



UE : 20 Système Neurosensoriel et psychiatrie

ENSEIGNANT : Pr. Metges

DATE : 02/09/2024

GROUPE : Anne janody, Duane Abaziou, Clémentine Miossec

REMARQUES : bonne rentrée ;)

Neurophysiologie de la motricité (part 1)

Table des matières

I. Organisation générale de la motricité	3
II. Premier étage : réflexe ou segmentaire (niveau le plus élémentaire)	4
III. L' Unité motrice	5
IV. Étude du recrutement et de la force de contraction des UM	6
V. Types d'unités motrices	8
A. Répartition des fibres nerveuses	9
B. Territoire de l'UM	9
C. Taille de l'UM (très important).....	9
D. Caractéristiques de la secousse unique (contraction unique) d'une UM.....	11
E. Les 3 types d'UM	13
F. Relation vitesse de conduction-temps de contraction	16
G. Relation vitesse de conduction-force téτανique (fréquence de PA élevée)	16
A. Composition du muscle en UM	16
A. Composition.....	16
B. Unité motrice	17
VII. Propriétés motrices des UM	18
A. La force musculaire	18
B. Vitesse de contraction	20
C. Commande motrice.....	21
1) Recrutement par la « taille ».....	21
VIII. Ordre de recrutement chez l'homme	23
A. Études en contraction volontaire	23
B. Stabiliser la force dans le temps	26
C. Fréquence d'activation des UM.....	27
D. Influence des conditions de la contraction sur le recrutement des UM.....	28

E. Mise en jeu des unités motrices.....29

XIV. EMG de surface (global)..... 29

Partie 1 : Neurophysiologie de la motricité

I. Organisation générale de la motricité

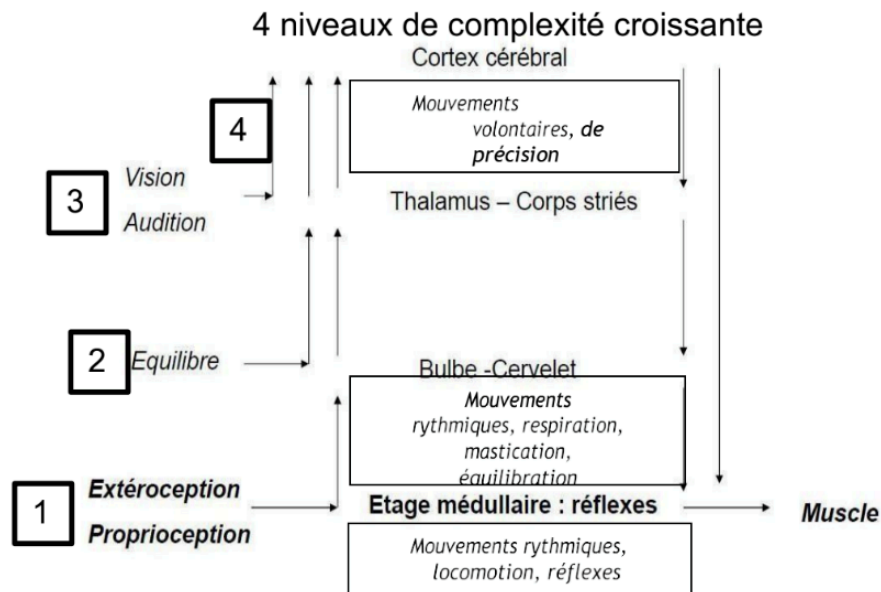
La **neurophysiologie de la motricité** étudie tous les mécanismes de **commande** et de **contrôle** des muscles **striés squelettiques** (environ 600 muscles) qui réalisent l'ensemble des actions (spontanées) exercées par l'individu sur le monde extérieur (c'est l'élément de la vie de relation de l'individu).

Ces actions sont **exclusivement** mises en jeu par le système nerveux (et non spontanément). Sans système nerveux, les muscles striés squelettiques ne fonctionnent pas (conscient ou inconscient).

Les actions de l'individu à un moment donné déterminent son **comportement** : **ensemble très complexe et très bien organisé de contractions musculaires**. Un contrôle est indispensable pour s'adapter à son environnement. L'ensemble de la coordination donnera le complexe moteur.

Chaque comportement moteur s'élabore :

- À partir de la **perception** que le sujet va avoir du monde qui l'entoure (par l'intermédiaire des sens ou de la proprioception). Mais aussi du monde interne (système neuro musculaire, squelettique, articulaire...)
- En fonction de **l'analyse de ces informations** pour saisir la situation, informations qu'il va ensuite intégrer.
- En se confrontant éventuellement à des situations **antérieures mises en mémoire**.
- L'ensemble peut aboutir à la **décision** d'une action. (en fonction de ce qui a été mémorisé)
- Réalisation de l'action par l'effecteur neuromusculaire en passant par un **programme moteur** qu'il faut mettre en forme



ORGANISATION GENERALE DE LA MOTRICITE

→ L'étage supérieur est **l'étage cortical** : on va avoir affaire à l'étage de commande et de contrôle des mouvements volontaires, en particulier les plus fins, les plus aboutis comme les mouvements de précision (ex. : l'écriture).

→ L'étage en-dessous : **l'étage du thalamus** et des **corps striés** avec des informations qui vont venir de la vision et de l'audition.

→ Encore en-dessous de cet étage, on va avoir **l'étage bulbo-cérébelleux** (*le bulbe est dans le même axe mais le cervelet est en dérivation*) qui lui va intégrer les mouvements rythmiques et tous les mouvements de type respiratoire, mastication, (en fait les mouvements automatiques), d'équilibre en recevant des informations de l'extérieur ou de l'intérieur. Cependant nous pouvons réaliser aussi ces mouvements de manières volontaires (hyperventilation, soupir...)

→ En bas on aura l'étage le plus périphérique et élémentaire : **l'étage médullaire** (nous sommes toujours dans le SNC mais ce dernier établit un lien avec le SNP) qui va essentiellement s'occuper des éléments rythmiques de la locomotion, en particulier de certains réflexes médullaires moteur à partir d'informations extéroceptives (vision, audition) ou proprioceptives donc soit intérieures à l'individu soit extérieures à l'individu (environnement immédiat du sujet).

On reste dans ce cours à l'étage médullaire

II. Premier étage : réflexe ou segmentaire (niveau le plus élémentaire)

Une seule sortie possible pour un comportement moteur : l'effecteur neuromusculaire (muscle strié squelettique) → Ce système est utilisé par **toutes les commandes motrices**, des plus simples aux plus élaborées (motricité volontaire) : **VOIE FINALE COMMUNE**. Cette voie finale démarre au niveau segmentaire.

- **Informations extéroceptives** : vont permettre de percevoir l'environnement mais elles sont limitées au **contact direct** de l'individu avec l'extérieur (toucher, tact en particulier, pas vision ni audition).

A partir de ces infos l'individu va élaborer des **réflexes extéroceptifs** qui sont des mécanismes élémentaires de programmation motrice (pas soumis à la volonté) et permet de faire face à des situations élémentaires stéréotypées. Pas ou très peu de modulation de la réponse.

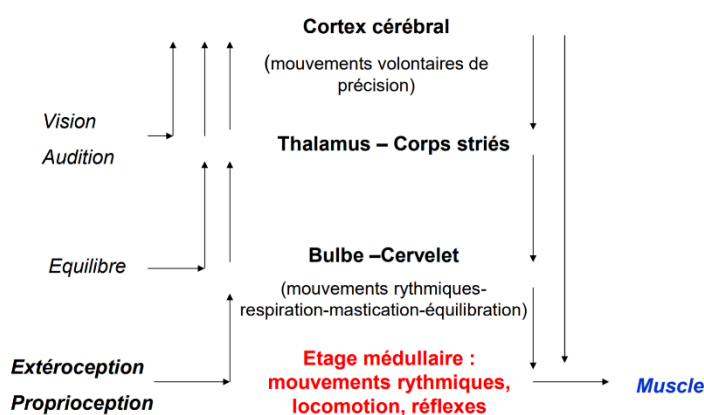
- **Informations proprioceptives** : majeures, ce sont des informations propres à la **sensibilité interne** de l'appareil musculo-squelettique, très utiles pour suivre et adapter l'exécution des programmes moteurs.

Elles permettent à l'individu d'adapter en permanence son mouvement à ce qu'il reçoit comme information. (ex : se situer dans l'espace, adapter sa contraction musculaire , etc.). Sous tendu par ces informations, on a des **réflexes proprioceptifs** : réflexes expérimentaux qui empruntent des circuits d'interneurones médullaires également utilisés pour assister les programmations motrices supérieures. (Point de départ : sensibilité interne)

Attention ! Les réflexes sont bien involontaires mais ça ne signifie pas forcément inconscient.

ORGANISATION GENERALE DE LA MOTRICITE

Quatre niveaux de complexité croissante



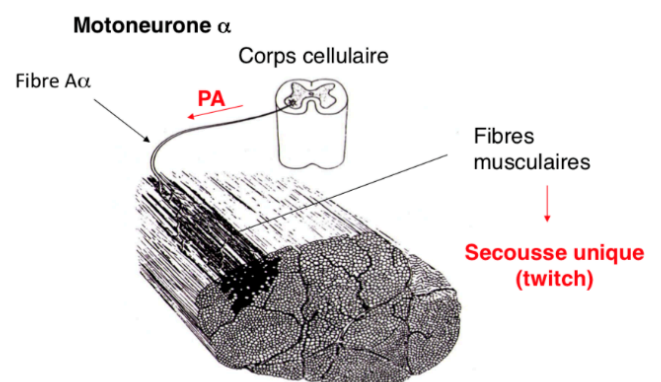
III. L' Unité motrice

L'unité motrice est le **plus petit élément fonctionnel du muscle strié squelettique**. L'ensemble des fibres musculaires innervées par le même motoneurone est appelé unité motrice. C'est le niveau d'organisation le plus bas, le plus périphérique. C'est un effecteur neuromusculaire.

