcule le temps de contraction sur une contraction **ISOTONIQUE** : on étudie la vitesse de raccourcissement. Quand le muscle se contracte, il se raccourcit.
- Relation entre vitesse contraction et charge développée:
  - On impose une charge constante au muscle et on mesure la vitesse de raccourcissement
  - À charge constante, le muscle se raccourcit avec une vitesse constante
  - Si on diminue la charge, la vitesse de raccourcissement augmente
  - Relation V-charge = hyperbole équilatère . Même forme quel que soit le type de muscle.
- Vitesse de contraction unités FF > vitesse unités FR > vitesse unités S

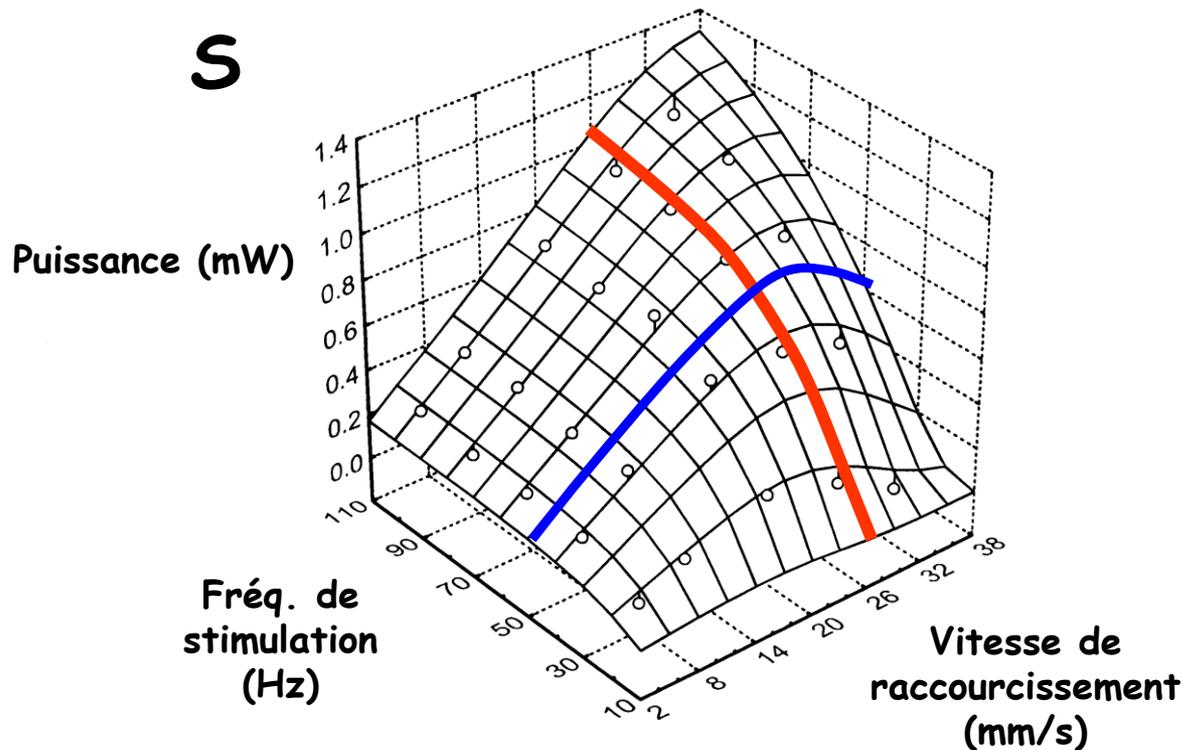


La relation V-charge se déplace en fonction du type de muscle et de la température



# Relation fréquence stimulation – vitesse optimale de contraction

- Pour une même vitesse de raccourcissement, la puissance de l'UM augmente avec la fréquence de stimulation
- Pour une même fréquence de stimulation de l'UM, la puissance augmente avec la vitesse



# Mise en jeu des unités motrices

- Recrutement des UM mis en évidence sur l'expérience d'étirement réflexe de la patte : (Henneman et al., 1965)
  - Chez le chat décérébré (pas d'anesthésie)
  - Laminectomie, dénervation de la patte à l'exception du muscle étudié, capteur de force sur le tendon distal du muscle
  - Stimulation réflexe par étirement du triceps sural
  - Étirement → contraction réflexe du muscle
  - L'activation du MN est enregistrée dans le filament de la racine ventrale (visualisation des potentiels)
- Cette expérience permet de déterminer le seuil de recrutement des UM. On évalue la taille des UM par l'amplitude des PA. Les gros axones (gros  $\emptyset$ ) ont des PA d'amplitude plus importante
- Quand la force développée est faible → recrutement des UM les plus petites
- Quand la force augmente → le SNC recrute des UM les plus fortes
- Le seuil de l'UM est le niveau de la force à partir duquel l'UM apparaît
- **Le recrutement s'effectue dans l'ordre croissant de taille des UM selon le principe de la taille de HENNEMAN**



# Mise en jeu des unités motrices

- Pour obtenir une force progressivement croissante  $\Rightarrow$  le muscle recrute les UM selon leur taille
- **Recrutement selon le principe de la taille d'après Henneman**
- en commençant par les UM lentes S plus petites (motoneurones les plus excitables), ensuite les UM FR et enfin les FF



# Mise en jeu des unités motrices

- **Pour l'UM :**
  - **Réponse en tout ou rien**
  - Si un PA descend sur l'axone, toutes les fibres de l'UM se contractent simultanément  $\Rightarrow$  contraction maximale unique
  - S'il n'y a pas de PA  $\Rightarrow$  pas de contraction
- Le système nerveux central doit répondre à **2 objectifs**
  - Obtenir pour chaque muscle une **force précise** et **adaptée** et pas uniquement la force maximale
  - Maîtriser et **stabiliser** la force de la contraction musculaire **dans le temps** (sans secousse)



# Mise en jeu des UM : comment graduer la force ?

- À un instant donné, la force de la contraction dépend du nombre d'UM stimulées.
- La force est ajustée en  $\uparrow$  ou en  $\downarrow$  le nombre d'UM
- Le gain de force apporté dépend de la taille de l'UM recrutée ce qui conditionne la précision de la force.



# Et chez l'homme ?

- **Études en contraction volontaire**
- Étudié sur l'enregistrement de l'activité électromyographique (EMG) à l'aiguille ( $\neq$  EMG de surface)
- La pointe de l'aiguille est influencée par un faible rayon autour  $\approx 10 \text{ UM}$
- Les logiciels d'acquisition permettent de décomposer le signal et de différencier les PA selon leur forme  $\rightarrow$  différencier les UM



