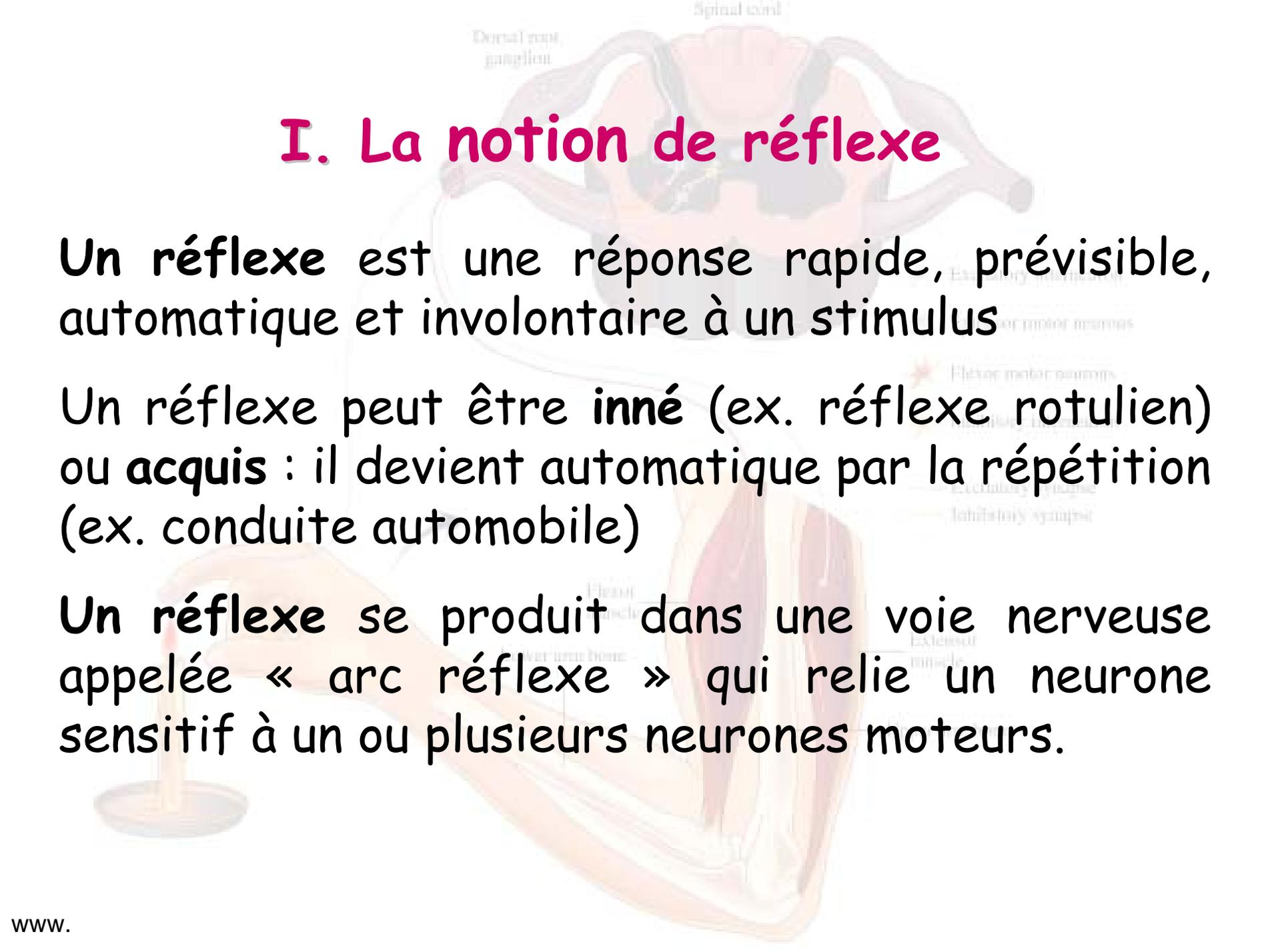


Chapitre III

Le contrôle réflexe de la motricité : les réflexes spinaux ou médullaires



h NEUROBIOLOGY
Gary G. Matthews



I. La notion de réflexe

Un réflexe est une réponse rapide, prévisible, automatique et involontaire à un stimulus

Un réflexe peut être **inné** (ex. réflexe rotulien) ou **acquis** : il devient automatique par la répétition (ex. conduite automobile)

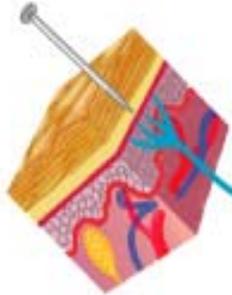
Un réflexe se produit dans une voie nerveuse appelée « arc réflexe » qui relie un neurone sensitif à un ou plusieurs neurones moteurs.

Tout « Arc Réflexe » nécessite la présence d'au moins 5 éléments

Réagit au stimulus

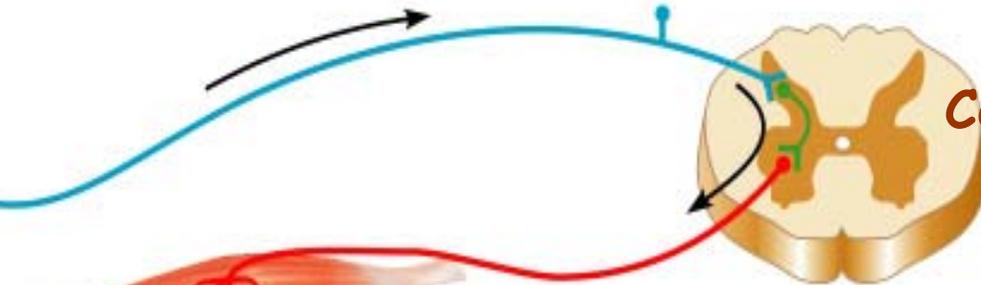


1 Récepteur sensoriel



Transmet l'information sensorielle du Récepteur au SNC

Neurone afférent



Centre d'intégration dans le SNC



Effectue la transmission synaptique entre neurones afférent et efférent

1 Effecteur le muscle ou la glande



Assure la réponse au stimulus

Neurone efférent

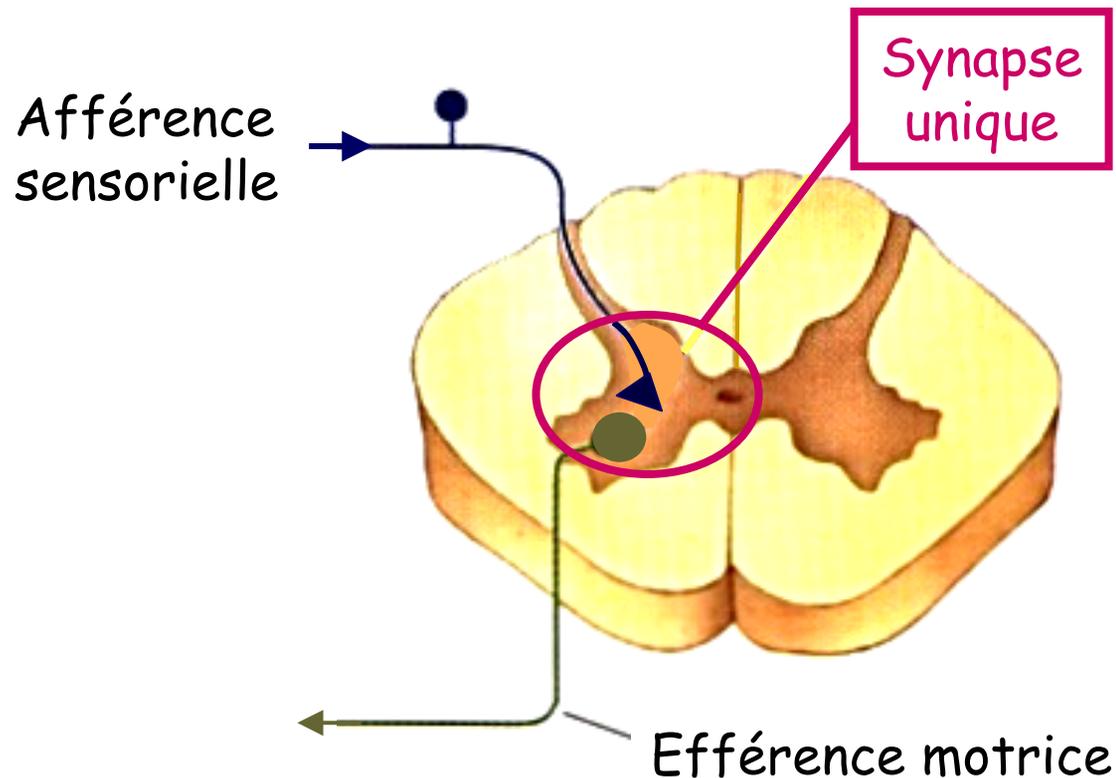


Transmet la commande motrice du SNC à l'effecteur

Un réflexe peut être :

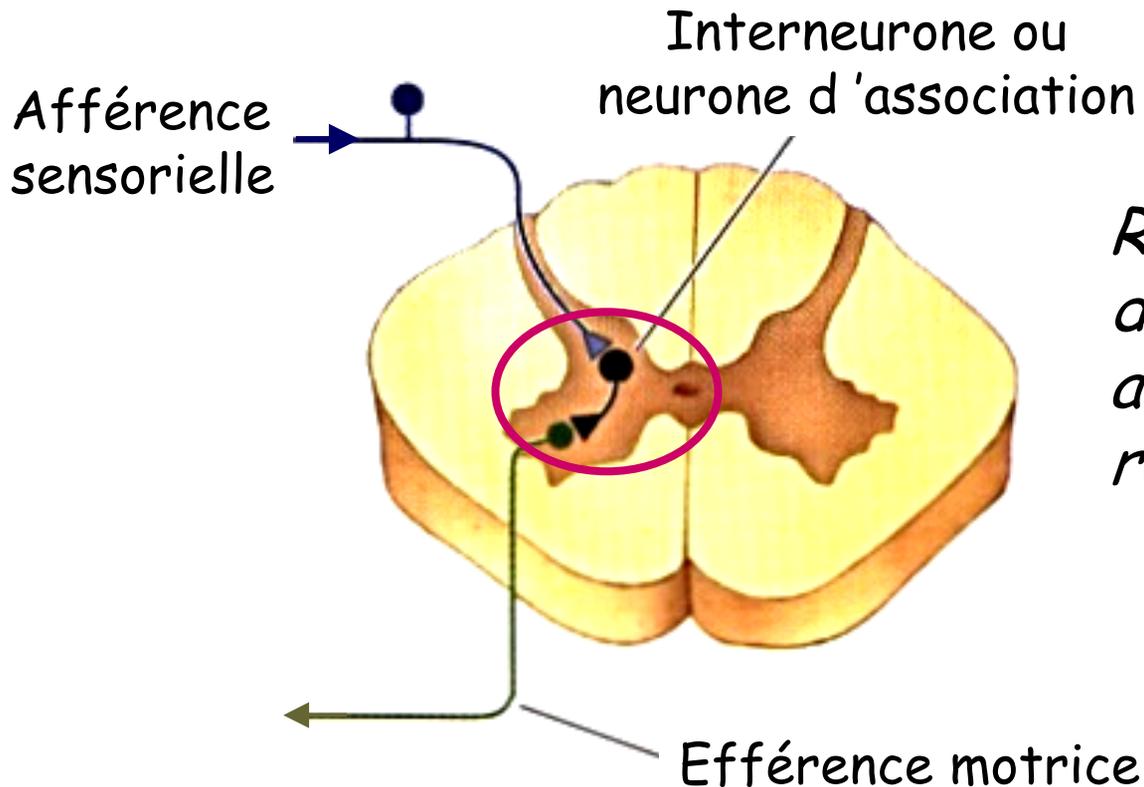
👉 monosynaptique

Il existe une synapse unique entre le neurone afférent et le neurone efférent.



👉 polysynaptique

Il existe 1 ou plusieurs neurones d'association, appelés aussi interneurones, entre afférences sensorielles et efférences motrices dont les synapses sont situées dans le SNC.



Remarque : plus il y a de synapses dans un arc réflexe, plus le réflexe est long.