Elle est constituée de 3 éléments :

- L'élément central est le **corps cellulaire** du motoneurone (dans la corne antérieure de la Moelle épinière)
- L'**axone** (fibre a-alpha) émis par ce motoneurone
- Toutes les fibres musculaires (**rhabdomyocytes**) qui sont innervées par ce seul motoneurone. **Le nombre de fibres musculaires innervées est variable en fonction du motoneurone**

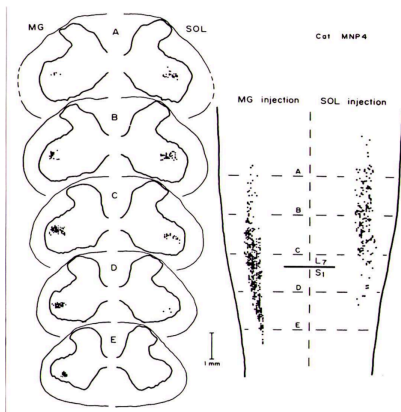
L'unité motrice



La contraction est appelée **secousse musculaire unique** : un **PA (potentiel d'action)** = une réponse (ou twitch). Le PA se propage de proche en proche et va permettre la **contraction simultanée unique et maximale** de l'ensemble des fibres musculaires constitutives de l'UM. 1 PA = 1 contraction de l'unité motrice et donc les fibres associées se contractent **ensemble et une seule fois**. Elles ne sont pas toutes situées les unes à côté des autres car le nerf envoie tous ses axones à l'intérieur et ensuite ils se dispersent dans le corps musculaire. Un muscle a plusieurs motoneurones pour innerver la totalité de son corps.

Ce système d'UM a été décrit par Sherrington.

Noyaux moteurs



Tous les noyaux moteurs d'un même muscle ne sont donc pas situés dans le même segment de moelle ****

Lorsque l'on colore pour localiser les corps des motoneurones on se rend compte qu'ils sont étalés dans différents étages de la moelle (dans différents métamères). Chaque muscle comprend donc plusieurs racines.

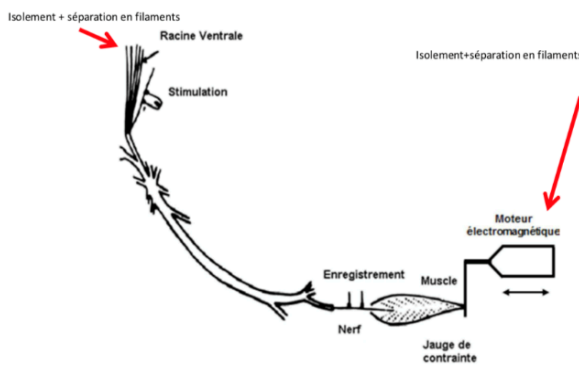
Pq : les corps cellulaires des motoneurones sont colorés de manière argentine

L'ensemble des corps cellulaires des MN 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.

IV. Étude du recrutement et de la force de contraction des UM

Etude du recrutement

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



Le but est d'isoler de manière **fonctionnelle** et non anatomique d'un axone dans un filament de racine ventrale (motrices) à partir de la moelle et qui vont jusqu'au muscles que l'on souhaite étudier. On va donc dénervé toute la patte sauf le muscle qui nous intéresse.

Exemple : on veut le soléaire, on dénervé tout sauf le muscle soléaire = isolement d'un axone dans la racine ventrale de la moelle.

Explication de la technique : Quand on veut étudier des UM, on a recours à la technique suivante : on va attacher le tendon distal du muscle étudié et on va placer une jauge de contrainte (pour mesurer la force de contraction). On peut ajouter un moteur qui peut faire varier la longueur du muscle afin de simuler un mouvement (étirement, rétrécissement). En même temps, on isole le nerf de ce muscle. On enlève tout lien entre cortex et moelle pour être sûr que c'est bien le nerf qui agit.

A l'autre extrémité (au niveau rachidien), on va disséquer les racines ventrales (motrices) en petits filaments, puis les stimuler pour voir ce qu'il se passe au niveau du muscle. A force de séparer les filaments au niveau de la racine, on peut isoler de façon fonctionnelle, dans chaque filament, un seul motoneurone pour le muscle que l'on est en train d'étudier. On va tester chacun des filaments obtenus, **le but étant d'isoler les unités motrices** une par une.

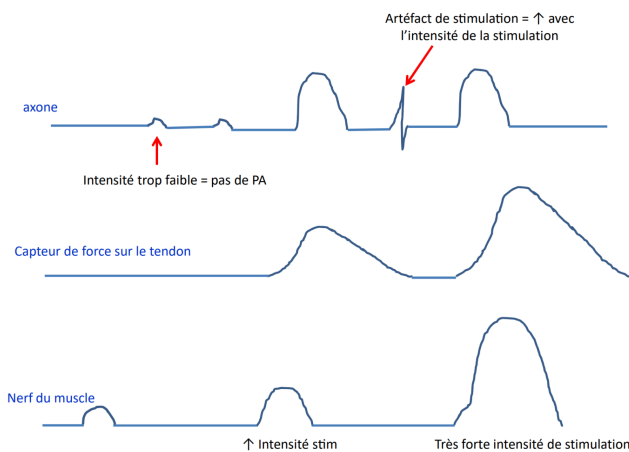
On enregistre au niveau du tendon distal et on met des électrodes sur le nerf de ce muscle et quand on stimule une unité motrice, on obtient une force de contraction.

Note : Quand l'intensité est faible, il n'y a pas de contraction (car on est en dessous du seuil d'excitabilité).

On veut obtenir l'UM avec une réponse en tout ou rien en stimulation. Plus on augmente la stimulation, plus le nombre d'UM augmente. S'il y a un changement de forme = nombre d'UM stimulé augmenté.

Graphique qui montre l'évolution de la tension au niveau de l'UM en fonction du temps ainsi que du nombre de stimulations.

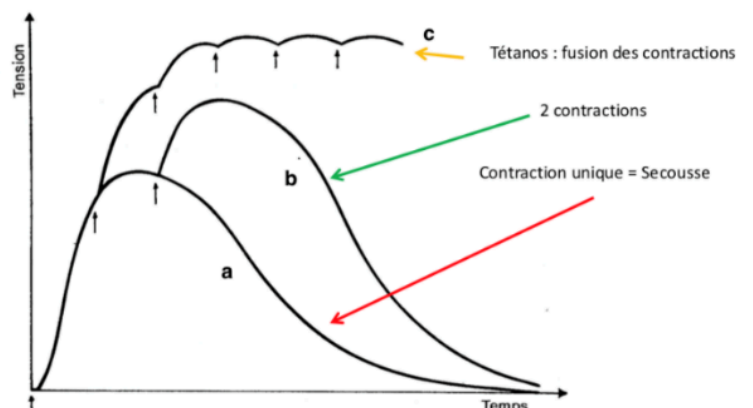
Etude du recrutement



Quand on stimule avec un PA = twitch (montée, maximum, relaxation progressive)

Si plusieurs PA rapprochés : deux-trois-quatre contractions : + on augmente la fréquence des PA, plus l'intensité de contraction augmente = + de force) = sommation des contractions et fusion des secousses au bout d'un moment : tétanos.

Force de contraction des UM



IL Y A PLUSIEURS MOTONEURONES

- L'unité motrice se contracte de **façon unique et maximale** quand on envoie une stimulation (a)
- Lorsqu'on envoie une seconde stimulation rapprochée, on obtient une contraction plus forte encore. Ainsi lorsque l'on envoie des PA successifs, avec un intervalle de temps entre chaque PA de plus en plus raccourci (donc avec une fréquence de plus en plus élevée), on va arriver à une fusion des contractions : **sommation des contractions** (b)
- Lorsqu'on arrive à une fréquence suffisante (qui dépend du type de muscle et de l'UM), on va obtenir ce qu'on appelle un **tétanos** (non fusionné au départ) qui va fusionner par la suite, selon la fréquence des PA (stimulations)(c).

Rq : L'unité motrice fonctionne comme le muscle dans sa totalité.

V. Types d'unités motrices

Il existe plusieurs types d'unités motrices au sein d'un même muscle. Elles ont été classées.

Il y a une correspondance entre différents paramètres :

- **Taille de l'UM** (**nombre de fibres musculaires qui sont contenues dans une unité motrice**)
- **Caractéristiques** de son **motoneurone** (taille du diamètre du MN, seuil d'excitabilité etc...)
- **Caractéristiques** des **fibres musculaires qui composent l'UM**

Pour déterminer la taille de l'UM, on peut se servir de :

- La **vitesse** de conduction de l'axone de l'UM (proportionnel au diamètre de l'axone, plus le diamètre est grand plus la vitesse des PA est élevée) □ les a-alpha sont dans les catégories qui émettent le plus rapidement
- La **taille du corps cellulaire** du motoneurone qui conditionne son seuil d'excitabilité.
- Le **temps** de contraction de l'UM.
- La **force** développée par l'UM.