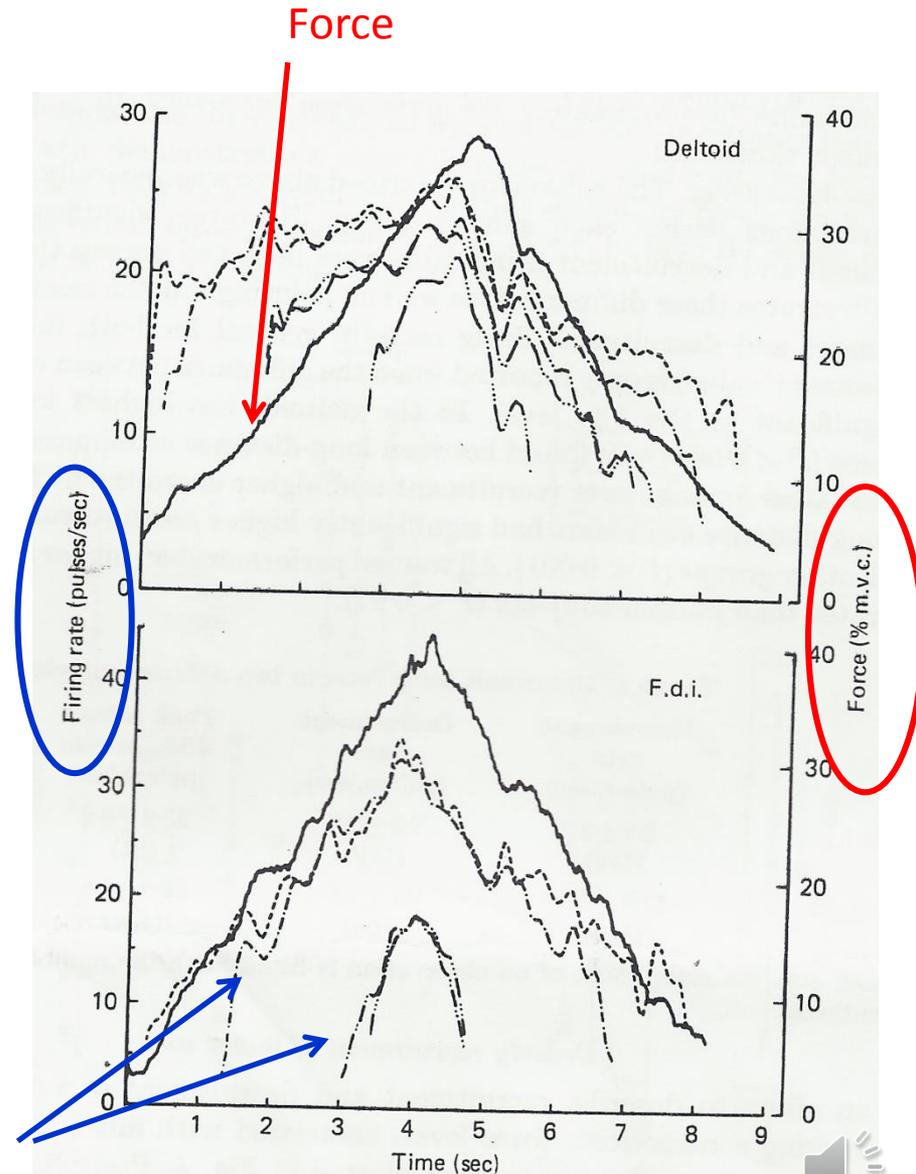
# Ordre de recrutement chez l'homme

- Expériences de De Luca et al. (1982, 1994, 1996)
  - sur le deltoïde et le 1<sup>er</sup> IOD
  - **En contraction isométrique volontaire**
  - On mesure l'intervalle de temps entre 2 PA successifs (de la même UM) et l'inverse = fréquence instantanée de décharge de l'UM
  - UM à seuil bas: celles qui démarrent en premier. Celles qui ont les fréq d'activation les plus lentes = unités S
  - Il n'y a **pas de différence du seuil de recrutement selon le type d'exercice musculaire** : nageur, pianiste, sédentaire, haltérophile



# Ordre de recrutement chez l'homme

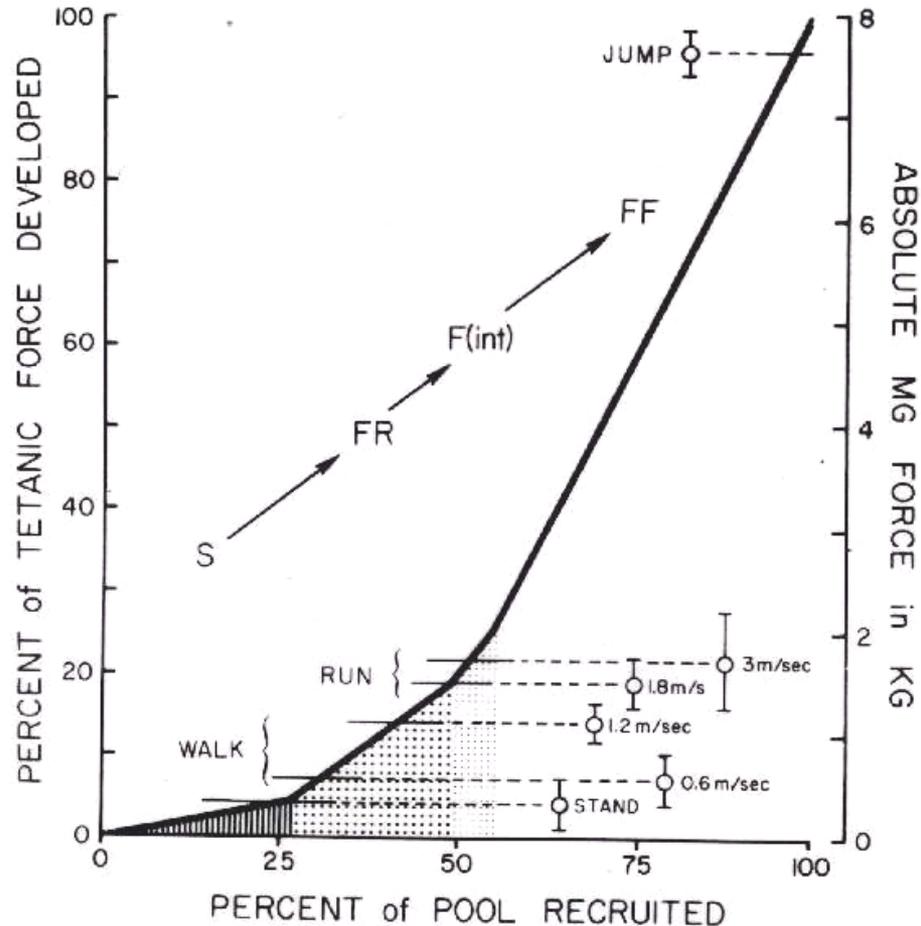
- [Expérience de De Luca et al. \(1982\)](#)
  - sur le deltoïde et le 1er IOD
  - contraction de force croissante puis décroissante
  - **Le mode de recrutement des UM se fait selon le principe de la taille de Henneman**
  - Pour répondre à la demande d'accroissement de la force, le SN recrute 1 UM puis augmente sa fréquence d'activation puis « ajoute » deuxième UM, etc.