Le système nerveux autonome

SN de la vie de la régulation du milieu intérieur

Les réflexes viscéraux régissent l'activité des muscles lisses, du muscle cardiaque et des glandes, de même que diverses fonctions.

Exemples : réflexe salivaire, réflexe pupillaire, fonction digestive, pression artérielle, transpiration...

Le système nerveux somatique

SN de la vie de relation avec le milieu extérieur

Les réflexes somatiques stimulent les muscles squelettiques.

Exemples : réflexes oculaires, réflexe de retrait de la main d'un objet brûlant, réflexe rotulien, mettre les mains en avant quand on tombe...

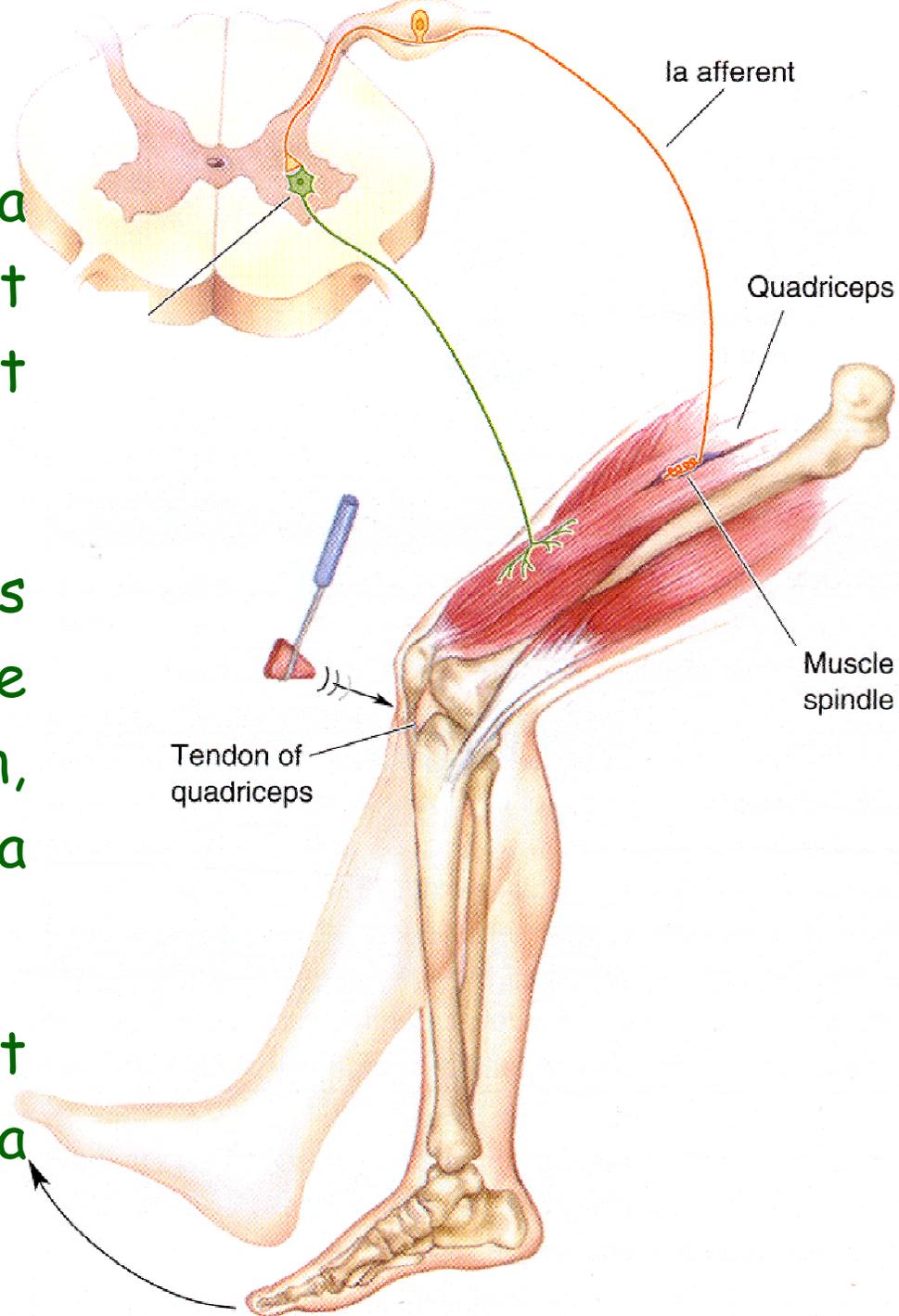
➔ Une grande partie des activités courantes de l'organisme est programmée sous forme de réflexes

Remarque

On comprend dès lors que la recherche des réflexes soit un outil d'évaluation de l'état du système nerveux.

En effet, l'altération des réflexes, qu'il s'agisse d'une exagération, d'une distorsion, ou d'une absence, traduit la présence d'un trouble.

Elle apparaît souvent avant tout autre signe de la maladie.

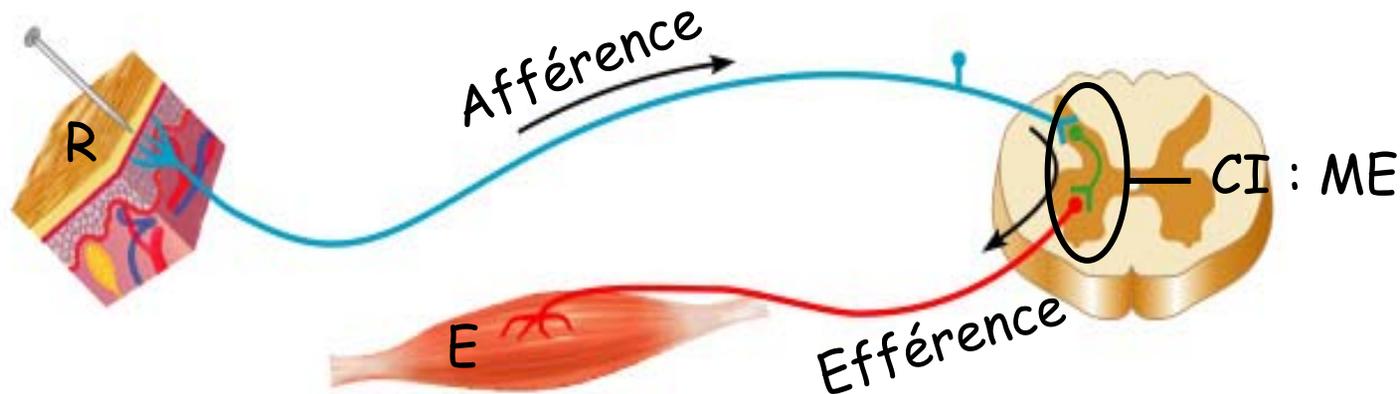


De nombreux réflexes sont **des réflexes spinaux**

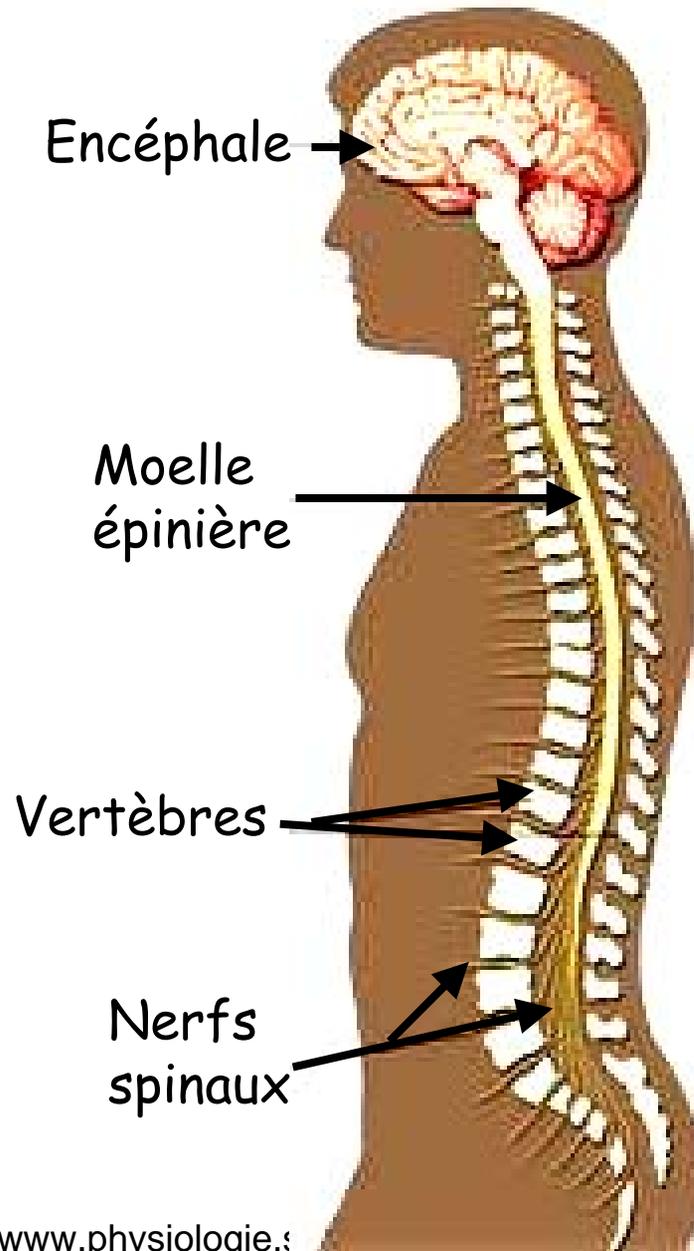
Par définition

Les réflexes spinaux ne font intervenir que des neurones de la moelle épinière et se produisent sans que l'encéphale y participe.

⇒ La moelle épinière est alors le centre d'intégration dans l'arc réflexe.



Pourquoi les réflexes spinaux sont-ils nombreux?



Parce que la moelle épinière est la principale voie de transfert de l'information depuis la peau, les muscles, les glandes jusqu'à l'encéphale et vice et versa.

Cette communication entre la moelle épinière et le reste du corps est assurée par les nerfs spinaux ou rachidiens (31 paires, cf. S1-U1-Phy1)

II. Les réflexes spinaux somatiques

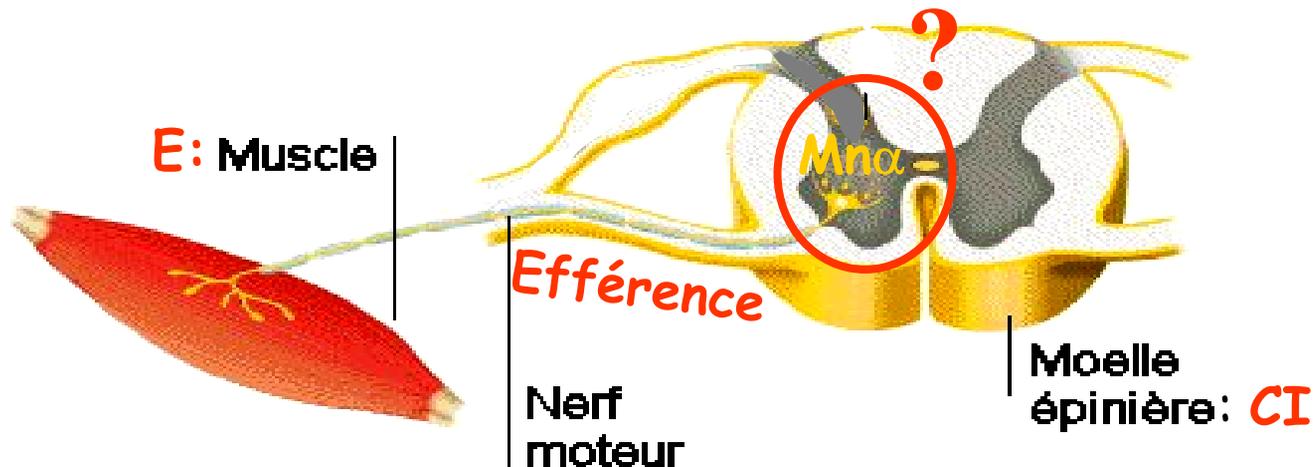
Le système nerveux somatique fonctionne grâce à des réflexes qui impliquent des boucles neuronales dans lesquelles les neurones moteurs ont leurs corps cellulaires dans le tronc cérébral (nerfs crâniens) et la moelle épinière (nerfs rachidiens).