Classification des FN sensibles musculaires :

	I	II	III	IV ou C
Type	myélinisé	myélinisé	myélinisé	Amyélinisé
Vitesse en m/s	110 à 70	70 à 30	30 à 12	1 à 0.5
récepteur	Fibres Ia : terminaisons fusoriales primaires - longueur et vitesse d'allongement -fibres Ib:organesGolgi force	Terminaisons fusoriales secondaires (longueur) Récepteurs encapsulés (pression, vibrations)	Terminaisons libres (pression)	Terminaisons libres (douleurs)

NB : organes tendineux de Golgi pour les vitesses les plus élevées. Les plus petites fibres avec les vitesses les plus faibles pour la douleur.

A. Répartition des fibres nerveuses

Classification **d'ERLANGER et GASSER** (idem)

groupe	exemple de fonction	Diamètre moyen (μm)	Vitesse moyenne (m.s-1)
A α	Afférences primaires des fuseaux NM	15	100
A β	Motoneurones α des muscles squelettiques	8	50
A γ	Aff. des mécanorécepteurs cutanés et pression / Aff. des récepteurs cutanés à la température et douleur	5	20
A δ	Motoneurones γ des FNM	3	15
B	Fibres efférentes sympathiques pré-ganglionnaires (SNA)	3	7
C	Aff. des récepteurs cutanés à la douleur Fibres efférentes sympathiques post-ganglionnaires (amyéliniques)	0,5	1

Petit rappel de PASS : plus le diamètre est grand, plus la vitesse est élevée.

B. Territoire de l'UM

L'axone d'un motoneurone α , avant son entrée dans le muscle, se **ramifie** en plusieurs filaments. Chaque filament va innover **UNE** seule fibre musculaire à l'intérieur du muscle : **territoire de l'UM**.

Etude des territoires de UM chez l'animal : Technique de **déplétion glyco-génique**. Cette technique a pour principe de stimuler à outrance une UM particulière pour que les fibres concernées aient consommées la totalité de leurs réserves de glycogènes. Dans un second temps, un marquage du glycogène est fait par le PAS (periodic acid Schiff). Les fibres sans glycogènes sont donc repérées.

On s'est alors rendu compte que **les cellules de l'UM ne sont pas les unes à côté des autres (non contiguës)**, elles **sont dispersées dans le muscle**. Cela va permettre d'avoir une contraction plus harmonieuse du muscle.

Chez l'homme cette technique n'est pas applicable mais le volume musculaire occupé par une UM est inférieur à celui d'une UM animal.

PS : les UM les plus rapide ont tendance à avoir un territoire plus large

C. Taille de l'UM (très important)

(Notion importante car cela conditionne plusieurs paramètres qui seront utilisés par le SN)

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

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	
Lombrireaux	95	10 300	108	19
Biceps brachial	774	580 000	750	50
Gastrocnémien médian	579	1 000 000	1730	54

Fondamentalement, on s'aperçoit qu'il y a des muscles qui contiennent :

- Des unités motrices de très petites tailles c-à-d des unités motrices qui contiennent **très peu de fibres musculaires** : cela veut dire qu'un motoneurone va innover 4,5,10 fibres musculaires (petite UM)
- Des unités motrices qui vont être très volumineuses et qui vont avoir un motoneurone pour des centaines de fibres musculaires.

Cela veut dire qu'un motoneurone va se diviser et que les arborisations terminales de ce motoneurone vont se diviser sur plusieurs dizaines voire centaines de fibres musculaires.

Donc le nombre de fibres musculaires par unité motrice va définir la taille de l'unité motrice. On a :

- Des muscles où les UM sont très petites (ex : oculomoteur) : mouvement de précision mais peu de force.
- Des muscles qui vont avoir de très grosses unités motrices jusqu'à 2000 cellules par unité motrice (ex. : les fessiers) → mouvements moins précis mais avec beaucoup de force

Résumé : Selon les muscles, le nombre et la taille des UM varient beaucoup. Le nombre de fibres par UM, la taille de chaque fibre, et le nombre d'UM varient (**3 paramètres**). Ces paramètres vont conditionner la force et la précision du muscle.

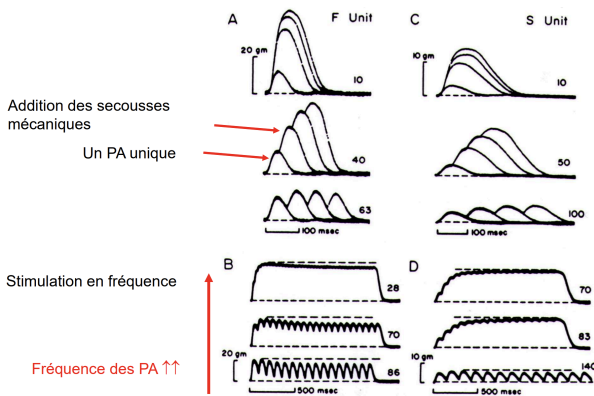
Précision = nombre UM augmente mais nombre fibre musculaire par UM diminue

Ex : Petits muscles (oculomoteurs) = - de fibres par UM mais + d'UM = plus de précision (on gradue la force plus facilement)

Grand muscle = + de fibres par UM mais - d'UM = moins de précision

Mesure de la force de contraction des UM :

Lorsque l'on envoie un seul potentiel d'action au niveau des unités motrices : il y a contraction unique avec une certaine force.



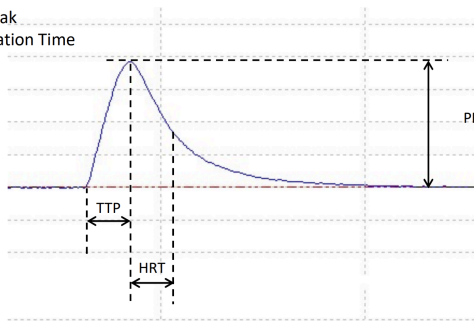
Lorsque l'on envoie un deuxième potentiel d'action, de telle manière à ce qu'il arrive sur la fibre musculaire avant que la fibre soit complètement relaxée, on obtient une deuxième contraction qui, ajoutée à la première, entraîne une augmentation de la force alors que normalement, on est censé avoir la force maximale à la première contraction.

Comment est-ce possible ? Le muscle étant une structure hétérogène et complexe, ce dernier présente une élasticité (et viscoélasticité).

Nous avons observé qu'il y a des comportements différents selon les UM. Pour une même fréquence de contraction nous n'allons pas observer les mêmes oscillations ou la même force pour toutes les UM. Certaines vont être tétonnées pour des fréquences basses alors que d'autres nécessitent des fréquences plus élevées. Les UM ne se contractent pas pour les mêmes fréquences et ne développent pas les mêmes forces.

D. Caractéristiques de la secousse unique (contraction unique) d'une UM

- TTP = Time To Peak
- HRT = Half Relaxation Time
- PF = Peak force



Peu importe que l'on soit dans une UM, dans une fibre musculaire, dans un muscle, la contraction aura toujours cette forme avec un temps de montée en force qui est plus bref que le temps de relaxation. Ce graphique nous montre 3 paramètres cinétiques importants :

- **TTP** (time to peak) : Temps nécessaire pour atteindre la force maximale (peak) (rapide)
- **HRT** (half relaxation time) : temps de demi-relaxation, pour perdre la moitié de la force (lent)
- **PF** (peak force) : Force maximale sur une seule contraction, on ne tient pas compte des sommations.

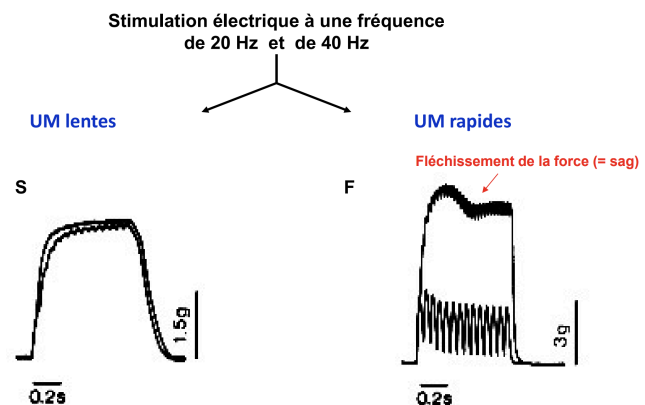
Tous les muscles n'ont pas les mêmes temps d'excitation.

Le temps de contraction et le temps de relaxation vont conditionner la possibilité pour l'unité de tétonner.

Les paramètres cinétiques (un de force et deux de temps) de la contraction unique influent sur la fréquence d'activation des UM. Chaque type d'UM a des paramètres de contraction qui leur sont propres pour une fréquence de PA égale.

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). Il y a fusion si la 2ème stimulation arrive avant la fin de la relaxation.