Unités  
motrices

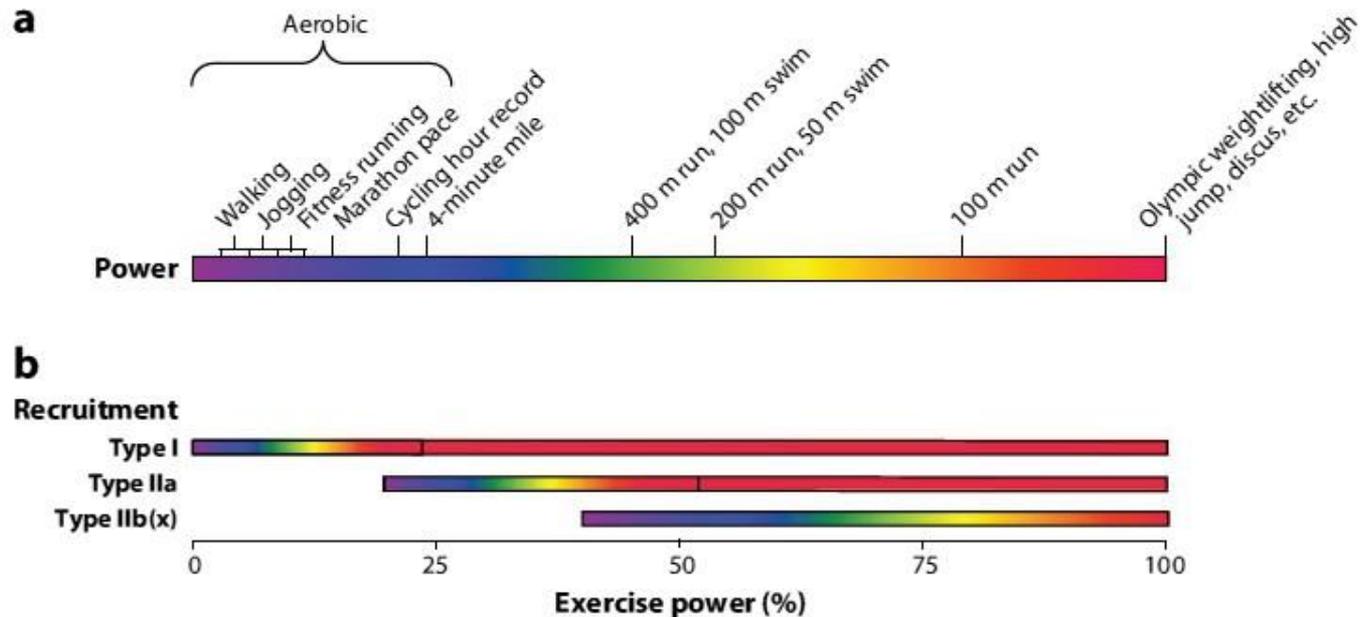
# Ordre de recrutement chez l'homme

- Selon le degré de force tétanique



# Ordre de recrutement chez l'homme

- [Selon la puissance de l'exercice](#)



**Figure 7**

Power output and fiber type recruitment across sporting events. (a) Spectrum of percent of maximum power output. (b) Spectrum of the fiber type recruitment for the corresponding level of power output. Low-power exercise recruits primarily slow-twitch (type I) muscle fibers. As exercise intensity increases, type I fibers reach their maximum capacity to produce power (*red*) and faster type II and type IIb(x) fibers are then recruited. Figure adapted from Knuttgen et al. (92).

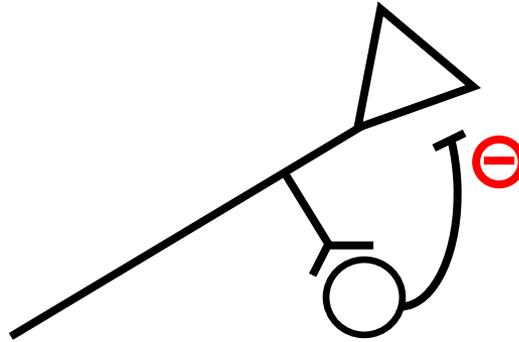


# Comment stabiliser la force dans le temps ?

- Une force stable s'obtient par la fusion des secousses déclenchées par chaque PA
- **Moyen :**
  - recruter le nombre d'UM nécessaire / force de contraction souhaitée
  - avec une fréquence de stimulation suffisante  $\Rightarrow$  téтанos fusionné
  - La fréquence de fusion dépend du type d'UM
- **Problème :**
  - les mêmes UM ne peuvent pas se contracter en permanence
  - Remplacement entre UM **de même taille**



# Comment stabiliser la force dans le temps ?



- Les UM de **même taille** sont recrutées à tour de rôle
- **Le neurone de Renshaw** reçoit des PA activateurs de la part du motoneurone et inhibe ce motoneurone dès qu'il atteint son seuil d'excitabilité
- L'UM devient inexcitable
- et elle est remplacée par une UM de même taille dans le noyau moteur du muscle
- Recrutement successif de toutes les UM de même type
- $\Rightarrow$  évite la fatigue des UM mais limite la puissance musculaire
- *Pour des niveaux de contraction modérés, chaque UM ne peut ainsi être mise en jeu plus de 30 fois par seconde.*



# Neurone de Renshaw

- Lorsque le motoneurone alpha envoie un PA via son axone, il envoie aussi un PA excitateur via une collatérale au neurone de Renshaw
- Le neurone de Renshaw reçoit un certain nombre de PA  
Il répond à la stimulation avec une décharge  $> 100$  Hz.
- Il envoie des PA inhibiteurs sur le  $MN\alpha$   
(hyperpolarisation quand il y a sommation des PPSI )
- **Rôle : il limite et régule la fréquence de décharge maximale des motoneurones envoyée aux fibres musculaires.**

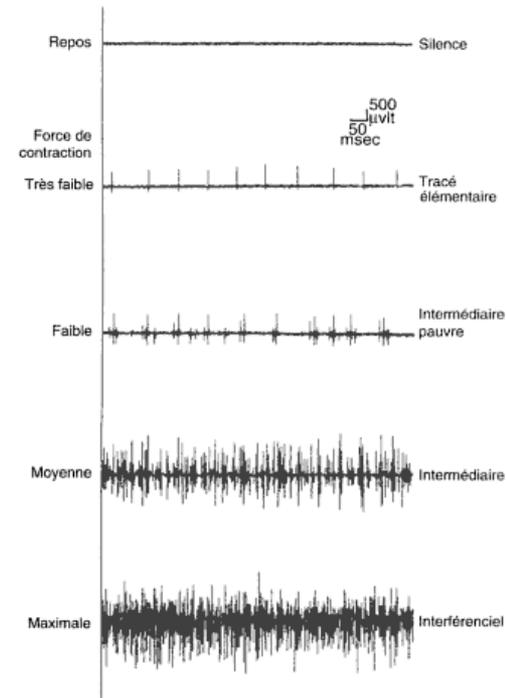
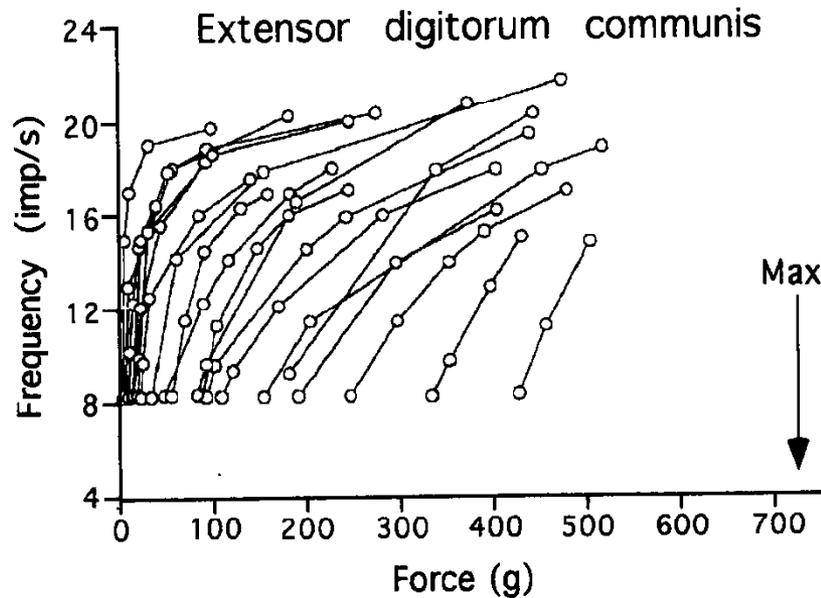


# Fréquence d'activation des unités motrices

- Lors du recrutement physiologique
  - Chez l'animal
  - Chez l'homme
    - Fréquences d'activation basses
    - 22 Hz en moyenne pour l'abducteur pouce
    - 31 Hz pour le 1<sup>er</sup> IOD
- En conditions de stimulation électrique
  - Chez l'homme
    - Jusqu'à 100 Hz pour stimuler ces mêmes muscles et obtenir la fusion tétanique
- En conditions physiologiques : la contraction tétanique est obtenue par « rotation entre les UM »