Nous n'aborderons que les réflexes spinaux somatiques qui sont le plus souvent des réflexes simples.

Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

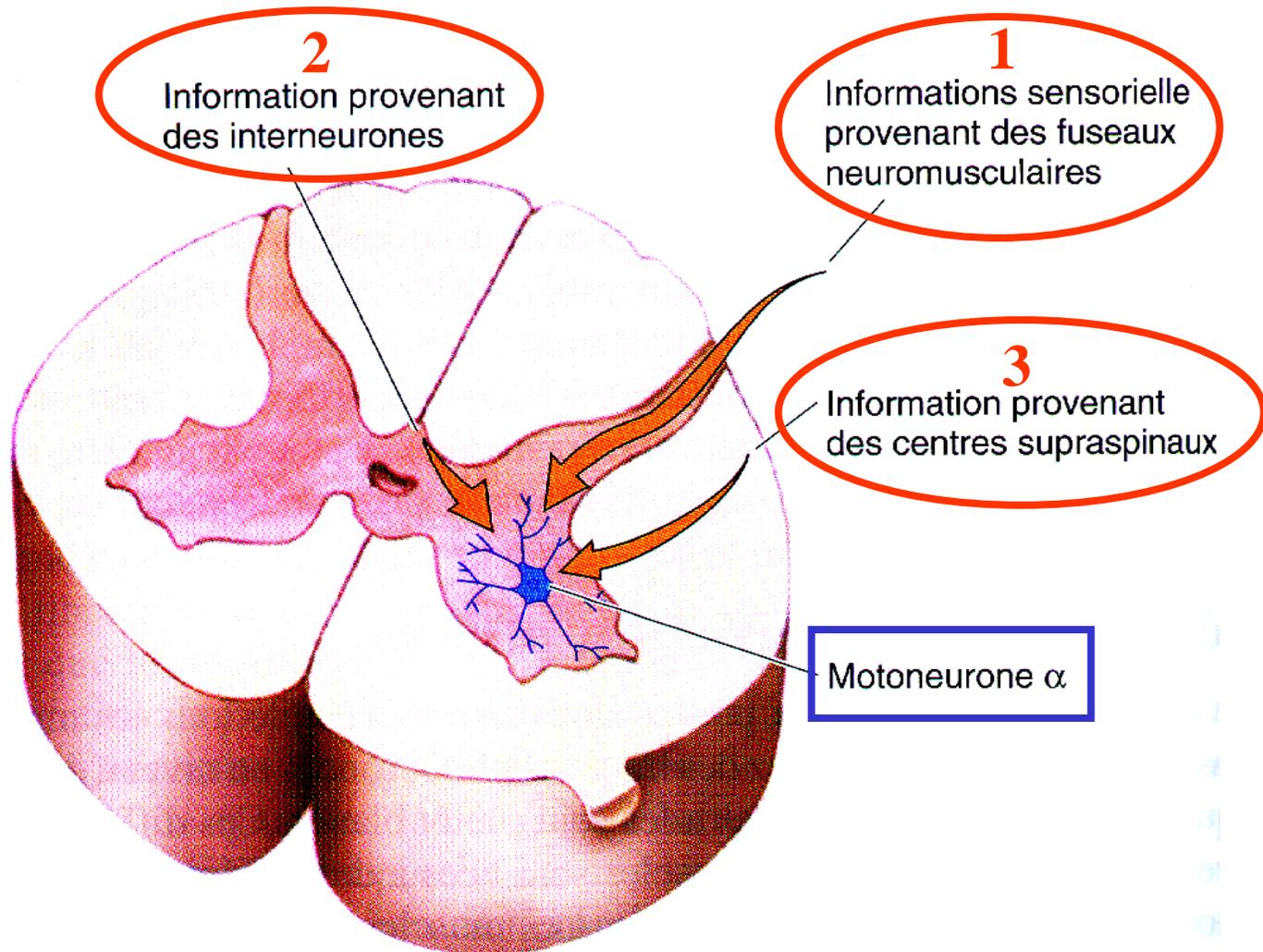
S 'agissant du système somatique :

l'effecteur est le muscle strié squelettique dont la contraction résulte de l'activation des Mn α .



Quelles sont les afférences qui parviennent aux Mn α ?

Les Mn α reçoivent 3 sources d'informations afférentes.



Les Mn α reçoivent des afférences provenant :

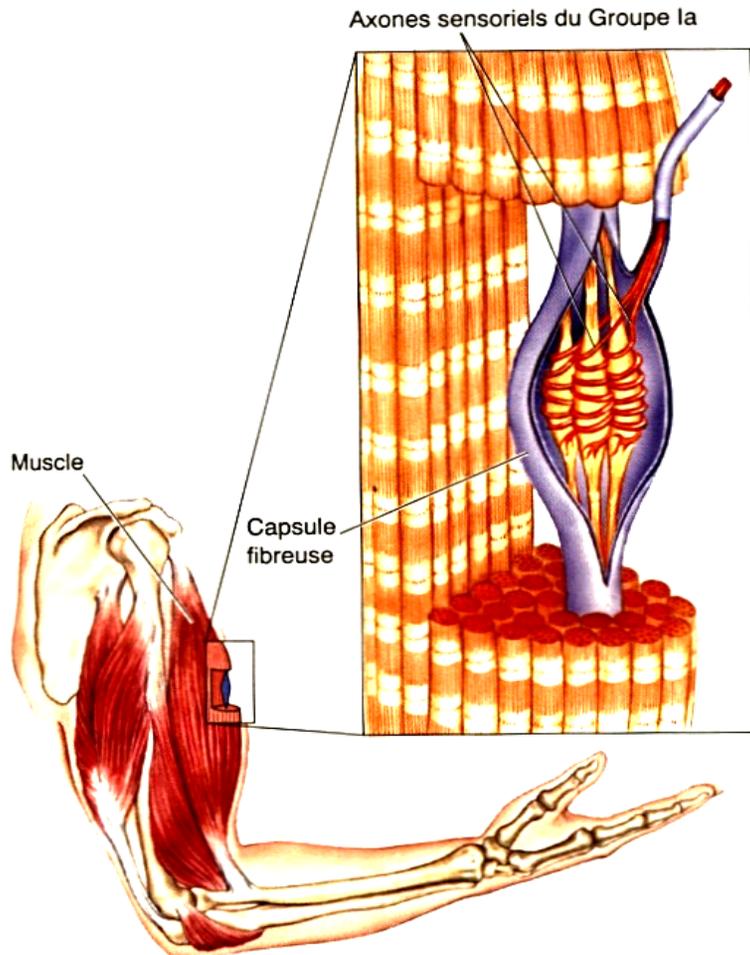
Source 1

☞ **directement des neurones des ganglions sensoriels** des racines dorsales véhiculant les messages sensoriels issus d'un récepteur spécialisé dans la détection de la longueur du muscle: le fuseau neuromusculaire (FNM)



Le contrôle spinal des unités motrices

A/ Par les informations sensorielles provenant des FNM : récepteurs proprioceptifs

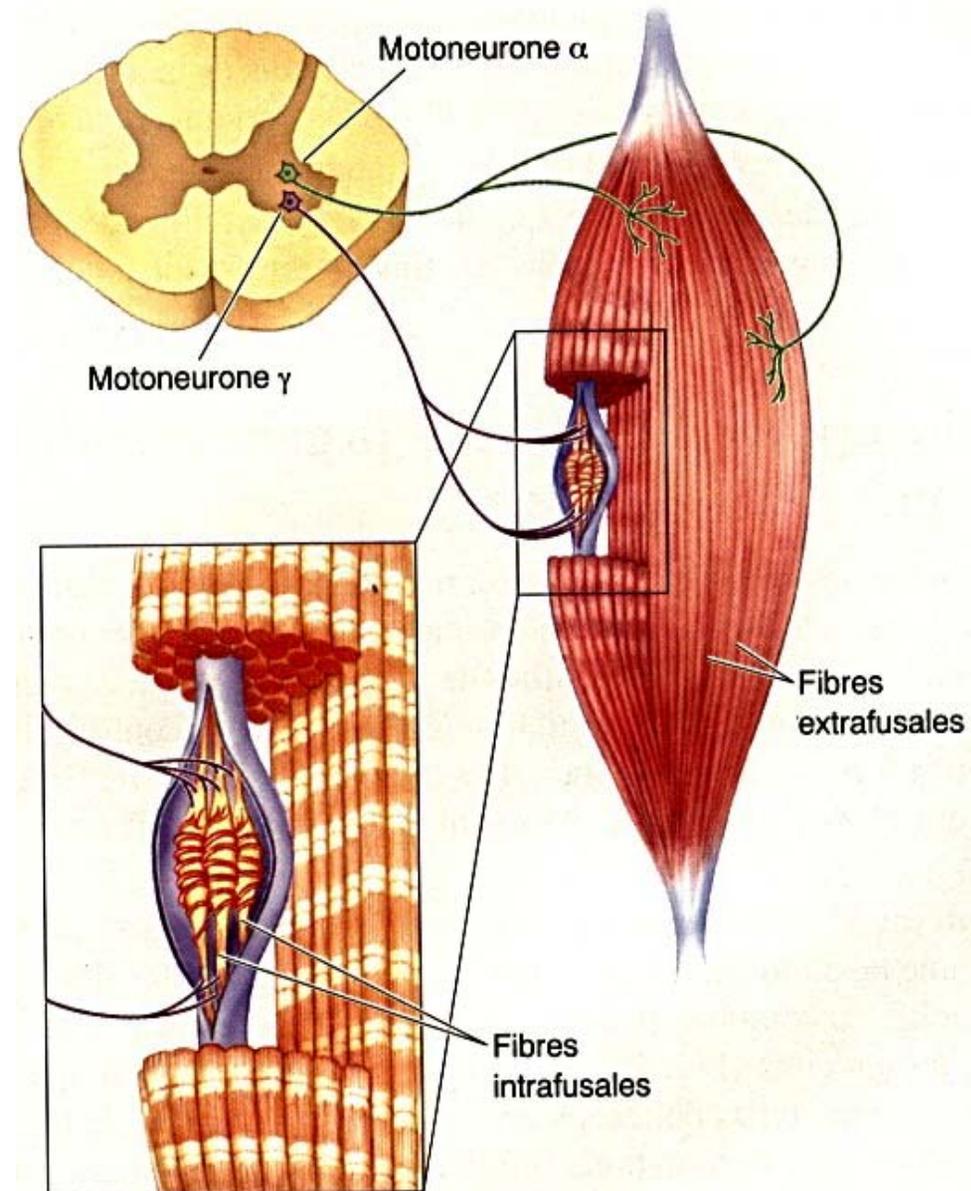


Les FNM sont des récepteurs encapsulés, situés dans la partie charnue du muscle.

La capsule protège 4 à 15 fibres intrafusales.

Ces fibres sont disposées parallèlement aux fibres musculaires squelettiques.

Elles s'insèrent sur les cloisons conjonctives intra musculaires.