La comparaison des 3 paramètres cinétique des UM lentes par rapport à ceux des UM rapides nous montre qu'il y a plusieurs comportements en fonction des tailles d'UM certaines fatiguent (apparition d'un téтанos fusionné) et d'autres pas. → On a là un autre état qui s'ajoute : **la notion de fatigabilité.**



Plusieurs type d'UM :

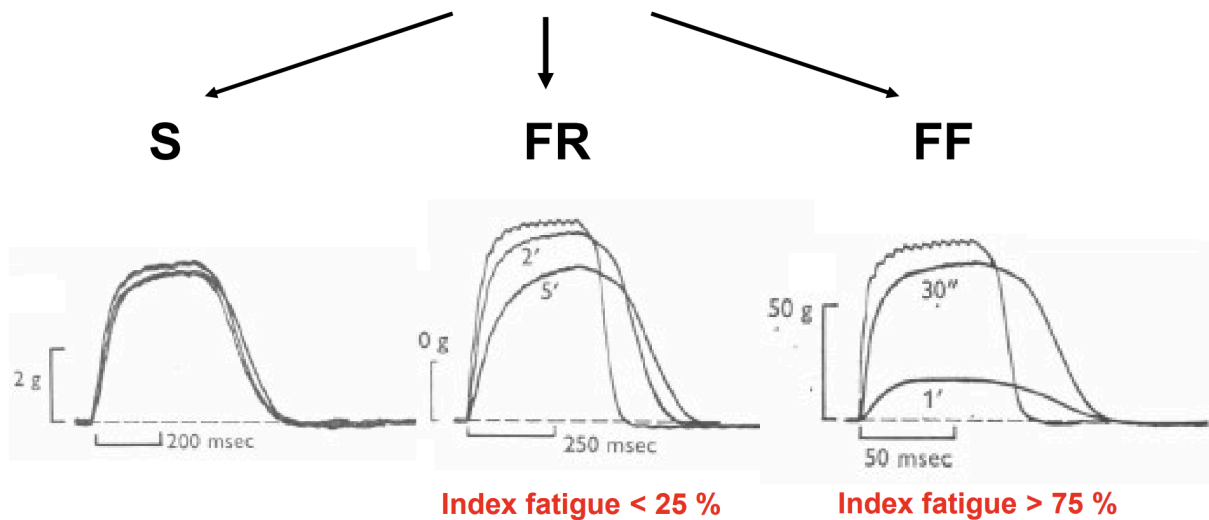
- **Unité motrice lente (slow):** que l'on stimule à 20Hz ou 40Hz c'est pareil, à 20 Hz elle est en contraction maximale à 40 Hz on n'obtient rien de plus. La **force est très faible** (car fibres très petites) et on obtient un **tétanos à faible fréquence**. Elles ne sont **pas fatigables**.
- **Unités motrices rapides (fast) :** Grande différence de force entre 20Hz et 40 Hz. La **force est plus importante** que celle de l'unité motrice lente. Elles possèdent des vitesses de contraction rapides, des vitesses de relaxation élevées, une capacité à entrer **en téтанos pour les fréquences** très élevées. Mais **une fatigabilité** qui apparaît au cours de la stimulation. La fatigue correspond à une diminution de la force malgré une stimulation constante.

Quand on va plus loin on a 2 types d'UM rapides (+++). Elles se contractent plus fort mais moins longtemps :

- **UM rapides résistantes à la fatigue, endurantes (FR = fast résistant) :** Se fatiguent au bout de 2min mais elles ont beaucoup plus de force que S. (index de fatigue <25%)
- **UM rapides qui se fatiguent vite (FF= fast fatigue) :** Au bout de 30 secondes elle a perdu beaucoup de sa force et au bout d'une minute il n'y a presque plus rien. Index de fatigue >75%. Elles se distinguent donc des précédentes par leur index de fatigue.

On a donc 3 catégories de fibres.

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)



Rq : L'index de fatigue représente la perte de force entre le début et la fin de la stimulation.

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.

E. Les 3 types d'UM

L'UM va pouvoir être classée selon **différentes caractéristiques** :

- La **taille** : le nombre de divisions terminales de l'axone du motoneurone α , donc de fibres musculaires
- Les **propriétés fonctionnelles** : la dimension du corps cellulaire et le diamètre de l'axone (donc sa vitesse de conduction) du motoneurone

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 : taille de l'UM	faible	moyen	élevé

Nous allons décrire ces caractéristiques pour chacun des types d'UM :

1. Lentes :

- Vitesse de contraction et de relaxation basse (elles se contractent lentement et se décontractent aussi lentement).
- Petite force car les motoneurones ont des corps cellulaires plus petits et des axones de petits diamètre également. De plus, elles possèdent peu de cellules, ce qui explique également la faible force car elle est liée à la quantité de fibres musculaires qui se contractent.

2. Rapides

- Une vitesse de contraction rapide et une vitesse de relaxation qui est haute
- Une grande force car : Les corps cellulaires des motoneurones sont les plus grands. Et les axones sont de diamètres plus importants. De plus ce sont des UM de grande taille, ce sont celles qui contiennent le plus de cellules (fibres musculaires).

Finalement tout est lié : la vitesse de conduction, les potentiels d'action sur le motoneurone. Cela signifie que l'on caractérise les UM selon :

- Leur propriétés fonctionnelles,
- Leur vitesse de contraction,
- Leur capacité à fusionner ou non,
- Leur maintien de la force au cours de la stimulation (fatigable, non fatigable ; très forte, pas très forte)

Les fibres d'une même UM sont toutes du même type histologique. Quand on entend même type histologique c'est-à-dire qu'elles vont toutes avoir :

- **La même composition enzymatique :** ATPase myofibrillaire : I (faible activité), IIA (plus colorées) et IIB (forte activité) ⇒ Très présente dans les UM rapides ou les enzymes de la glycolyse (LDH, phosphorylase) caractérisant les plus rapides ou les enzymes du métabolisme oxydatif (SDH, NADH déshydrogénase de la chaîne respiratoire) ⇒ Caractérisant les plus lentes, **aérobies**.
- **Les mêmes chaînes lourdes de myosine :** 4 type d'isoformes dans les fibres des muscles striés squelettiques des mammifères : Formes adulte : I-slow- β , IIA, IIB, IIX
Isoformes développementales : embryonnaire, néonatale et l'isoforme I slow- α exprimée également dans des muscles spécifiques comme les muscles extrinsèques de l'œil, de la mandibule et le muscle cardiaque (Schiaffino & Reggiani, 1994) Mais normalement on ne les retrouve pas chez l'adulte sauf en cas de cas de dégénérescence.

Si on regarde les types de fibres :

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

- Les lentes (SO= slow oxydative) sont de type I-slow-b = **métabolisme oxydatif**
- Les résistantes à la fatigue (FR) sont de type IIA = **Fast Oxydative Glycolytic**
- Les FF sont de type IIB = fast glycolytic ⇒ **utilisation de glycogène**. (Quand il n'y en a plus, on fatigue !) → **glycolyse anaérobie**.

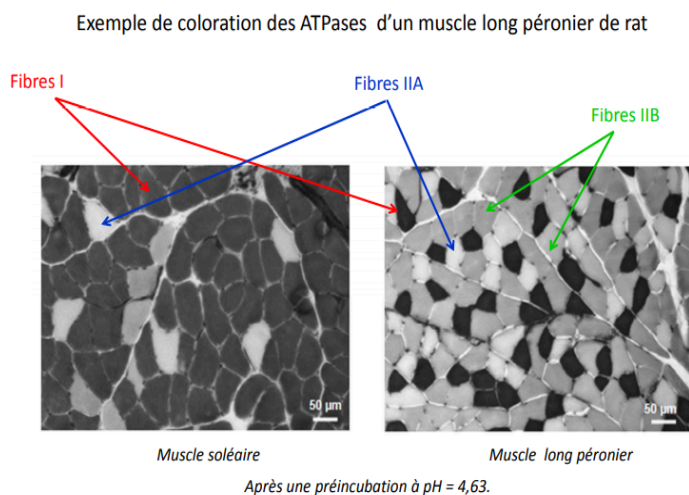
La force musculaire est essentiellement liée à la **composition de la chaîne de myosine** tandis que les **caractéristiques du métabolisme** ont un rôle sur la **fatigabilité**. (En réalité ce n'est pas si simple mais nous devons retenir les 3 types de manière stéréotypées).

Polymorphisme des fibres musculaires/fibres « hybrides »

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. On considère que les **fibres hybrides** ne sont pas majoritaires, et qu'une UM possède un métabolisme particulier. (Même si c'est plus complexe en réalité). Cet index de polymorphisme varie selon les muscles.

exemples : 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.

Une fibre musculaire peut exprimer différents types de CLM (chaînes longues de myosine) → **fibres "hybrides"**. Lorsqu'on prend en compte les fibres exprimant une seule isoforme de MHC.



Exemples : le muscle soléaire du rat est un muscle à prédominance antigravitaire. Il contient essentiellement des fibres musculaires lentes (en noir sur l'image). Tandis que dans le muscle long péronier (stabilisateur de la cheville) on remarque une majorité de cellules plus claires (chargées en ATPase), il s'agit donc d'un muscle rapide. Dans le muscle long péronier chez le rat (peroneus longus) (nous avons retrouvé 12

fibres sur les 35 types qui expriment plus de 5% d'une seconde isoforme de MHC → index de polymorphisme d'environ 33% dans le PL.). **Cet index de polymorphisme varie selon les muscles intra-espèce et inter-espèces.**

(fibres chargées en ATPase → fibres claires)

Ces différentes isoformes s'expliquent par la **plasticité** du muscle et permettent le continuum du muscle. Il y a une différence de répartition des différentes fibres au sein du muscle, selon le type de muscle.

Rappel : une unité motrice est caractérisée par sa taille, ses propriétés de conduction, son activité enzymatique et ses chaînes de myosine.