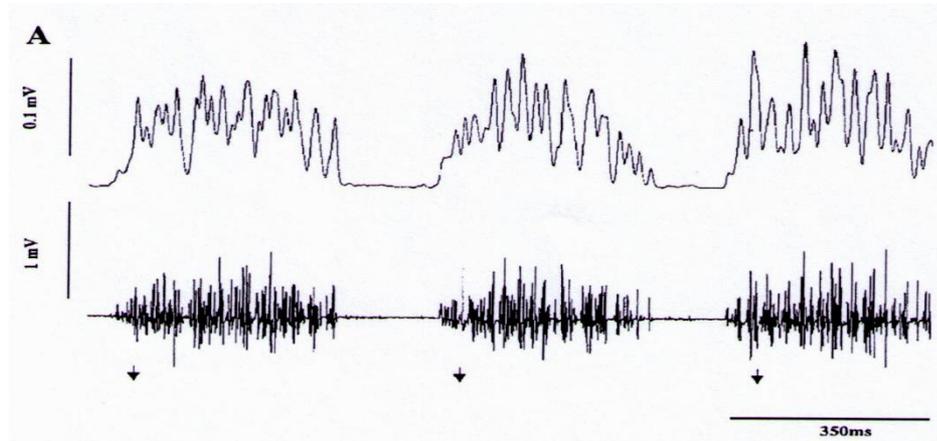
# Mise en jeu des unités motrices en force croissante



- Au cours d'une contraction volontaire isométrique de force croissante
- L'augmentation de la force volontaire se fait par :
  - augmentation de la fréquence d'activation de chaque UM  
⇒ **recrutement temporel**
  - l'augmentation du nombre d'UM mises en jeu  
⇒ **recrutement spatial**



# EMG de surface (global)



- Recueil par électrodes extérieures au muscle
- signal enregistré = fusion des PUM
- Signal de type périodique
  
- 2 types de traitement du signal :
- Traitement fréquentiel
- Rectification et filtrage (signal redressé – filtré) : proportionnel à la force développée par le muscle



# EMG global

- L'EMG global permet ainsi la lecture des programmes moteurs élaborés par le système nerveux central
- programme moteur élémentaire ou minimal : pattern triphasique d'un mouvement

## Mouvement du coude



## EMG



# **Influence de la commande nerveuse sur le muscle**

## **Influence de la fonction mécanique du muscle sur sa commande motrice**



# Effets des modifications de la commande ou de la fonction mécanique du muscle

- **Influence de la commande motrice sur le muscle**
  - Sur la typologie du muscle
  - Sur les paramètres de la contraction
- **Influence des conditions mécaniques de la contraction sur la commande motrice**
  - Suppression de la fonction
  - Diminution de la sollicitation mécanique
  - Augmentation de la sollicitation mécanique
  - Changement de fonction (transposition tendineuse)



# Modifications de la commande nerveuse

## 1. Diminution de la commande et des flux axonaux

1. Section de ME: traumatiques, expérimentales
2. Blocage de la propagation de l'influx Nerveux

## 2. Modification du mode d'activation nerveuse

1. Stimulations électriques
2. Innervations croisées

*Les figures servent de support aux conclusions observées. Les références bibliographiques ne sont pas à retenir.*

# Diminution de la commande et des flux axonaux

- diminution ou disparition de l'influence nerveuse et trophique sur le muscle  $\Rightarrow$  amyotrophie.
- Chez l'homme :
  - observations effectuées chez des patients victimes de traumatismes de la ME
  - Exemple: Section complète de ME (paraplégiques)  $\rightarrow$  âge= 29-56 ans analyse histologique de 3 muscles Vastus Lateralis / Gastrocnemius / Soleus au minimum de 2 ans après le traumatisme
    - Résultats :
      - atrophie des fibres musculaires (% au deltoïde pris comme contrôle chez ces patients)
      - $\uparrow$  proportion fibres II (marquage ATPases myofibrillaires)
      - $\downarrow$  enzymes métabolisme oxydatif (NADH, SDH)

*Grimby et al. 1976*

# Diminution de la commande

- Chez l'animal (chat, rat) :
- masse des muscles, surface de section des fibres, MHC
- Études sur des préparations expérimentales de section transverse de ME
- Les mêmes effets que chez l'homme sont observés après section chirurgicale de la ME (niveau T7-T8, S1-S2)
- Muscles étudiés: soleus, TA, gastroc, EDL, QF-RF-VL-VM-VI à différents temps post-opératoires (4-8-15-30-60 jours postop)
- Mesures :
  - masse muscles
  - surface de section fibres
  - Typage des chaînes lourdes de myosine
- Résultats :
  - ↓↓ masse corporelle, ↓↓ **masse muscles** (maximale à 30 jours) prédominante sur le soleus / extenseurs rapides genou-QF- fléchisseurs rapides cheville-TA-EDL.
  - ↓↓ surface de section des fibres
  - ↓↓ % fibres exprimant des MHC type I au profit des fibres exprimant des MHC type II : IIA, IIX (isoformes typiques des muscles rapides)

*Grossman et al. 1998*

# Diminution de la commande

- Étude de la contraction du muscle entier sur le rat :
  - Soleus : muscle lent
  - Observations faites à 3 et 6 mois après la chirurgie, comparaison entre les animaux opérés et animaux contrôles appariés
  - Mesures :
    - mesure de la force maximale en conditions isométriques sous stimulation électrique
  - Résultats:
    - ↑↑ vitesse de raccourcissement
    - ↓↓ force maximale tétanique: = 44% (contrôles) à 3 mois, = 25% (contrôles) à 6 mois.
    - ↑↑ fatigabilité du soleus (test de Burke): diminution significative de la force dès 10 sec et 60% force max initiale à 3 mois et 50% force initiale à 6 mois.
  - Ceci confirme l'évolution du muscle vers un profil plus rapide
    - Augmentation de l'expression des isoformes rapides des MHC
    - Augmentation de la vitesse de raccourcissement
    - Sur la secousse unique :
      - ↓↓ des temps de contraction (secousse unique)
      - ↓↓ résistance à la fatigue

(Talmadge et al. 2002 )

# Diminution de la commande

- Étude de la contraction du soléaire sur le rat :

Muscles  
contrôles à 3  
et 6 mois

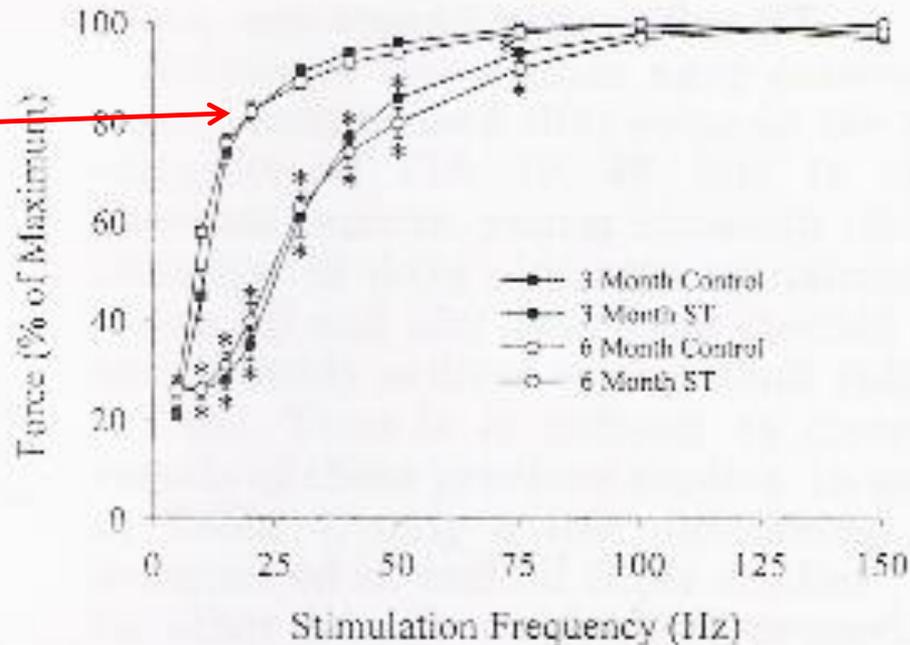


Fig. 3. Relative force-frequency relationships for the soleus muscles of control and ST rats. There is a rightward shift in the force-frequency relationships for the ST rats (circles) compared with the controls (squares). There were no significant differences between the 2 control or the 2 ST groups. \*Significantly different from corresponding control group ( $P \leq 0.05$ ).