La densité de récepteurs varie en fonction des muscles :

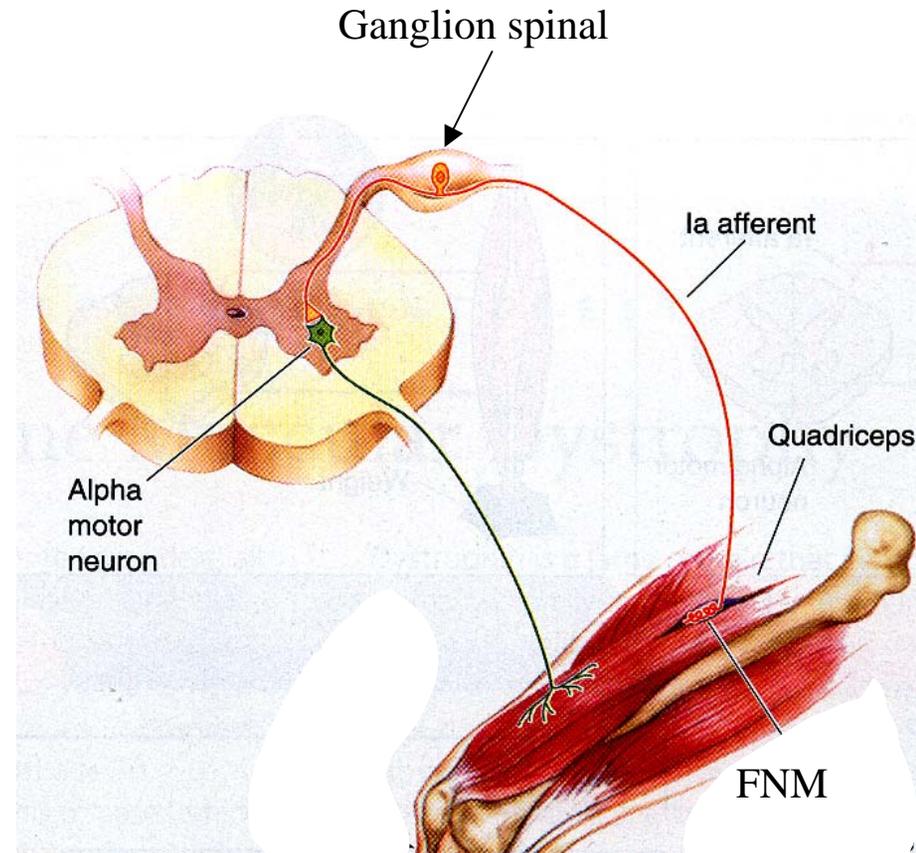
Densité importante

- Muscles de la main et des doigts
- Muscles de la nuque
- Muscles extra oculaires

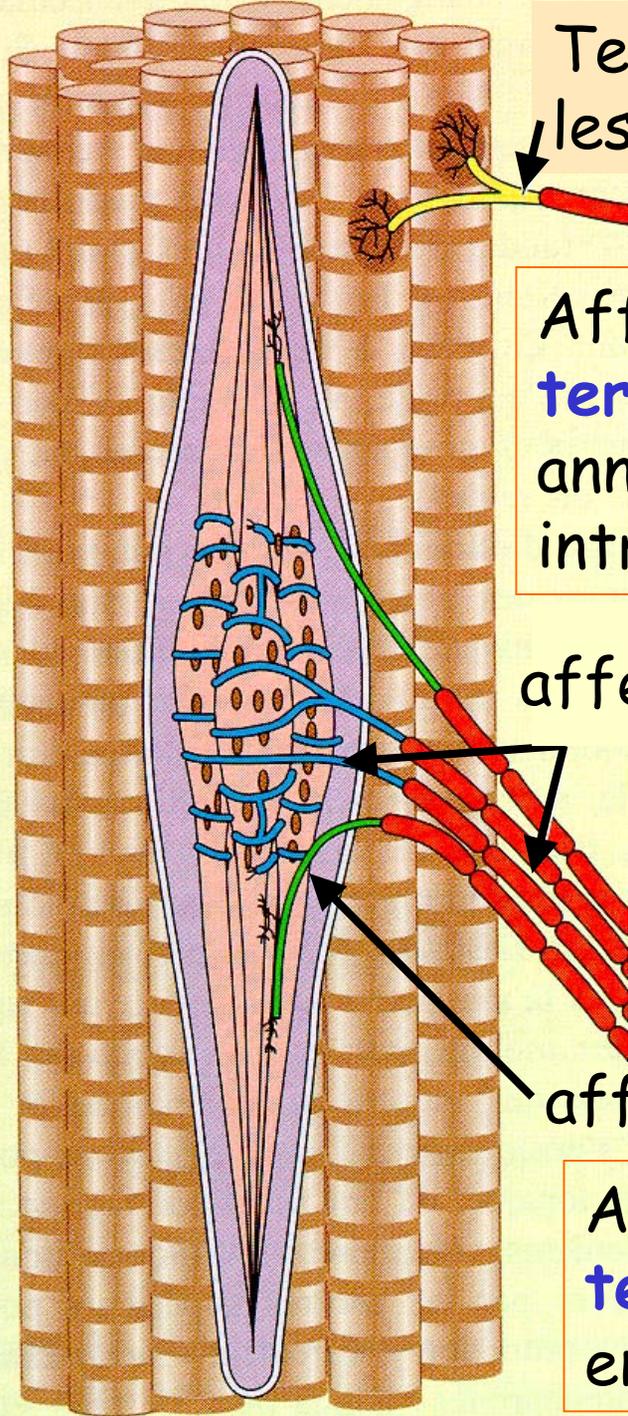
Densité faible

- Muscles posturaux

Les fibres intrafusales sont innervées par des terminaisons sensorielles de 2 types de neurones dont les corps cellulaires sont situés dans un ganglion spinal de la racine dorsale de la moelle épinière.



On distingue donc 2 types d'afférences sensorielles fusoriales



Terminaisons motrices α innervant les fibres musculaires extra fusales

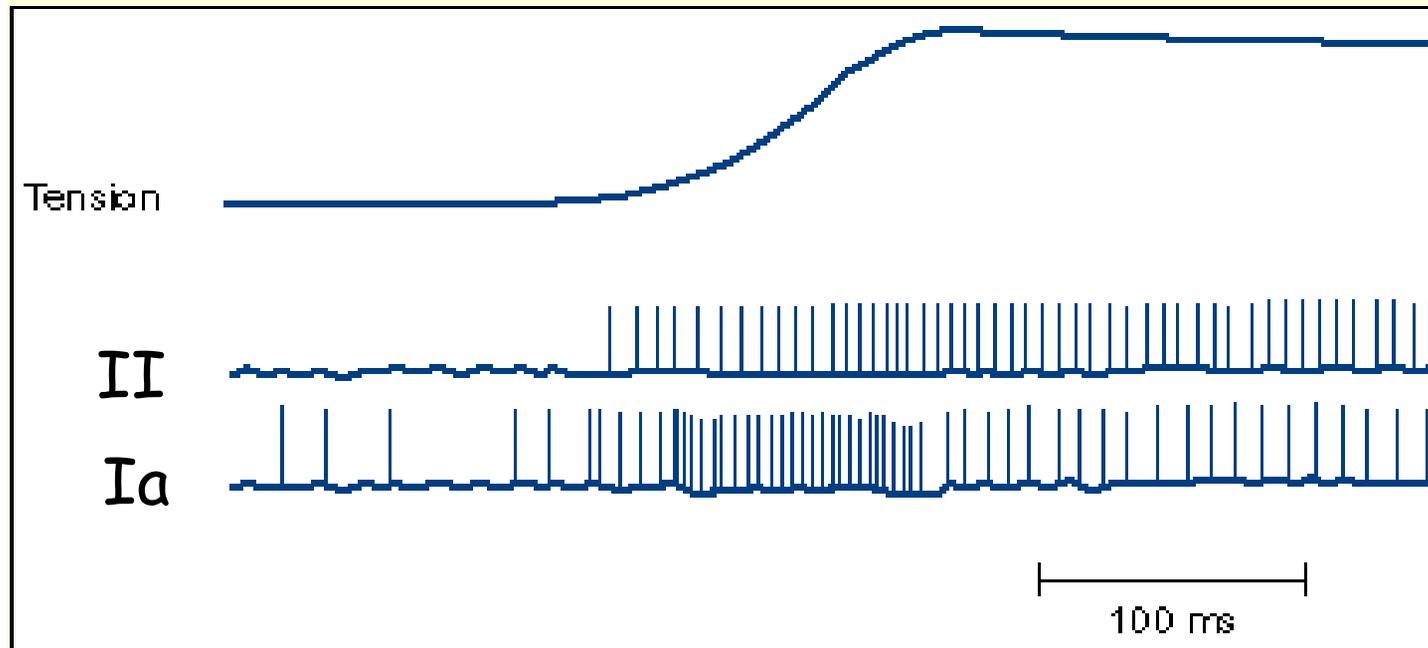
Afférences fusoriales de type Ia ou terminaisons sensibles primaires ou annulo-spiralées enrobant les fibres intra fusales (V_c : 70-110 m/sec)

afférences de type Ia }
afférences de type II }

Elles sont activées par l'allongement de la région de la fibre sur laquelle elles reposent.

Afférences fusoriales de type II ou terminaisons sensibles secondaires ou en bouquet (V_c : 30-70 m/sec)

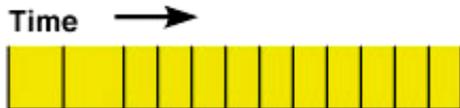
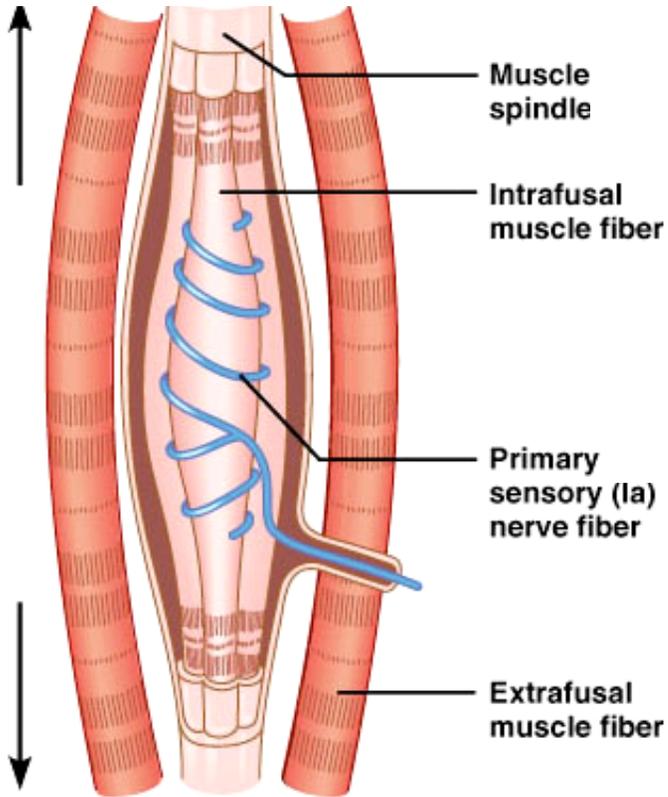
Enregistrement des afférences fusoriales au cours de l'étirement du muscle



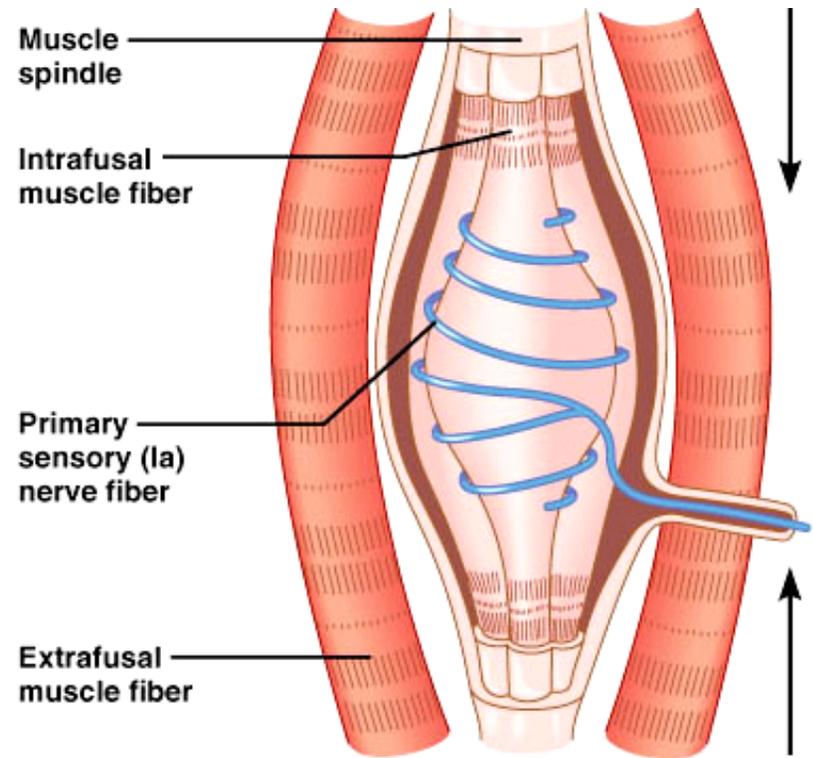
Elles sont sensibles à la longueur et aux variations de longueur du muscle.