F. Relation vitesse de conduction-temps de contraction

La relation entre la vitesse de conduction et le temps de contraction est **linéaire**. En effet, plus la vitesse de conduction est élevée, plus le temps de contraction de la secousse est court. Nous savons que plus le diamètre augmente plus la vitesse augmente et donc plus le temps de contraction est court. Un temps de contraction court explique le fait que **la fréquence pour atteindre le téтанos est élevé !**

Montré chez le chat : Bessou et al. (1963) ont montré sur le 1er lombrical 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.

G. Relation vitesse de conduction-force téтанique (fréquence de PA élevée)

La relation entre la vitesse de conduction et la force téтанique est **exponentielle**, il existe des variations individuelles.

Rappel : Force téтанique = avoir une contraction stable.

Il existe également une corrélation entre cette vitesse de conduction axonale et la force téтанique développée par l'UM correspondante. Plus les PA vont vite plus la force est importante. Il existe des variations individuelles.

A. Composition du muscle en UM

A. Composition

Chaque muscle de mammifère contient les trois types d'UM (=muscle MIXTE): mais les proportions sont relatives entre ces types et varient selon la **fonction mécanique du muscle dans le squelette**. Tous les mammifères ont des muscles composites.

Chez les mammifères, un muscle entier, même sélectionné en fonction de ses propriétés mécaniques "lentes" ou "rapides" (selon son rôle dans l'organisme), exprime **toujours un mélange de différents types de fibres**.

Chez certaines espèces, on retrouve des muscles totalement homogènes avec 1 seul type de cellules. Comme chez le poulet ailes blanches (muscles rapides), cuisses rouges (muscles lents)

- Muscle postural dans la marche (soléaire) : surtout des unités S et FR **force modérée** pendant des temps longs.

- Muscle impliqués dans la course (gastrocnémiens ou jumeaux) : 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, apesanteur)

Le muscle aura une fonction orientée par rapport à sa teneur en fibres :

- « lentes » → maintien de la posture
- « rapide » → flexion / extension

Ex chez l'homme

- **Muscle antigravitaire** ou **postural** dans la marche (**soléaire**) : **surtout unités S et FR +++ => force modérée** pendant des temps longs.

(*Rappel : Fonctionnement **oxydatif**. Résistantes à la fatigue*)

- **Muscles pour la course et le saut** (**gastrocnémiens ou jumeaux**) : **unités FR et FF +++ => force + puissance importantes** pendant des temps brefs.

(*Rappel : Fonctionnement **glycolytique**= Temps bref pour des actions rapides.*)

Par exemple quadriceps = 4 chefs = 4 rôles différents, donc fibres musculaires prédominantes différentes.

- **Le phénotype musculaire est défini par son INNERVATION ⇒ C'est le nerf qui impose la typologie du muscle.** (Si on dénerve le muscle de manière expérimentale ⇒ On modifie la composition et le fonctionnement (phénotype) du muscle).
- Mais les expériences motrices peuvent amener le muscle à se modifier et avoir une influence sur la typologie du muscle. **Le muscle a une certaine plasticité** (capacités de contractions et propriétés mécaniques).

Par exemple :

- L'entraînement va modifier la composition du muscle et donc ses capacités de contraction : la répartition en fibres n'est pas la même (sprinter vs marathonien)
- L'apesanteur entraîne de grandes modifications des muscles : diminution de la sollicitation de ces derniers avec l'absence de gravité terrestre (les astronautes font de l'exercice régulièrement pour éviter une sarcopénie, une ostéoporose et un ostéo-rachitisme)

B. Unité motrice

Plus on a de fibres par UM, moins le muscle est précis.

Le **nombre de fibres musculaires/UM** dépend :

- Du **type de fibres** musculaires
- Du **type de muscles** (quelques dizaines à 30000)

→ En général, les unités motrices S (slow) ont moins de fibres musculaires que les unités rapides FF

Le nombre d'UM/muscle varie de :

- Quelques dizaines pour les petits muscles
- À plusieurs milliers pour les gros muscles

Le type de fibres musculaires est le même pour toutes les cellules de l'UM (*ne pas retenir*):

- Unité motrice S ⇒ Fibres de type I
- Unité motrice FR ⇒ Fibres de type IIa
- Unité motrice FF ⇒ Fibres de type IIx (anciennement IIb)

Distribution du type de fibres en fonction de l'espèce animale

Muscle	Human	Rat	Guinea pig	Cat
Lateral gastrocnemius				
% type I	50-64	28	12	18
% type II	40-52	72	88	82
Soleus				
% type I	70-90	96	100	100
% type II	10-30	4	-	-
Tibialis anterior				
% type I	55-65	2	4	19
% type II	35-45	98	96	81
Vastus lateralis				
% type I	40-50	9	-	27
% type II	50-60	91	100	73

Muscle	Human	Rat	Guinea pig	Cat
Lateral gastrocnemius				
% type I	50-64	28	12	18
% type II	40-52	72	88	82
Soleus				
% type I	70-90	96	100	100
% type II	10-30	4	-	-
Tibialis anterior				
% type I	55-65	2	4	19
% type II	35-45	98	96	81
Vastus lateralis				
% type I	40-50	9	-	27
% type II	50-60	91	100	73

Rappel : Les muscles sont tous mixtes et tous constitués d'un mélange de ces UM. Il existe des différences à l'intérieur d'un même individu entre différents muscles. → Le diamètre des fibres d'un même type peut différer d'un muscle à l'autre au sein de la même espèce.

Il y a également des différences inter-espèces. NB : Il peut y avoir des différences entre les mammifères malgré le fait que les muscles se trouvent à la même place dans le squelette.

Exemple : Le Tibia antérieur est le muscle permettant de relever le pied et donc de marcher. Chez l'homme, on trouve environ 60% de fibres I et 40% de fibres II. En revanche, chez le rat, on trouve 2% de fibres I et 98% de fibres II (donc complètement rapides). Alors qu'entre les 2 espèces le muscle a la même position dans le squelette et la même innervation.

Mais chez le mammifère chaque UM a des fibres mélangées, aucun muscle n'est constitué uniquement du même type de fibre.

VII. Propriétés motrices des UM

A. La force musculaire

C'est un des paramètres mécaniques de l'UM, pas le seul.

La force dépend de plusieurs paramètres, le premier étant le type de myosine présent dans les fibres. Les caractéristiques des contractions dépendent des chaînes de myosine. Cela permet de caractériser la force et le mouvement.

Chaîne lourde de myosine (MHC= myosin heavy chain) :

- MHC I = fibres lentes => unité S, force faible
- MHC IIa = fibres rapides => unités rapides FR, force intermédiaire
- MHC IIx = fibres rapides => unités rapides FF, force importante
- MHC IIb => n'existe pas chez l'homme. Existe chez les petits rongeurs.

NB : Les unités motrices S ont moins de fibres que les unités FR, qui en ont elles-mêmes moins que les unités FF.

La composition en MHC varie avec :

- **L'entraînement** : fait varier les proportions (phénotype) dans un sens ou dans l'autre suivant le type d'entraînement : **Endurance I ↔ IIa ↔ IIx ↔ IIb**. Le muscle est donc capable de modifier son type de protéines contractiles. Le passage de fibres lentes à rapides est plus facile : on trouve des fibres IIax (rapides). Les caractéristiques de contraction dépendent des **proportions relatives des différents types de MHC**.

Exemple : un marathonien et un lanceur de javelot ne vont pas avoir le même type de fibres. Le marathonien s'entraîne sur de l'aérobie longue durée qui va transformer ses quadriceps vers un profil lent, tandis que le lanceur de javelot va beaucoup plus vite donc nécessite de la vitesse et de l'explosivité. **L'expérience motrice modifie la composition du muscle.**

- **L'immobilisation** = perte de muscle. Cela fait toujours passer du type lent au type rapide.
- **Le vieillissement** : perte physiologique et progressive de fibres musculaires (d'abord des fibres rapides utiles pour les mouvements balistiques). C'est pourquoi on est moins enclin à effectuer des mouvements rapides lorsque l'on vieillit.

NB : **Sarcopénie = perte physiologique de muscles.**

On pourra avoir des UM de type intermédiaire : entre S et FR et entre FR et FF.

La force musculaire dépend :

- **Type de fibres (nature de la myosine)**
- **Nombre de fibres musculaires(cellules)/UM**
- **Fréquence d'activation de l'UM** (+ elle augmente, + la force de contraction est grande)

Plus le muscle est gros, plus les cellules sont grosses.

La force d'une UM est corrélée à sa composition. Si on mesure la force maximale développée par la stimulation des fibres I ou II seules :

Forces fibres I < force fibres IIa < force fibre IIb

Ces forces maximales sont appelées **forces spécifiques de la fibre musculaire**.

Les unités motrices S ont moins de fibres musculaires que les unités FR qui ont aussi moins de fibres que les unités FF.

→ Pour une **même fréquence d'activation**, la force développée est **différente en fonction des UM** : force développée par les **unités S < force unités FR < force unités FF** (attention : à l'intérieur d'un même muscle, on n'a pas les mêmes forces dans le muscle quadriceps ou le muscle oculaire).

B. Vitesse de contraction

Lorsque l'on mesure le temps de contraction, on est sur une contraction **ISOTONIQUE** (mouvement mais force développée constante) → On étudie la vitesse de raccourcissement du muscle.

Plus les unités motrices sont de **types rapides**, plus la vitesse de contraction est **rapide**.