# Diminution de la commande

- Cette conversion vers un profil plus rapide se voit aussi dans les muscles plus rapides comme les gastrocnémiens, TA, Plantaris.
- Mesure de la contraction isométrique et isotonique (MG et Sol) par stimulation du nerf (*Roy et al. 1984*)
  - ↓ de **33%** masse MG, de **43%** du Sol
  - Caractéristiques de la secousse : force maximale, temps de contraction (CT), temps de demi-relaxation (HRT) ⇒ CT et HRT du Sol raccourcis de 40%
  - Force tétanique isométrique : relation force en fonction de la fréquence de stimulation ⇒ déplacement des courbes vers la droite (vers les fréquences plus élevées)

# Diminution de la commande

Roy et al., 1984:

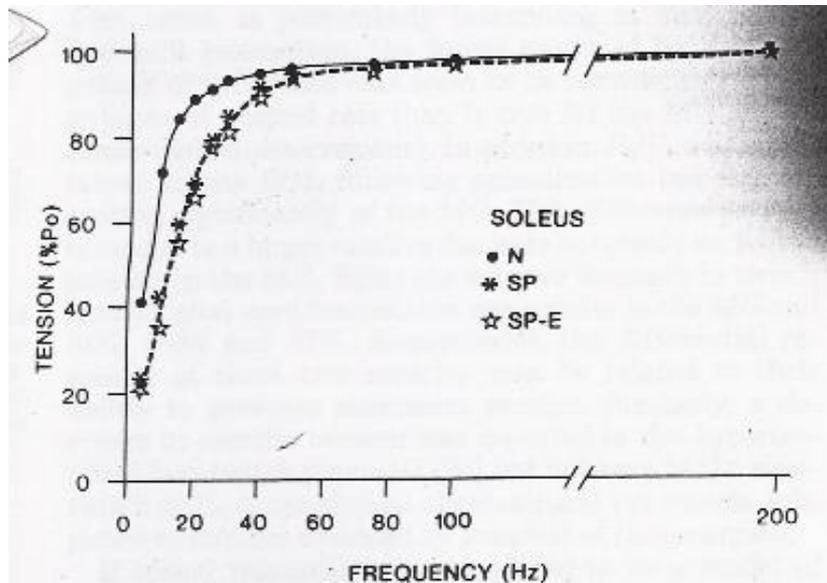
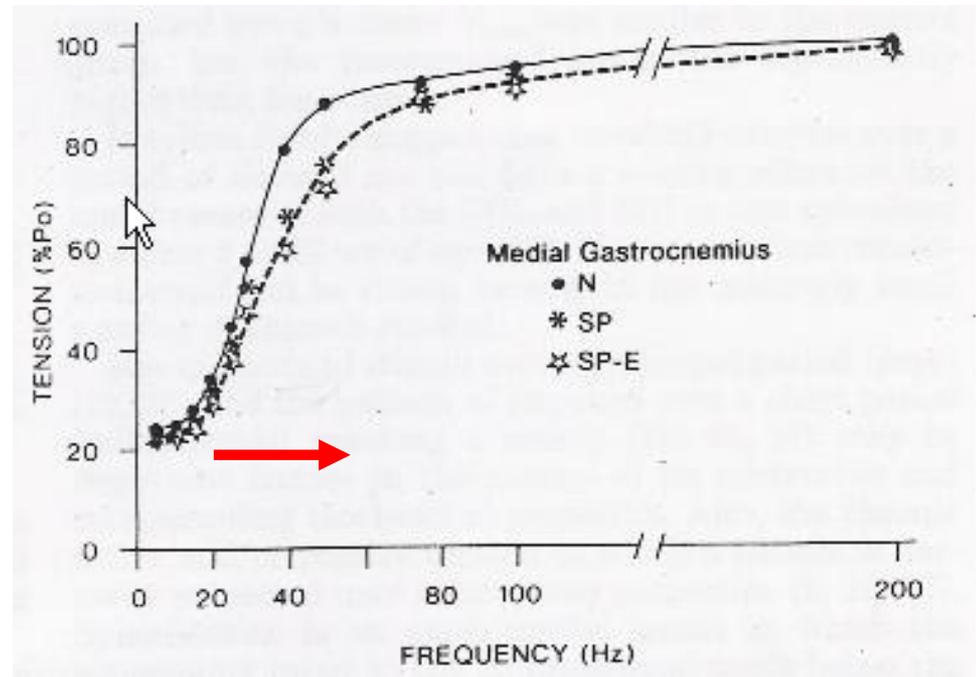


FIG. 4. Frequency-tension relationship for soleus muscle under 3 experimental conditions described in Fig. 2. Tension is expressed as percent maximum tetanic force ( $\%P_o$ ). Dashed line represents both Sp and Sp-E groups. Maximum rate of tension development ( $dP_o/dt$ ) values were  $0.24 \pm 0.02$  and  $0.20 \pm 0.03$   $N \cdot ms^{-1}$  for normal and experimental groups, respectively.



Quel que soit le type du muscle rapide ou lent, la perte de la commande nerveuse se traduit par la conversion vers un phénotype contractile plus rapide

# Modification de la commande

- Protocoles de stimulation électrique
- Caractéristiques de cette stimulation: on fait varier la fréquence des PA et/ou la durée de stimulation
- **1<sup>ère</sup> Expérience : stimulation d'un muscle rapide Peroneus Longus chez le chat**
  - Stimulation « **tonique** » : Sur 24h, pendant 8 sem, Fréquences de 5 - 10 Hz et de 20 – 40 Hz, Méthode télémétrique (électrodes de stimulation implantées à demeure, connection IF)
- Mesure :
- **1- force *in vivo*** pendant la période de stim
- **2- force *ex vivo* au tendon directement** (expérimentation terminale) sur muscle entier (contraction isométrique provoquée par une stimulation):
  - Temps de contraction (CT), Temps de demi-relaxation (HRT), force maximale
  - relation force – fréquence de stimulation
  - Test de fatigue (40 Hz)