Fonctionnement global du FNM

Au cours de l'étirement du muscle



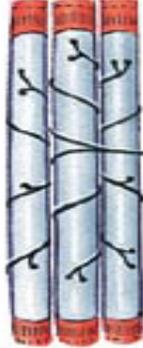
Au cours de la contraction du muscle



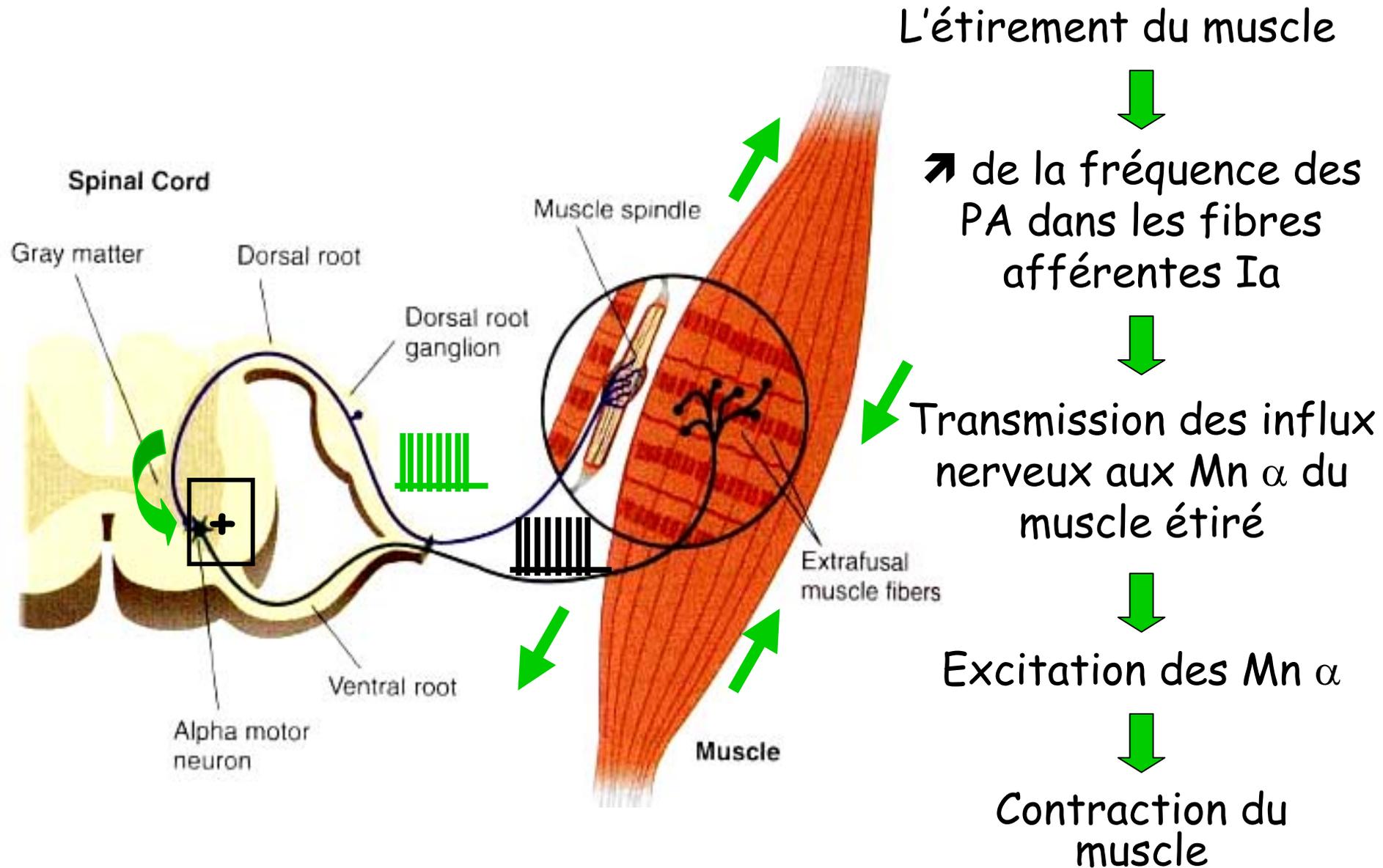
La fréquence des PA ↗

La fréquence des PA ↘

Fonctionnement global du FNM

Sensory Region	Action Potential in Sensory Neuron	Effect on Extrafusal Fibers
 <p data-bbox="957 525 1106 586">Resting length</p>		<p data-bbox="1633 329 1782 422">Normal muscle tone</p>
 <p data-bbox="957 968 1138 1001">Stretched</p>		<p data-bbox="1620 715 1804 808">Muscle tone increases</p>
 <p data-bbox="929 1282 1167 1315">Compressed</p>		<p data-bbox="1620 1115 1810 1208">Muscle tone decreases</p>

La voie du réflexe myotatique



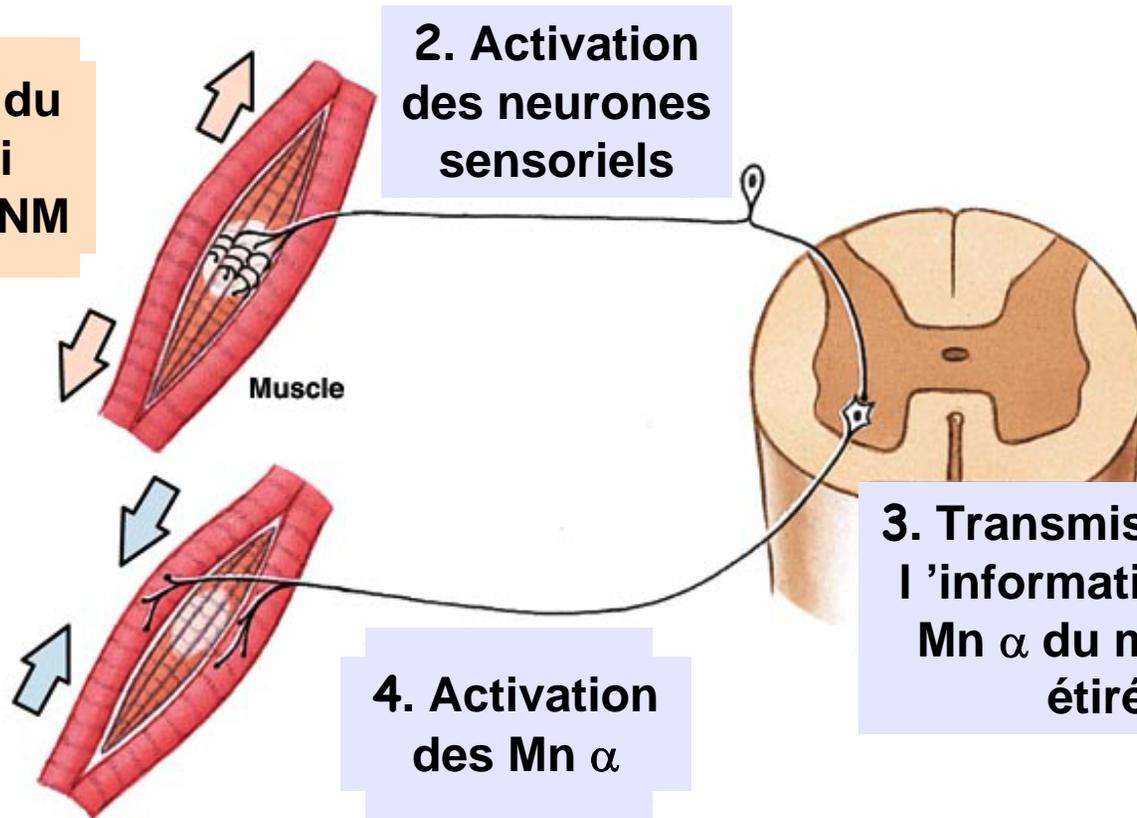
1. Étirement du muscle qui stimule les FNM

2. Activation des neurones sensoriels

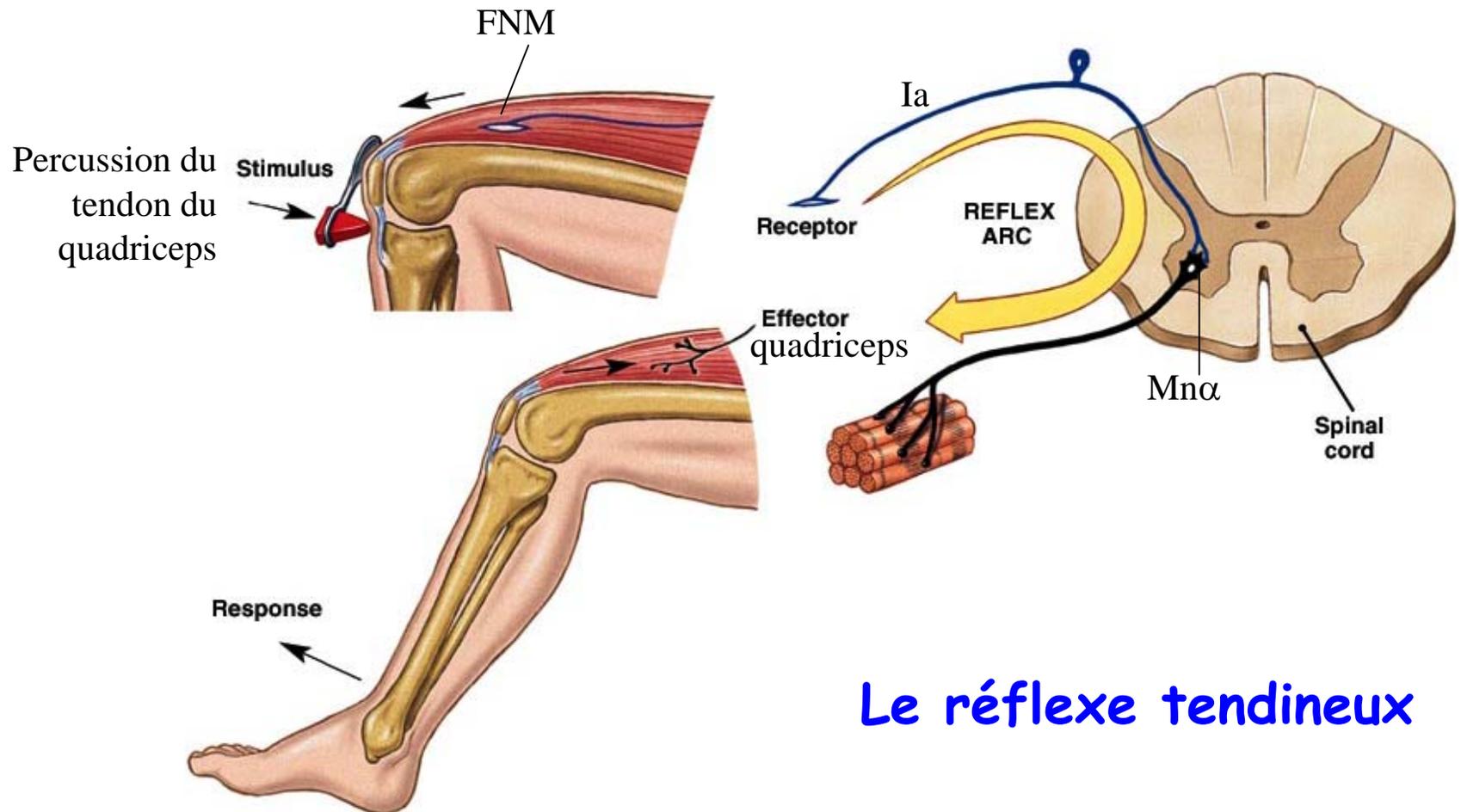
3. Transmission de l'information aux Mn α du muscle étiré