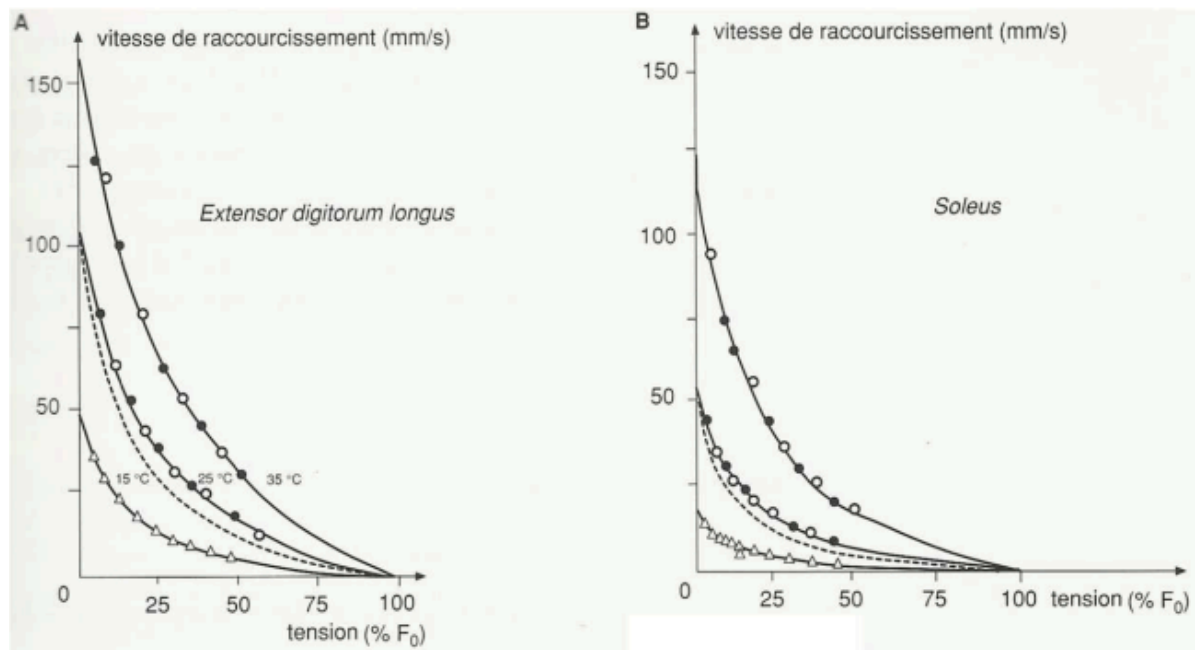
Relation entre vitesse contraction et charge développée:

- 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. Ajustement sur cette relation de l'équation de HILL. Même forme quel que soit le type de muscle.

Pour mesurer une vitesse, il faut que le muscle puisse se déplacer (se raccourcir). On calcule le temps de contraction isotonique et on s'aperçoit que cette vitesse de contraction dépend :

- Du **muscle** (de sa composition),
- De la **relation force/vitesse**,
- Mais aussi de la **température** (vitesse de contraction augmente lorsque la température augmente)

Relation entre vitesse de contraction et charge développée :



Si on regarde la vitesse de contraction suivant le muscle (chez l'animal) : La relation force/vitesse est toujours de la même forme mais pas au même niveau. Pour une même charge, la vitesse dans l'extenseur est beaucoup plus importante. Comme pour la force :

Vitesse de contraction unités FF (puissance +++) > vitesse unités FR > vitesse unités S (puissance --).

Résumé : La relation force/vitesse est constante et est corrélée au type d'UM. La **vitesse de raccourcissement** dépend de :

-la **composition des UM**

- la **température** (vitesse de contraction diminue avec le froid, 37°C est la température optimale). Si on augmente la température on augmente la vitesse de contraction, et inversement.

Taille UM	Taille Fibre	Précision	Force
+++	+++	---	+++
---	---	+++	---

C. Commande motrice

1) Recrutement par la « taille »

Le système nerveux contrôle les muscles, les UM. Il va produire de la force et/ou du mouvement pour au final permettre la contraction musculaire.

Pour aboutir à cette contraction musculaire, le muscle va recruter les UM, cela se fait par la taille : par ordre croissant de taille et de manière monotone. Le début se fait par l'unité S, car c'est l'UM avec le seuil d'excitabilité le plus bas. Ce recrutement de manière croissante se fait seulement si la force de contraction augmente.

→ **Le recrutement par la taille dépend des propriétés du motoneurone.**

Le motoneurone reçoit des affluences (sensitives) et produit un potentiel d'action post-synaptique.

Les propriétés membranaires du corps cellulaire du motoneurone déterminent les propriétés du PA :

- Les **MN des unités S** (petits corps cellulaires) ont des PA post-synaptiques **plus grands**
- Les **MN des unités FF** ont **les plus petits** PA post-synaptiques
- Donc quand l'ensemble des MN reçoit les mêmes afférences du SNC/SNP → ce sont pour les MN S que le seuil de déclenchement est atteint en premier
- Ce qui induit la mise en jeu des plus petites UM, c'est-à-dire les unités S

Ordre de recrutement = S FR FF

Comment ce système nerveux commande la contraction, ajuste la force ?

La force n'est pas linéaire, le corps doit réguler la force.

Les UM dans un muscle, en fonction de la demande en force, sont recrutées selon un principe qui s'appelle le principe de la taille.

Recrutement des UM mis en évidence sur l'expérience d'étirement réflexe de la patte: (Henneman et al., 1965) (→ Pas à apprendre, juste pour comprendre)

- 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)

Et ce principe de la taille a été décrit par Henneman il y a déjà quelques années.

Ce recrutement par la taille va permettre au système nerveux central de recruter plus ou moins d'UM pour faire varier la force (puisque l'on a besoin d'adapter la force aux mouvements que l'on veut donner que ce soit en condition dynamique ou en condition statique, isométrique).

Ce système nerveux va commander la contraction en recrutant les UM les unes après les autres pour augmenter la force en fonction de leur taille. Donc le SN va commencer à recruter les UM les plus petites (celles qui dégagent le moins de force) et il va ajouter au fur et à mesure les UM qui ont plus de force, plus de puissance mais qui sont plus fatigables : S/FR/ FF (ordre **croissant de taille**). (force croissante et non constante).

Chez les mammifères, on le retrouve toujours dans cet ordre-là car les **seuils d'excitabilité des UM** dépendent de la **taille du motoneurone** : on commence par recruter les plus petits.

Chez l'homme pour obtenir une force progressivement croissante, **le recrutement des UM se fait dans l'ordre croissant de taille, selon le principe de recrutement par la taille de HENNEMAN.**

Le seuil des UM dépend du niveau de force à partir duquel l'UM apparaît.

Pour obtenir une force progressivement croissante => le muscle recrute les UM selon leur taille.

En commençant par les UM lentes S plus petites (motoneurones les plus excitables), ensuite les UM FR et enfin les FF.

A un instant donné, la force de la contraction dépend du nombre d'UM stimulées.

La force est ajustée :

- En augmentant ou diminuant 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.
- En modulant la fréquence

→ **La force conditionne la précision de la contraction !** (Plus il y a de force, moins il y a de précision.)

Taille = nombre de cellules par UM.

Rappel : Ordre de recrutement : S-FR-FF

Ainsi, plus la force de contraction est grande et plus on va progressivement recruter des FF

- Force développée **faible** → SNC recrutement des **UM** les plus petites

- Force **augmentée** → SNC recrute des **UM** plus grosses

Ex : Les muscles oculomoteurs et des doigts possèdent des petites UM → petit gain de force mais haute précision, composé de petites fibres. A la différence du grand fessier qui possède de grosses UM : force +++ mais précision --- et composé de grosses fibres.

VIII. Ordre de recrutement chez l'homme

A. Études en contraction volontaire

Chez l'homme, on étudie l'ordre de recrutement en contraction volontaire, par l'enregistrement de l'activité **électromyographique** (EMG) à l'aiguille. (micro aiguille implantée à l'intérieur des muscles, **contrairement aux EMG de surface**). Puis, on décompose par informatique le signal obtenu pour différencier les PA selon leur forme, ce qui permet de différencier les UM. La pointe de l'aiguille est influencée par un faible rayon autour de 10 UM.

Les logiciels d'acquisition permettent de décomposer le signal et de différencier les PA selon leur forme -> différencier les UM.

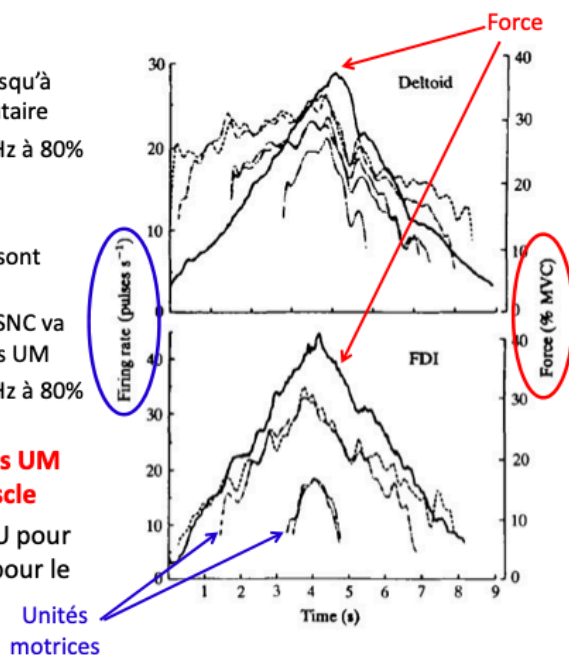
Expérience de De Luca et al :

- Etude **en contraction isométrique volontaire** (but : ne pas faire varier la taille pour faciliter la mesure de la contraction) sur un deltoïde et un 1^{er} IOD (interosseux dorsal) d'un nageur, d'un pianiste, d'un sédentaire et d'un haltérophile
→ Muscle deltoïde (épaule) : muscle « grossier », très sollicité chez le nageur
→ 1 IOD (interosseux dorsal) : muscle très précis de la main, très sollicité chez le pianiste
- On mesure l'intervalle de temps entre 2 PA successifs (de la même UM) et on prend l'inverse, c'est-à-dire **la fréquence instantanée de décharge de l'UM**. → Les UM à seuil bas (fréquences d'activation les plus lentes) sont celles qui démarrent en premier = **unités S**.