*(Eerbeek et al, 1984)*

# Modification de la commande

## Secousse (twitch)

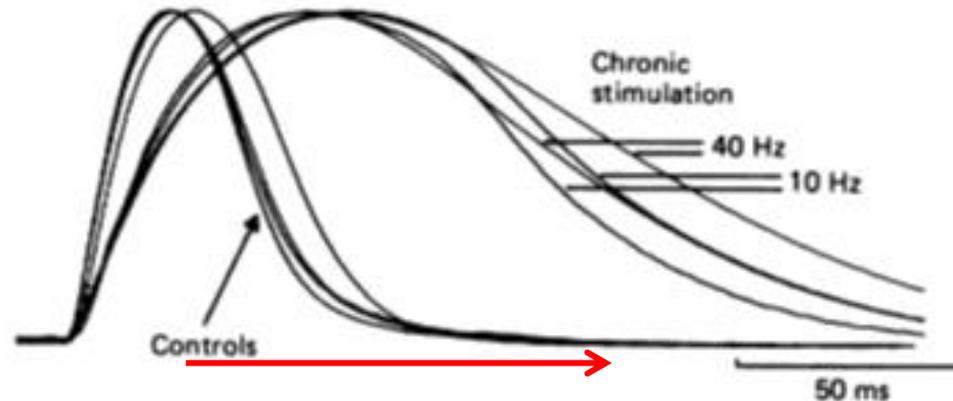
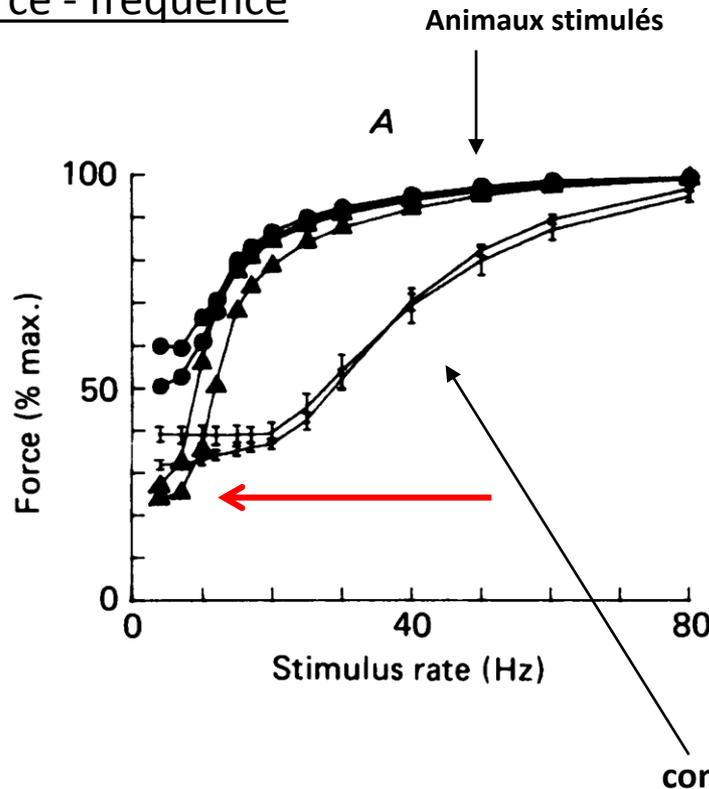


Fig. 1. Twitches recorded from eight different peroneus longus muscles of four different cats. Records labelled chronic stimulation were from left-side muscles subjected to long-term activation at pulse rates of 40 Hz (two cases) and 10 Hz (two cases) respectively. Records labelled controls were from the right-side muscles of the same animals. All records are averages of ten sweeps each. In order to facilitate comparisons of time course, the twitches are displayed at a common time scale but with normalized amplitudes.

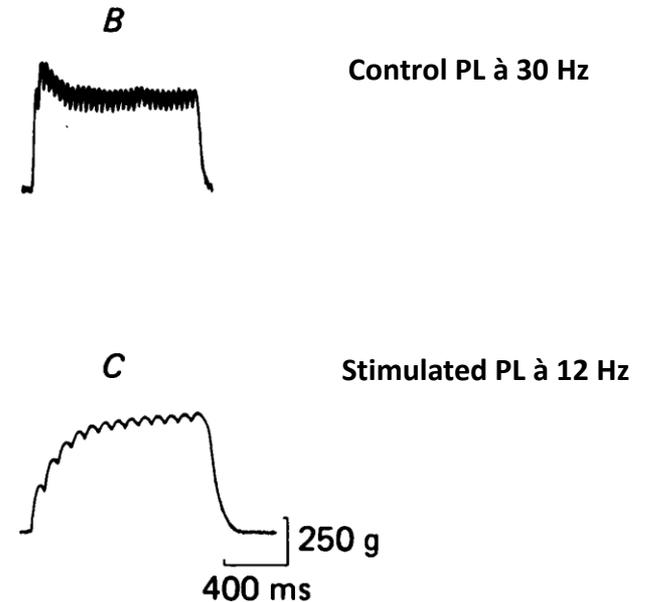
- ↑ Temps de contraction (CT) et ↑ (temps de demi-relaxation) HRT quelle que soit la fréquence de stimulation chronique
- La stimulation chronique d'un muscle modifie son phénotype vers un profil plus lent

# Modification de la commande

## Relation force - fréquence



## Tétanos non fusionné



- Disparition du sag (fléchissement de la force lors du téτανos non fusionné)
- Modification du profil de la relation force – fréquence (4 Hz à 200 Hz non montré) :
  - déplacement de la courbe vers la gauche → le même pourcentage de la force max est obtenu pour une fréquence de stimulation moindre (diminution de la fréquence de fusion)
  - Quelle que soit la fréquence de stimulation 10 Hz et de 40 Hz

# Modification de la commande

- 2<sup>ème</sup> expérience : sur muscle lent (Soleus du rat)
  - Protocole de stimulation: 2 schémas de stimulation
  - **pulses courts à 100 Hz** (60 pulses de 100 Hz toutes les 60s) donc pattern type « phasique », intermittent de type tonique
  - **pulses longs à 10-15 Hz** (150 pulses de 100 Hz toutes les 15 s) pdt 2-130 jours.
  - Mesures: Contraction en conditions isométriques et isotoniques
  - Résultats :
    - La stim à 100 Hz  $\Rightarrow$  changements des propriétés du **soleus** de type **phasique rapide**
    - $\downarrow$  ratio secousse / tétanos (twitch/tetanus ratio)
    - Courbe force-fréquence: déplacement vers la droite (hautes fréquences)