5. Contraction du muscle

4. Activation des Mn α



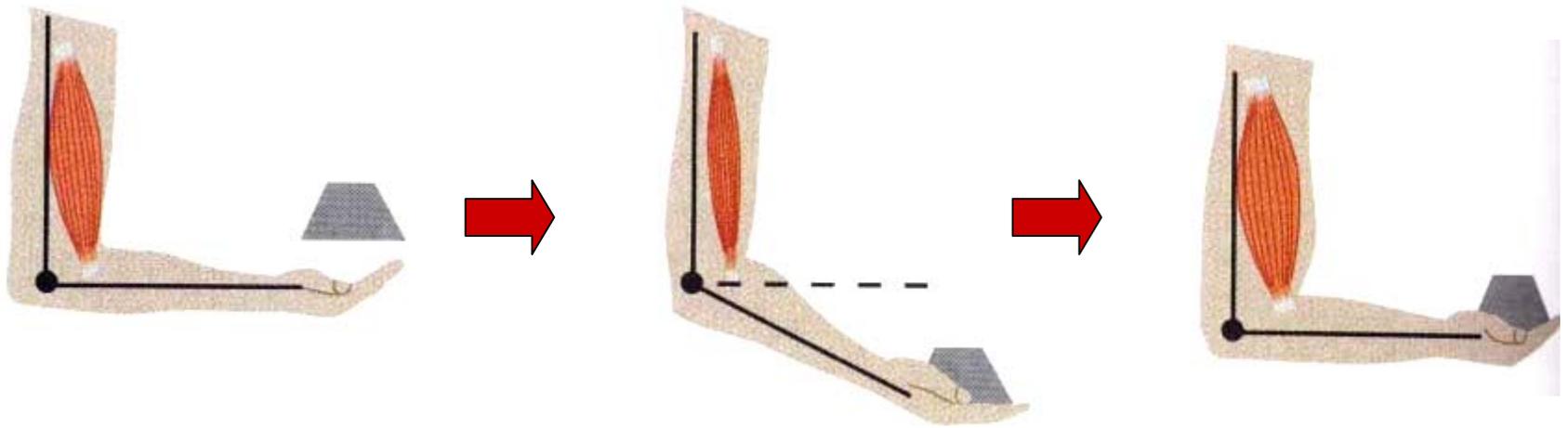
C'est ce type de circuit monosynaptique que teste le neurologue lorsqu'il percute votre tendon situé sous le genou à l'aide d'un petit marteau, provoquant en retour la contraction réflexe du quadriceps.



Le réflexe tendineux

Le réflexe myotatique est donc un réflexe d'étirement

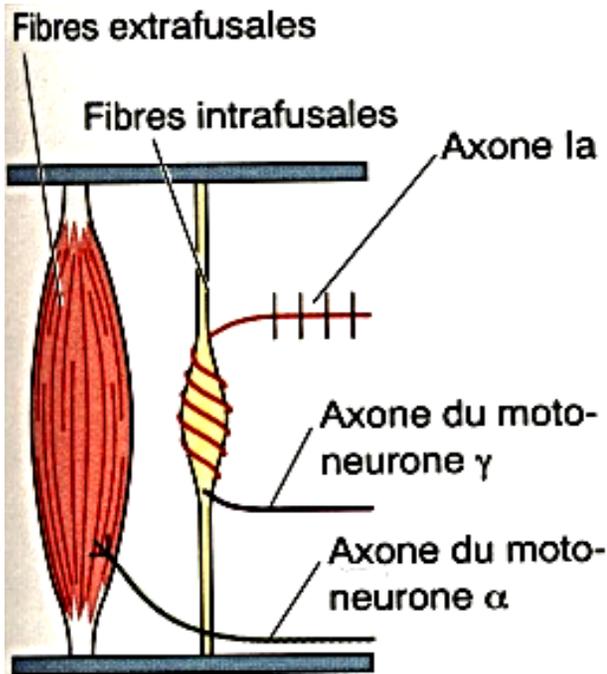
En effet : la tension (contraction) d'un muscle augmente de manière réflexe en réponse à son propre étirement.



Le réflexe myotatique a pour finalité de maintenir une longueur déterminée du muscle en s'opposant à un étirement plus important de ce muscle.

Le circuit réflexe est **monosynaptique** (latence de 0,5ms) et **homolatéral**.

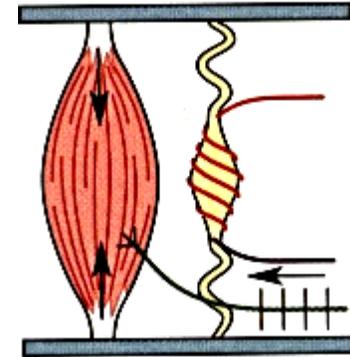
Problème



*Le muscle est relâché,
les fibres intra fusales
sont sensibles à
l'étirement*

Activation
du Mn α

→



*L'activation des
Mn α provoque
la contraction
des fibres
musculaires
extrafusales*

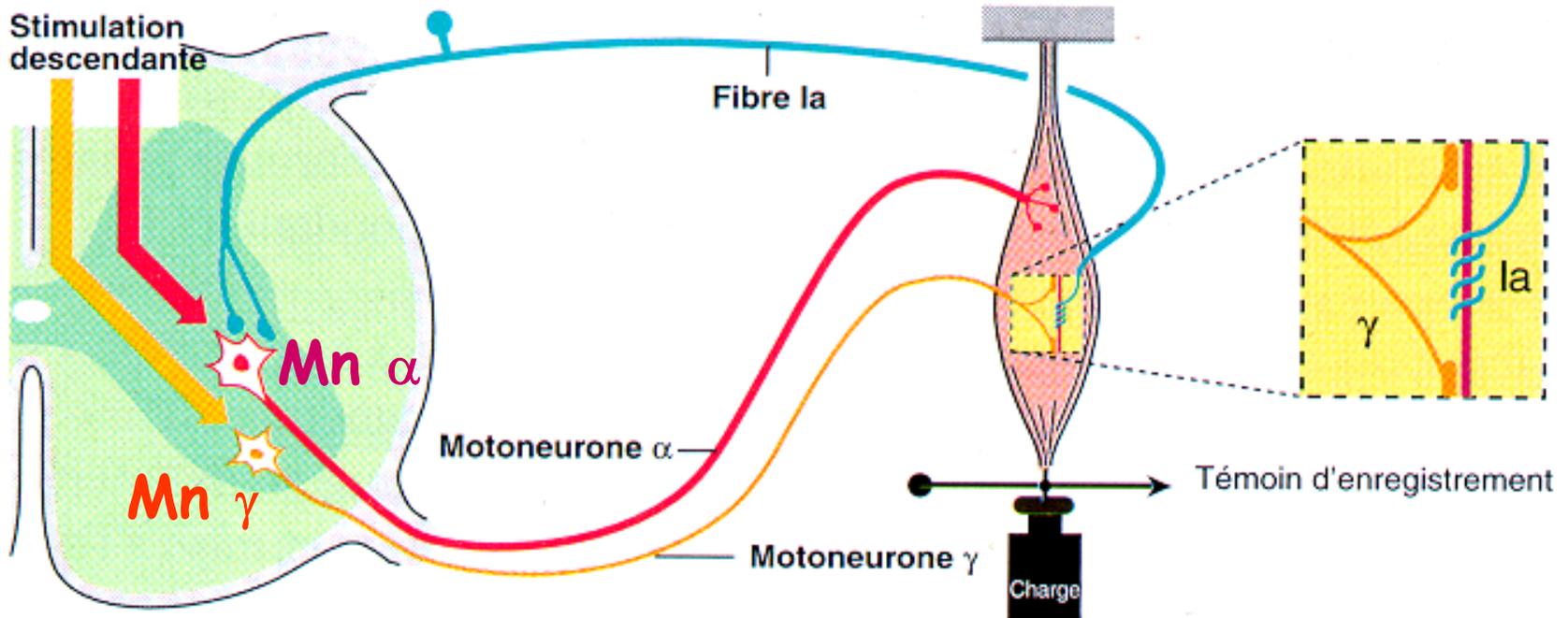
*Si le FNM est
détendu, il devient
inefficace pour
transmettre des
informations sur la
longueur du muscle !!!*

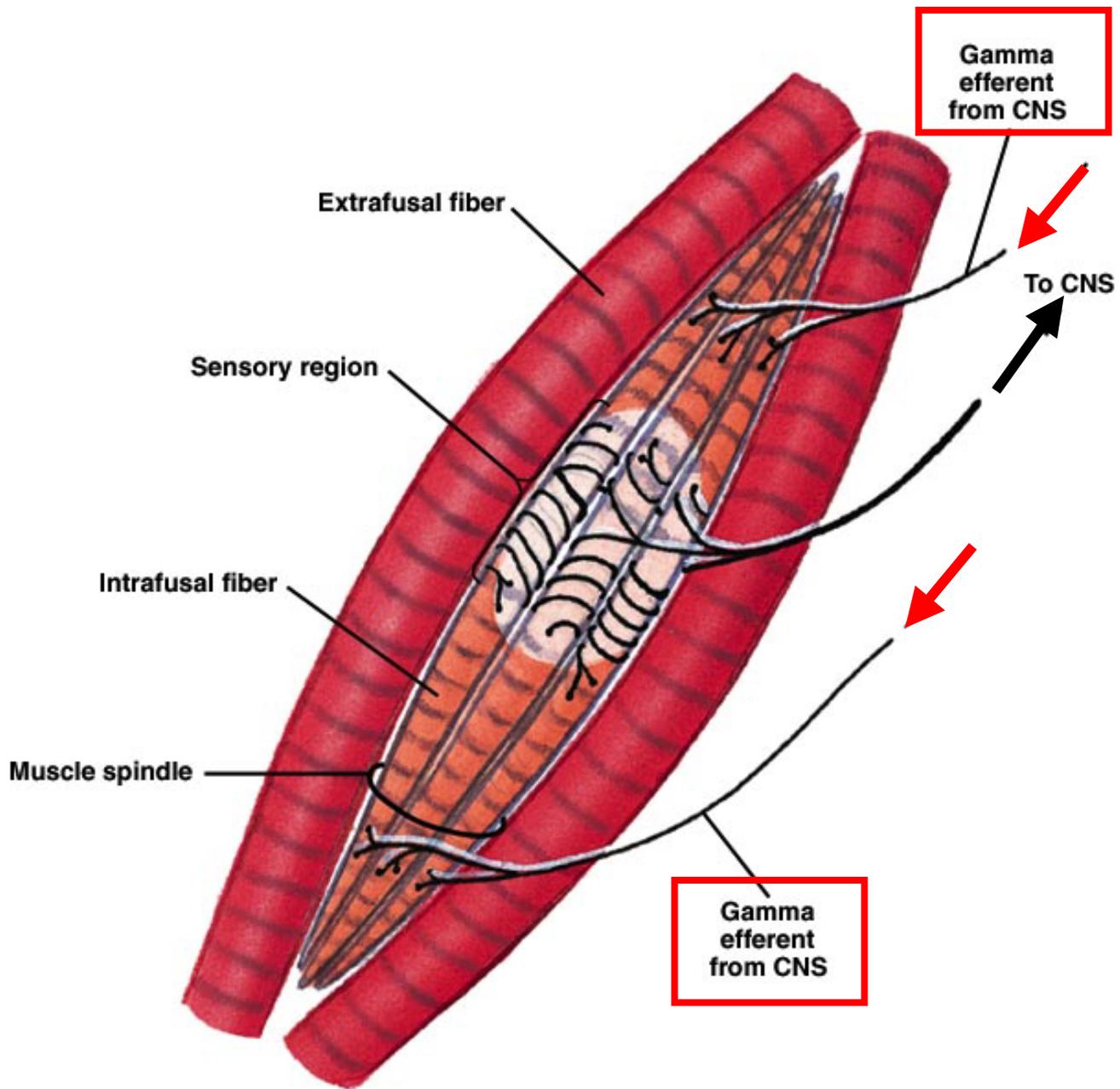
Les Mn γ vont permettre de moduler la sensibilité du récepteur à l'étirement.