Comme précédemment, il remarque aussi que pour la même tâche motrice il y a le même mode de recrutement des UM. Il n'y a donc **pas de différence du seuil de recrutement selon le type d'exercice musculaire (on a partout S-FR-FF)**, par contre il y a bien une différence de recrutement entre muscles.

Chez un individu :

- **Pour le deltoïde:**
 - le recrutement est progressif jusqu'à 80% de la force maximale volontaire
 - fréq = 26 Hz à 40% MVC → 29 Hz à 80% MVC
- **Pour le 1^{er} IOD (petit muscle) :**
 - peu d'UM donc toutes les UM sont recrutées dès 50% de la MVC
 - Pour continuer à ↑ la force, le SNC va jouer sur la fréq d'activation des UM
 - fréq = 25 Hz à 40% MVC → 41 Hz à 80% MVC
 - **Le mode de recrutement des UM dépend de la nature du muscle**
 - le SNC se sert du nombre d'U pour le gros muscle et de la fréq pour le petit muscle



On remarque alors que pour augmenter la force, le SN peut faire 2 choses :

- Il peut **recruter plus d'UM**.
- Il peut agir sur la **fréquence à laquelle chaque UM est stimulée**. Donc augmenter la fréquence des PA des UM.

On remarque que la première UM recrutée est la dernière relâchée et la dernière activée est la première désactivée (théorie de l'oignon).

- On augmentera d'abord la fréquence, puis le nombre d'UM. Après l'arrêt de la stimulation, on diminuera la fréquence puis le nombre d'UM.

Le mode de recrutement dépend du type de muscle utilisé et du type de mouvement. Quand la force augmente, la fréquence aussi.

Le SNC se sert du nombre d'U pour le gros muscle et de la fréquence pour le petit muscle.

Quel que soit le muscle :

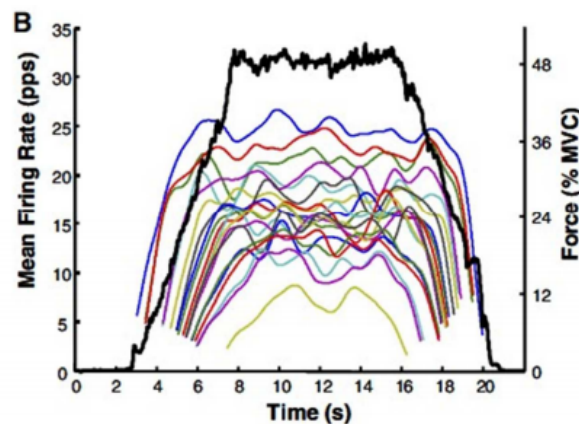
- La première unité contractée est suivie successivement par d'autres lorsque l'on ajoute de la force volontaire.
- Les unités sont recrutées, de la plus faible à la plus forte. Plus on a de force, plus on recrute d'UM pour avoir une force maximale en contraction volontaire.

En fonction des muscles, on observe que **la force augmente grâce aux recrutements progressifs d'UM plutôt que par augmentation de la fréquence d'activation des UM** (comme pour le deltoïde).

En effet le SN préfère ajouter des unités plutôt qu'augmenter la fréquence (les paramètres sont donc modifiables).

→ **Le SN baisse la fréquence et ajoute des UM pour graduer la force. Il joue sur le nombre d'UM.**

Le recrutement initial se fait dans un sens : UM à bas seuil en premier. **Et le sens de relâchement (ordre de « dé recrutement ») est le même, superposable à l'ordre de recrutement.** (car les premières recrutées sont les plus fatiguées donc elles sont vite dérecrutées).



On a vu que les premières UM activées sont les UM les plus faibles, stimulées à des fréquences les plus basses, développant le moins de force. Les dernières recrutées développent le plus de force. Les premières activées développent plus de fréquence (25Hz) que les dernières (8Hz) : car le SN économise les dernières UM qui sont fatigables. Le SN enverra un maximum de fréquence aux UM fatigables sur un temps très court, quand il en aura besoin.

Le SNC a donc 2 manières d'augmenter la force :

- **NOMBRE** (recrutement spatial)
- **FREQUENCE** (recrutement temporel, sommation des secousses).

Le recrutement du pool d'UM dépend aussi du type d'activité motrice (marche, course, saut)..

En fonction de l'activité, on recrute donc différemment les UM :

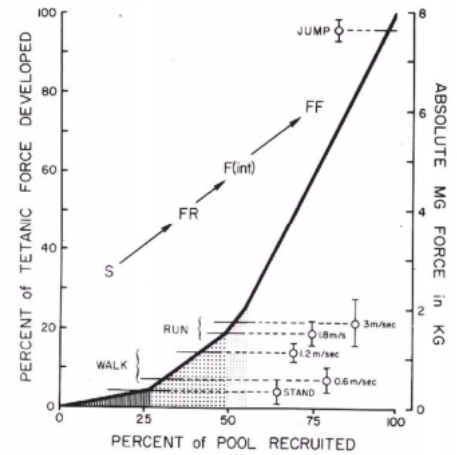
- On recrute plutôt les S au début,
- Puis, pour la rapidité et la puissance on augmente en recrutant les FR et ensuite FF

L'ordre de recrutement prend en compte également :

- **Le degré de force téτανique** : on recrute du plus faible au plus rapide selon la puissance de l'exercice. L'endurance recrute les fibres S (résistantes à la fatigue) → marathonien : d'abord les S, puis FR et en dernier les FF ⇒ on augmente le pool d'UM.

L'ordre de recrutement est TOUJOURS le même. ++++

- Ex :
- Marche : recrutement d'UM S (exclusivement)
 - Courir : recrutement d'UM FR (en plus d'UM S)
 - Sauter : recrutement d'UM FF (en plus des UM S et FR)



- **La puissance de l'exercice :**

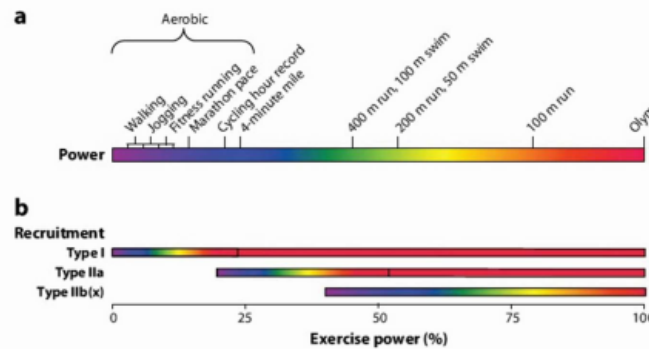


Figure 7
Power output and fiber type recruitment across sporting events. (a) Spectrum of percent of maximum power output. (b) Spectrum of the fiber type recruitment for the corresponding level of power output. Low-power exercise recruits primarily slow-twitch (type I) muscle fibers. As exercise intensity increases, type I fibers reach their maximum capacity to produce power (red) and faster type II and type III(x) fibers are then recruited. Figure adapted from Knuttgen et al. (92).

- o Exercice faible (marche = aérobie) : **type I**
- o Exercice intermédiaire (marathon) : **type IIa**
- o Exercice intense (saut, lancer= mouvements explosifs, force élevée pour un temps très court) : **type IIb**

Les fibres S sont présentes pour la mise en tension. On va du plus faible jusqu'au plus fort mais également du moins fatigable au plus fatigable.

B. Stabiliser la force dans le temps

Une force stable s'obtient par la **fusion des secousses** déclenchées par chaque PA (sinon on tremble).

Moyens utilisés par le SN :

- Recruter le nombre d'UM nécessaire / force de contraction souhaitée

- Avec une fréquence de stimulation suffisante => **tétanos fusionné**
- La fréquence de fusion dépend du type d'UM (Elle est plus basse pour les S que pour les FF)

Ce n'est possible que pour des contractions qui ne sont pas maximales.

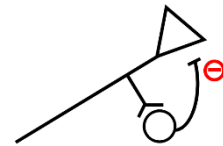
Problème :

Les mêmes UM ne peuvent pas se contracter en permanence il faut qu'elles se renouvellent, il faut donc un système de **remplacement entre les différentes UM de même taille**.

Il va y avoir une rotation (recrutement à tour de rôle) entre les UM **de même taille**. Grâce à un circuit d'interneurone : le **circuit de Renshaw**, la force reste stable. Ce n'est pas toujours la même UM qui se contracte. → Permet d'alterner des UM de même taille sont recrutées à tour de rôle.

L'interneurone de Renshaw exerce un rétrocontrôle sur son MN activateur, après plusieurs PA émis par celui-ci. (Cette inhibition ne survient pas directement après l'activation car elle survient lorsque le neurone de Renshaw a atteint son seuil d'excitabilité)

Le motoneurone étant connecté au neurone de Renshaw par une collatérale. L'UM devient inexcitable après une série de contractions et est remplacée par une UM de même taille dans le noyau moteur du muscle.