*(Gorza et al, 1991)*

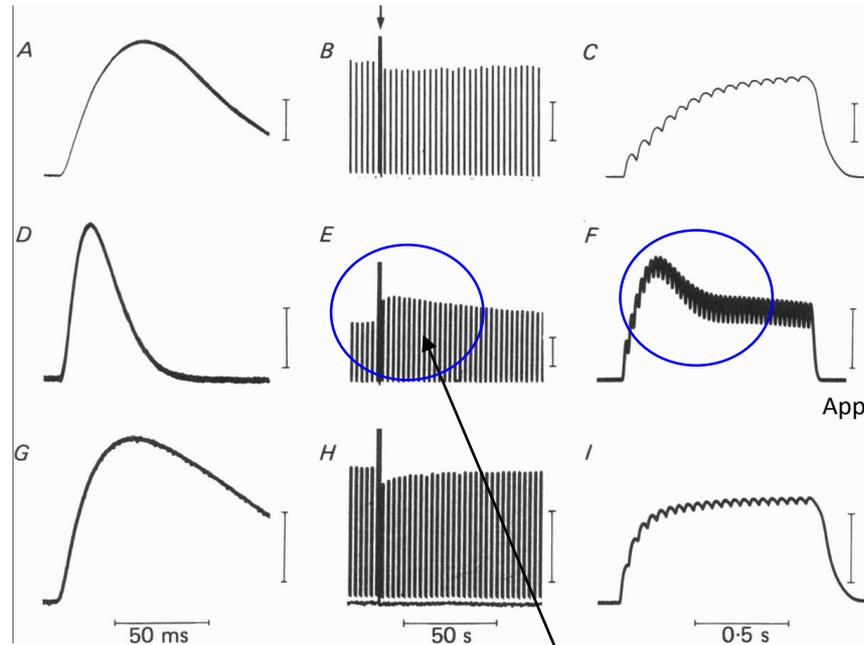
# Modification de la commande

Secousse unique

Trains de secousse après tétanos

tétanos

Accélération de la secousse  
dès J2, stable à 30 jrs



Soleus normal

Stimulation phasique

Apparition d'un sag sur le tétanos non fusionné

Stimulation tonique

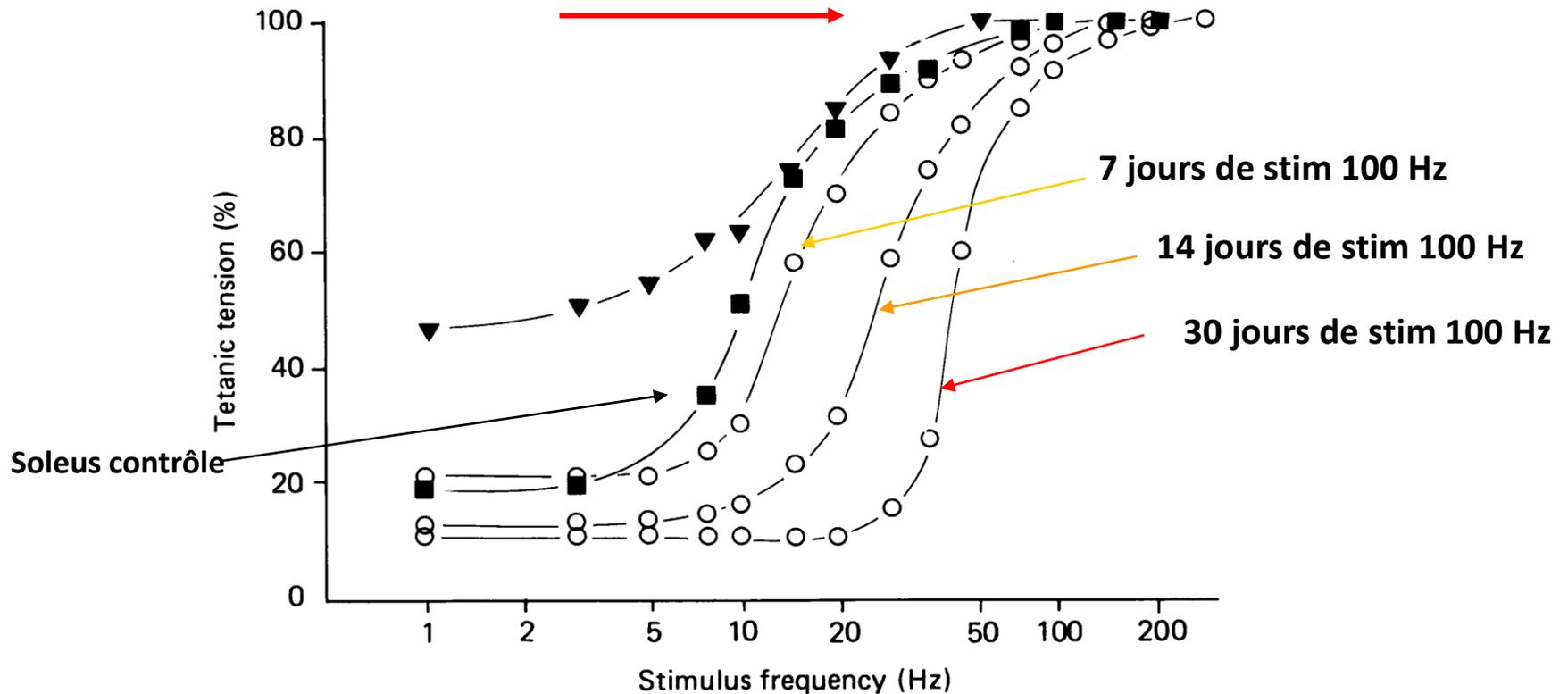
Phénomène de potentialisation de la secousse

**La stimulation à fréquence élevée d'un muscle lent induit des effets inverses à ceux produits par une stimulation « tonique » sur un muscle rapide**

*(Gorza et al, 1991)*

# Modification de la commande

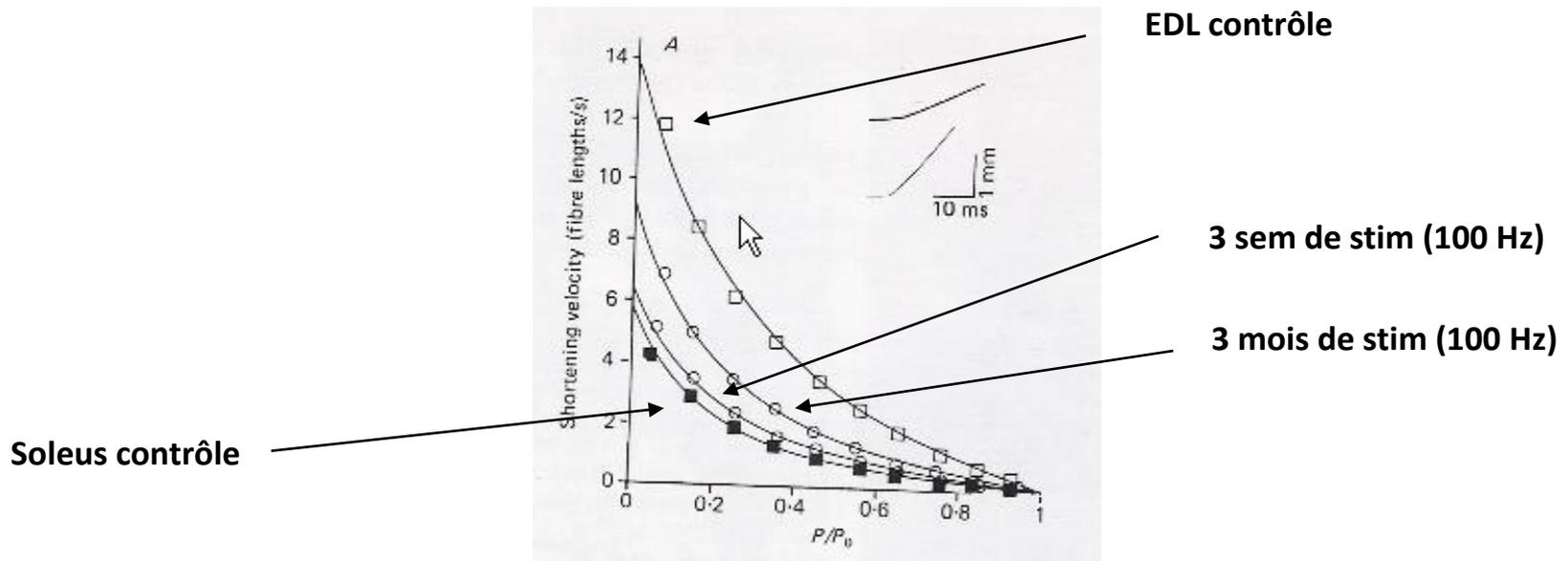
Relation force – fréquence (contraction isométrique):



(Gorza et al, 1991)

# Modification de la commande

- Relation force-vitesse (condition isotonique):
  - La courbe force – vitesse du soleus se rapproche de celle du muscle rapide EDL.



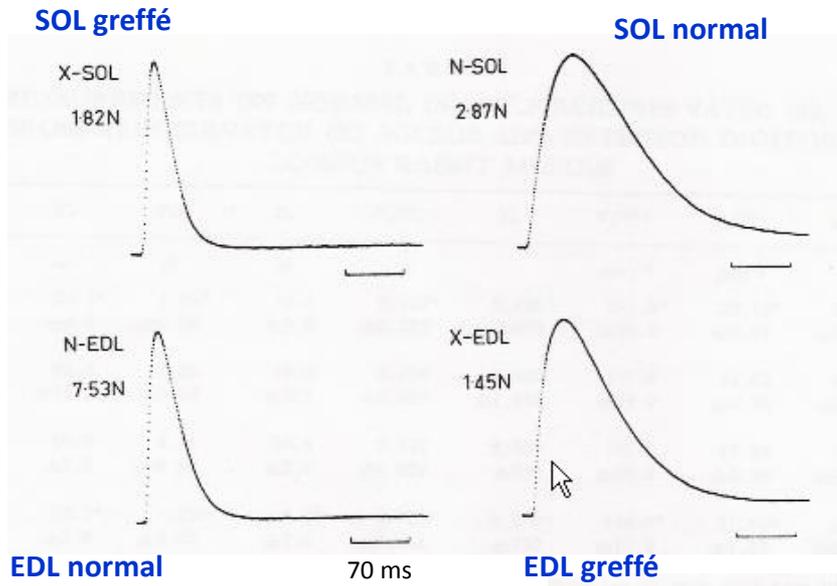
- Immunohistochimie (marquage par des Ac anti-MHC) :
  - Soleus normal : majorité de fibres exprimant l'isoforme I de MHC et < 10 % de fibres MHC type II
  - Soleus stimulé : **augmentation du % de fibres exprimant MHC type II**