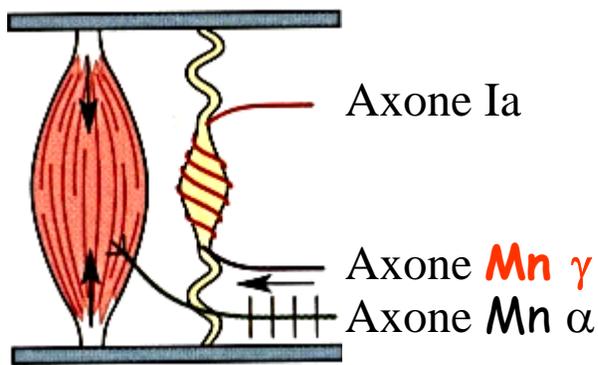
A côté des **Mn α** existent au sein de la corne ventrale des petits neurones moteurs : les **Mn γ**

Ces Mn γ reçoivent quasi exclusivement des informations des centres supra spinaux.

Leurs axones passent par la racine ventrale pour rejoindre le nerf rachidien et viennent innervier les parties « polaires » contractiles des fibres intrafusales.

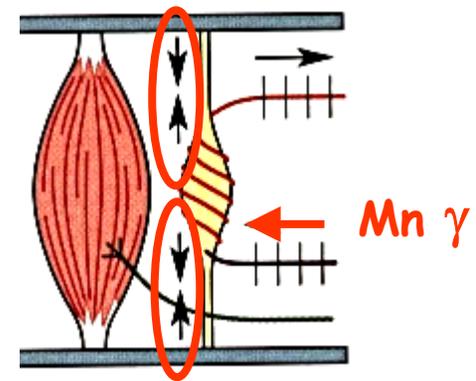






Le muscle se contracte

Activation
du Mn γ



L'activation des Mn γ a pour effet de faire se contracter les extrémités des fibres intrafusales

Les Mn γ permettent donc l'ajustement de la longueur du fuseau à la longueur du muscle pendant la contraction du muscle :

⇒ les fibres Ia demeurent actives

⇒ la précision du mouvement musculaire augmente

fibres musculaires extra fusales



Nerve

Fusimotor endings

fibres musculaires intra fusales

afférences de type II

afférences de type Ia

capsule

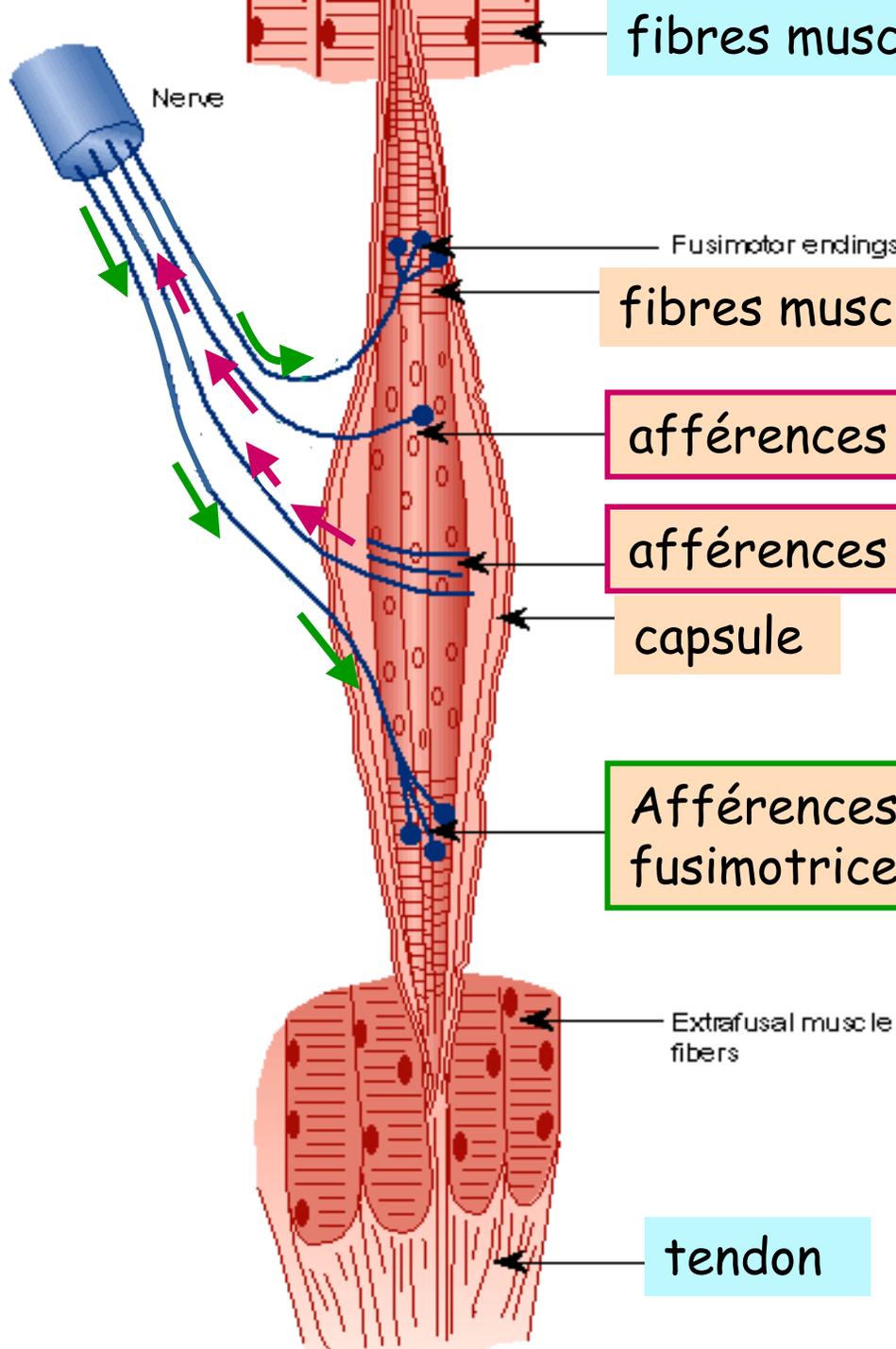
Afférences fusimotrices

activées par l'allongement de la région de la fibre qu'elles enrobent.

Activent la partie polaire contractile des fibres qu'elles innervent.

Extrafusal muscle fibers

tendon



Remarque : l'activation des Mn α et des Mn γ a des effets opposés sur la décharge des fibres sensorielles Ia

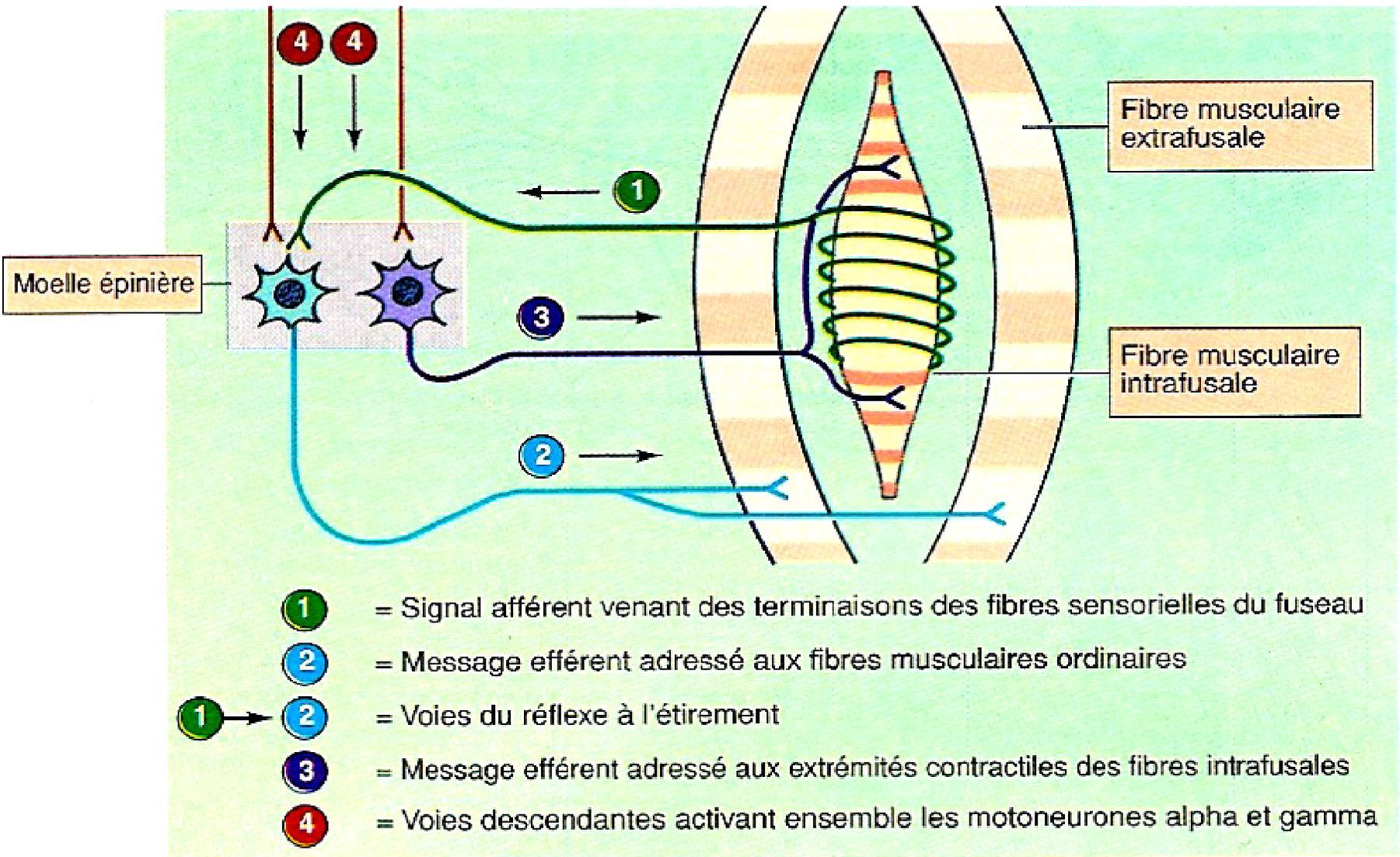
- l'activation des Mn α seule tend à réduire leur activité
- l'activation des Mn γ tend à l'augmenter

Pourquoi peut-on dire que la boucle gamma augmente le gain du réflexe myotatique?



Les Mn α et le Mn γ font l'objet de commandes à partir des régions supra spinales ce qui donne la possibilité de programmer le contrôle de la longueur du muscle au travers du réflexe myotatique et de la boucle gamma

Fonctionnement optimisé du FNM : la boucle alpha-gamma



Voies participant au réflexe monosynaptique d'étirement et à l'activation simultanée des motoneurones alpha et gamma.

Les effets du réflexe myotatique ne se limitent pas au seul muscle étiré.