→ Ce n'est vrai que pour des contractions qui ne sont pas au maximum, et pour des vitesses de mouvements plus lents. **Cela évite la fatigue des UM mais limite la puissance** car toutes les UM ne sont pas recrutées en même temps.

Pour des niveaux de contraction modérés, chaque UM ne peut ainsi être mise en jeu plus de 30 fois par seconde.

Les UM dans la réalité sont stimulées à 30/40 Hz, cependant en théorie sur une MN alpha, elle peut atteindre jusqu'à 500 Hz.

- Le neurone de Renshaw a un rôle **d'agent de désynchronisation**. Il inhibe le motoneurone après plusieurs PA.
- 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 (hyperpolarisation quand il y a sommation des PPSI)

Rôle d'agent de désynchronisation : il limite et régule la fréquence de décharge maximale des motoneurones envoyés aux fibres musculaires.

Neurone de Renshaw = interneurone de régulation dans le noyau moteur du muscle.

C. Fréquence d'activation des UM

Lors du recrutement physiologique chez l'animal et chez l'homme : la fréquence d'activation est **basse** (22 Hz en moyenne pour l'abducteur du pouce, 31Hz pour le 1^{er} IOD).

Les fréquences réelles sont autour de 30/40 Hz, en conditions expérimentales avec une stimulation électrique, on monte jusqu'à 100 Hz pour stimuler ces mêmes muscles et obtenir la fusion téténique.

Physiologiquement, les UM sont recrutées à des fréquences relativement **basses** (20Hz) par rapport à l'expérimental (stimulation électrique à 100Hz) car toutes les UM sont activées en même temps.

En conditions physiologiques, la contraction téténique est obtenue par « rotation entre les UM ».

Attention : la rotation des UM quand le muscle entier est en tétanos ≠ de la contraction téténique de CHAQUE UM.

D. Influence des conditions de la contraction sur le recrutement des UM

Les **mouvements balistiques** : Ce sont des mouvements très rapides où la vitesse est extrêmement sollicitée, et non la force.

- Tout arrive en même temps donc on ne parle plus d'ordre de recrutement.
- L'entraînement permet d'augmenter la rapidité de mise en jeu des UM, avec une fréquence d'activation rapide. La force dépend essentiellement des propriétés des UM les plus rapides.

Le principe de recrutement par la taille s'applique donc :

- **Aux contractions isométriques (statiques)**
- **Aux contractions dynamiques à vitesse faible**

En résumé :

- L'UM est régie par la loi du **tout ou rien** : si un PA descend sur l'axone, toutes les fibres de l'UM se contractent simultanément → contraction maximale unique
- S'il n'y a pas de PA → pas de contraction (sauf cas pathologiques)

Le système nerveux central doit remplir **2 objectifs** de précision et d'adaptation de la force

- Obtenir de chaque muscle une force **précise** et **adaptée**, pas uniquement la force maximale
- Maîtriser et **stabiliser** la force de la contraction musculaire **dans le temps** (sans secousse)

Exemple pour l'extenseur commun des doigts : au fur et à mesure que l'on demande au sujet de forcer, pour braver cette force, le système nerveux répond en recrutant plusieurs UM les

unes derrière les autres et en même temps en augmentant la fréquence d'activation de chaque UM.

E. Mise en jeu des unités motrices

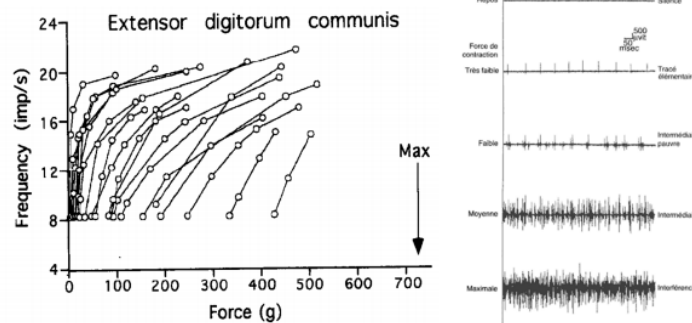
Nous contrôlons la force que l'on souhaite et le temps que l'on veut que ce soit contracté. Le reste est géré par le SN. En effet, pour une contraction isométrique volontaire de force croissante, le SN contrôle :

- **Le recrutement spatial** (augmentation du nombre d'UM mises en jeu) Et/ou
- **Le recrutement temporel** (augmentation de la fréquence d'activation de chaque UM).

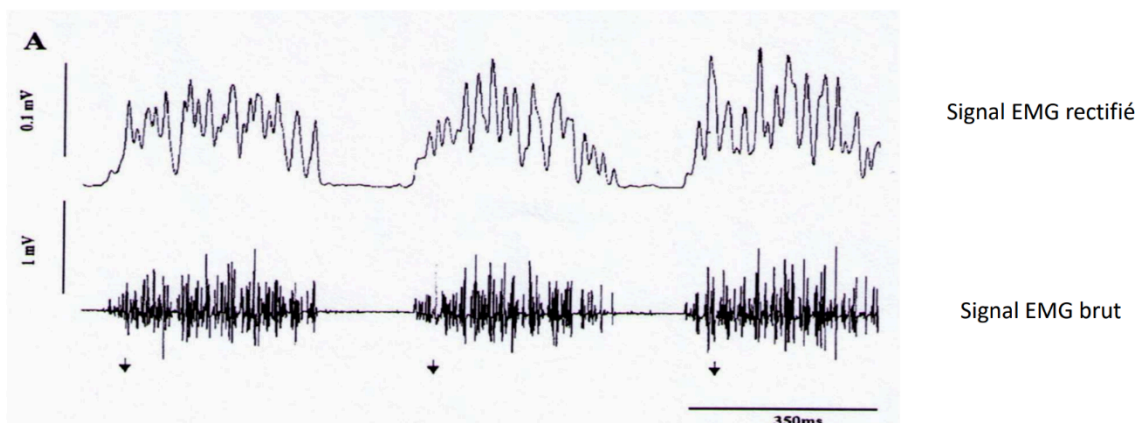
NB : Le SN **médullaire** contrôle le recrutement **spatial** (nombre d'UM) et **temporel** (fréquence d'activation). Tandis que le SN supérieur active ou inhibe la contraction. Il décide de l'intensité (quantité d'UM), la durée et la chronologie d'activation des UM (à quel moment).

Exemple : on n'utilise pas la même force pour lancer un poids et une plume.

C'est le SN qui décide du début et de la fin du mouvement.



XIV. EMG de surface (global)



On peut faire de l'étude du mouvement, de l'activation des muscles sur l'**EMG de surface** : c'est l'enregistrement de l'activité électrique dégagée par la contraction des muscles et on obtient ce genre de tracé en gras qui est un signal brut vu par des électrodes qui sont positionnées à des endroits bien particuliers. On voit qu'il y a des activations.

L'EMG de surface va être utilisé pour déterminer quels sont les programmes moteurs élaborés par le SNC : comment le système nerveux va coordonner les activations de certains

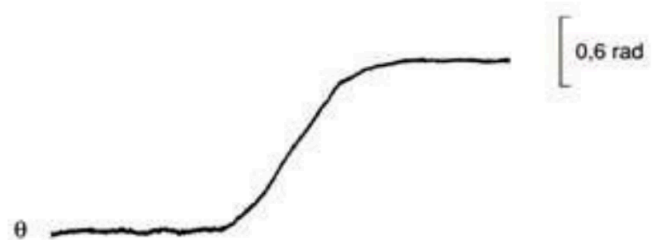
muscles et pas d'autres. Donc comment on va activer nos muscles agonistes, antagonistes lors de la marche par exemple. Ça permet de voir la coordination entre les groupes musculaires ou les co-activations entre les groupes musculaires.

C'est la programmation centrale. Ce n'est pas la moelle qui fait cela. Cela veut dire que sur l'**EMG global**, on va aller lire les programmes moteurs qui sont élaborés du plus simple au plus compliqué. Ex de programme élémentaire : flexion/arrêt de la flexion. **La lecture des programmes moteurs élaborés par le SNC**, ce n'est pas un examen de routine.

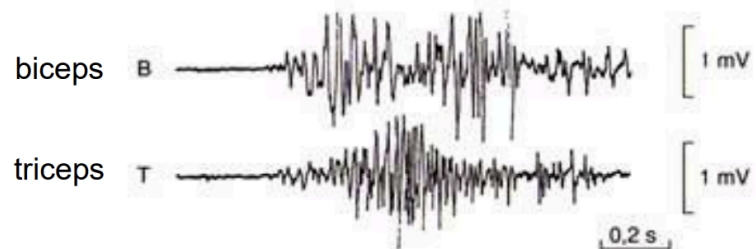
Programme moteur élémentaire ou minimal = pattern (modèle) triphasique d'un mouvement : le plus simple possible.

Par exemple : la flexion du coude (activation du biceps, puis du triceps (pour « freiner la course »), puis du biceps (pour bloquer en position finale)) nécessite une coordination entre les muscles. Circuits descendants qui inhibent/activent pour avoir ce genre de contraction synchronisée.

Mouvement du coude



EMG



Le programme moteur ne peut jouer que sur la force de contraction du muscle et sa distribution dans le temps / mouvement donné.

La synchronisation entre les UM se déroule au niveau du SN médullaire.