(Gorza et al, 1991)

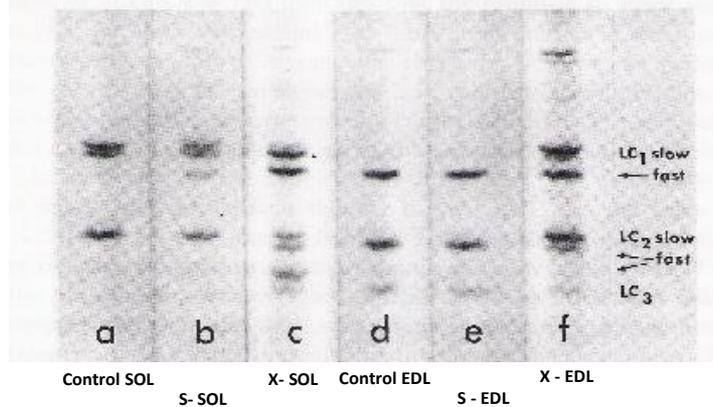
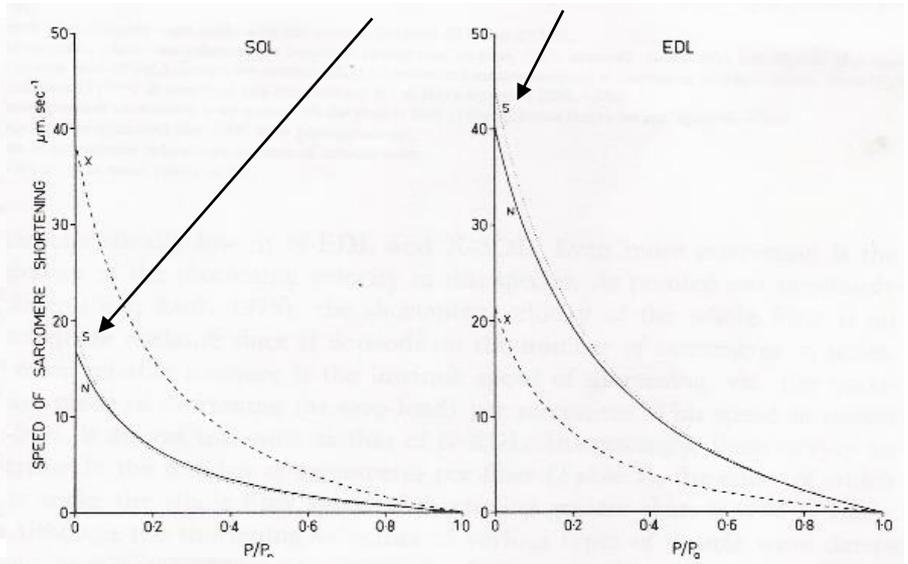
# Innervations croisées

- Les capacités mécaniques du muscle dépendent en partie des potentiels d'action envoyés par les motoneurones alpha.
- **1<sup>ère</sup> expérience : innervation croisée entre l'EDL (extenseur long des orteils) et le soleus chez le lapin (1975).**
  - Observation effectuée 11 mois après la chirurgie
  - Inversion du profil des propriétés contractiles des 2 muscles.  
**L'EDL devient plus lent et le soleus devient plus rapide.**
  - Électrophorèse des chaînes légères de myosine : Apparition d'isoforme rapide de chaîne légère de myosine (MLC).  
*(Sreter et al., 1975)*

# Innervations croisées



S: Muscle réinnervé par son propre nerf

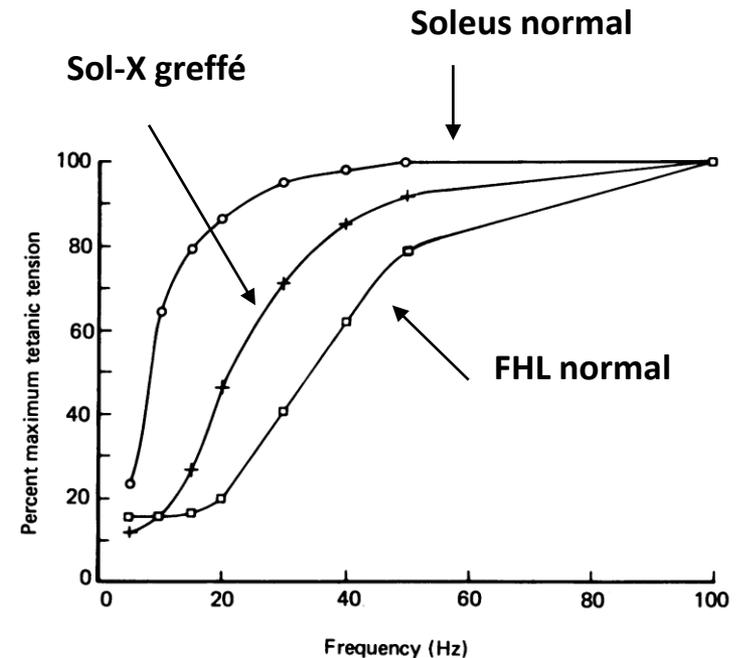
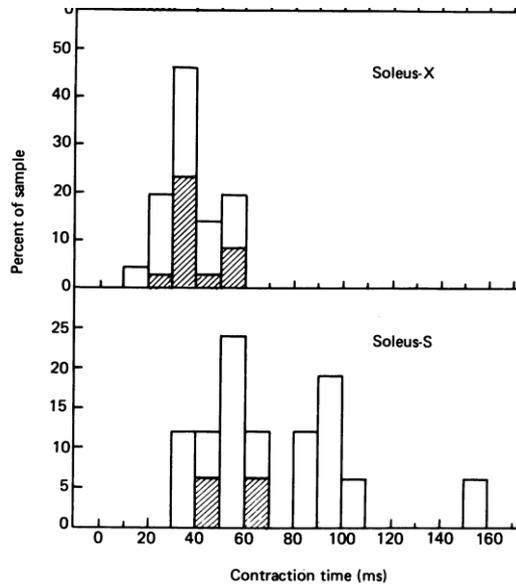


(Sreter et al., 1975)

# Innervations croisées

- 2<sup>ème</sup> expérience: propriétés des Unités Motrices du soleus du chat
- Protocole :
  - innervation du soleus avec le nerf du Flexor Hallucis Longus (FHL)
  - Évaluation 1 an après la chirurgie
  - Étude immunohistochimique du profil des fibres
  - Propriétés contractiles des UM. (*Chan et al., 1982*)

# Innervations croisées



**Distribution Tc de la secousse.** Les hachures indiquent les UM qui présentent un sag (↑ nbre UM avec sag dans le soleus).

**Relation force – fréquence.**

- **Les expériences d'innervation croisée ont montré que l'activité du motoneurone commande le phénotype musculaire.**

*(Chan et al., 1982)*



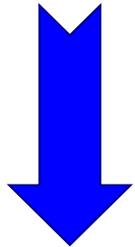
Les caractéristiques du muscle peuvent également être modifiées en agissant sur ses contraintes mécaniques de différentes manières:

1- suppression ou diminution de son efficacité mécanique

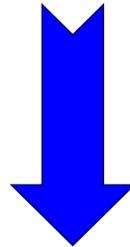
2- augmentation de la sollicitation mécanique

3- modification de son allongement physiologique et/ou de sa fonction

## Diminution de l'utilisation du muscle

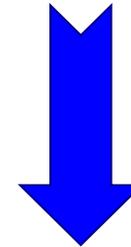


Ténotomies



Diminution ou abolition gravité terrestre

Vol en apesanteur (ISS) , « bed rest », microgravité simulée



Immobilisation