Les fibres Ia du muscle étiré ont des articulations directes non seulement avec les Mn α du muscle étiré, mais aussi avec les Mn α des muscles agonistes agissant en synergie sur la même articulation

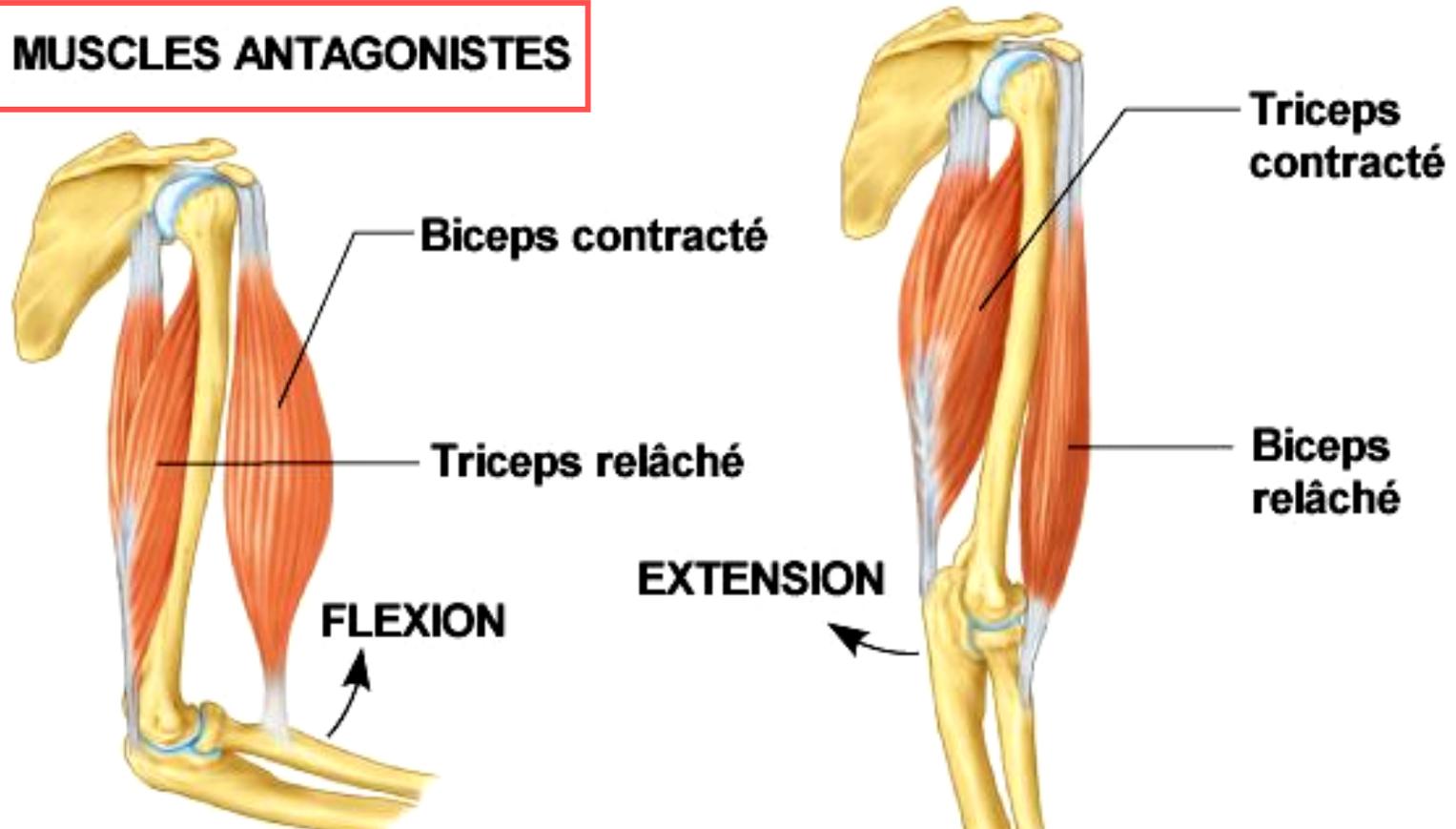


L'augmentation de l'étirement d'un muscle donné produit une contraction coordonnée des muscles synergiques

Un étirement du biceps, muscle fléchisseur, provoque la contraction du biceps ainsi que celle du brachial antérieur.

Mais au niveau d'une articulation, il y a des muscles synergiques et des **muscles antagonistes**.

MUSCLES ANTAGONISTES



Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

Que se passe-t-il au niveau de la moelle épinière?

Nous avons vu que les afférences des Mn α proviennent:

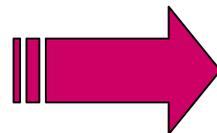
☞ **directement des neurones des ganglions sensoriels**

des racines dorsales véhiculant les messages sensoriels issus d'un récepteur spécialisé dans la détection de la longueur du muscle: le fuseau neuromusculaire (FNM)

Elles proviennent aussi : **Source 2 majoritaire**

☞ **d'interneurones spinaux**

excitateurs ou inhibiteurs, faisant partie de circuits impliqués dans les programmes moteurs spinaux.



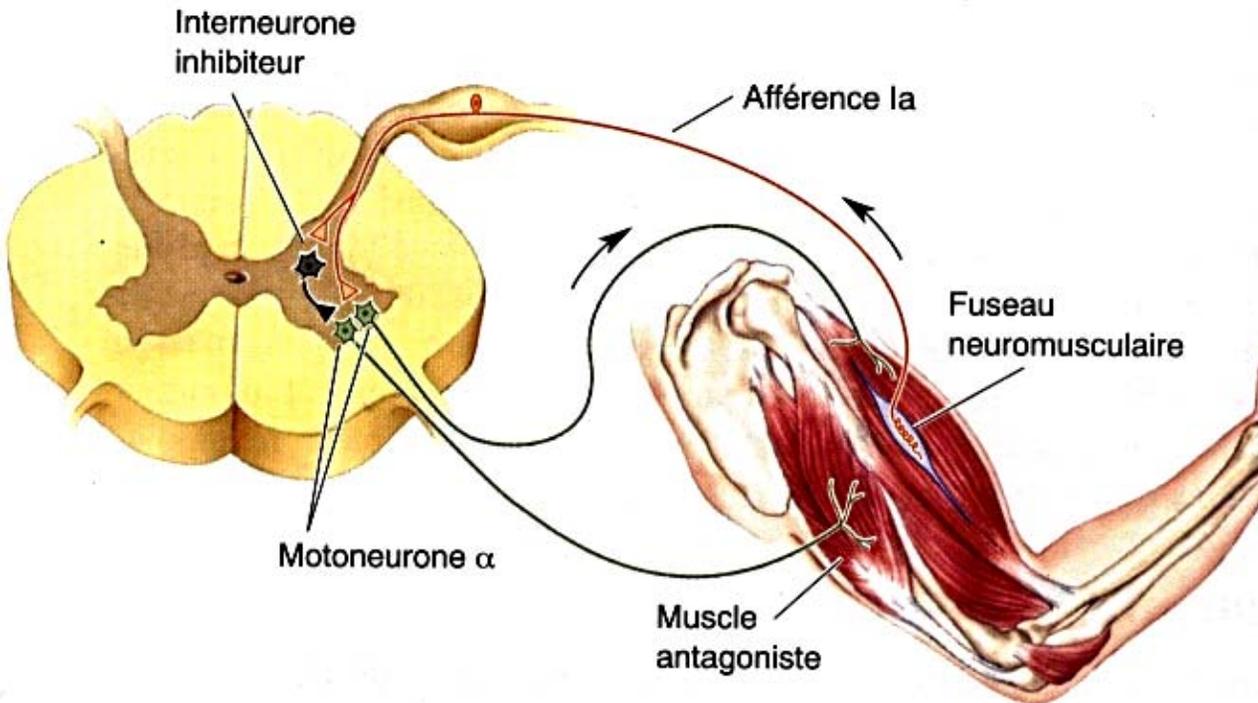
Le contrôle spinal des unités motrices

B/ Par des interneurones spinaux excitateurs ou inhibiteurs

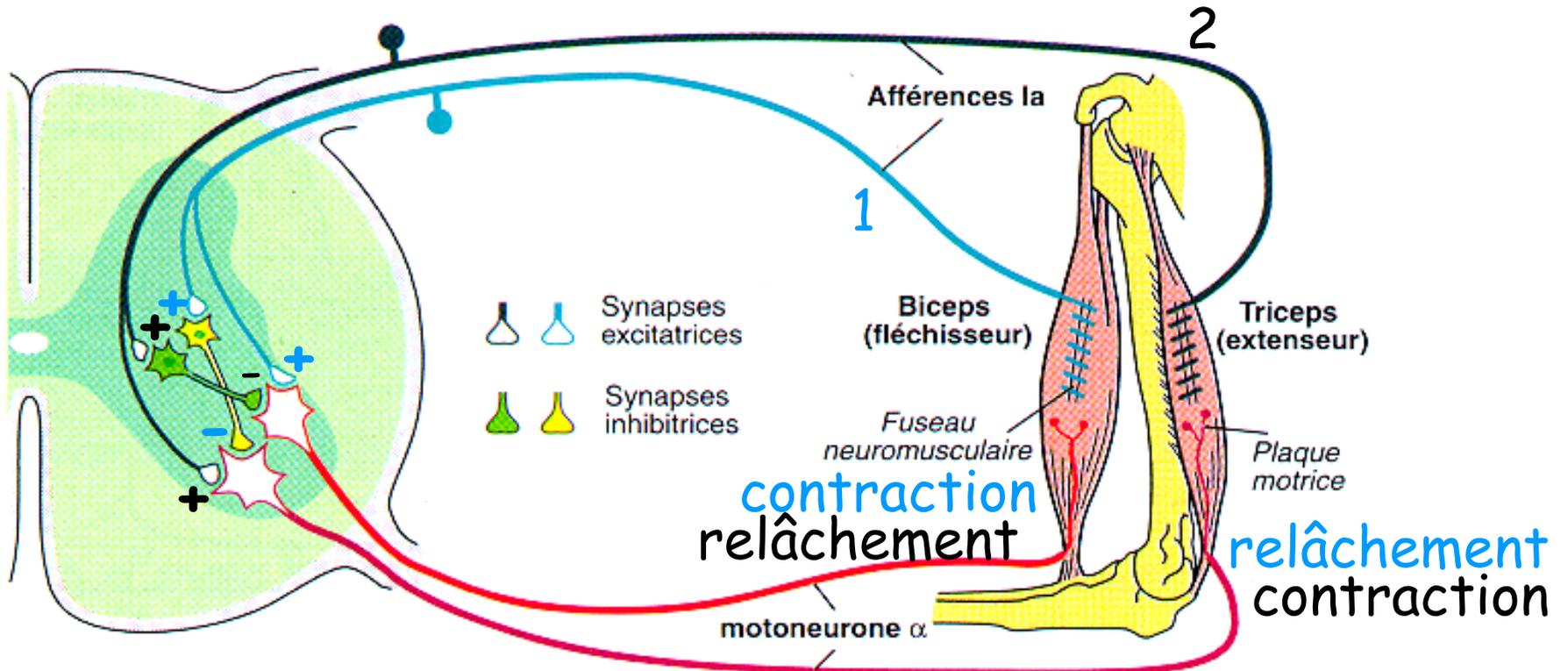
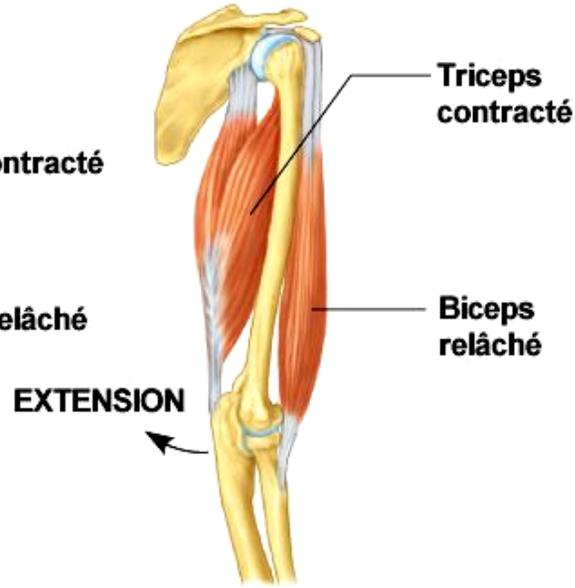
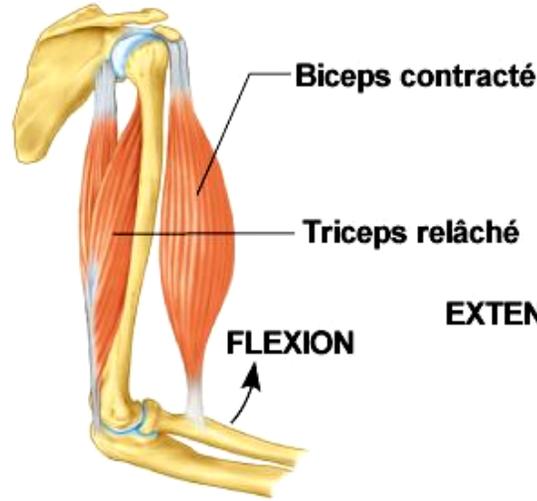
☞ L'inhibition réciproque

Les fibres Ia du muscle étiré s'articulent avec des **interneurones inhibiteurs** en contact synaptique avec les Mn α des muscles antagonistes (ici le triceps)

⇒ **relâchement des antagonistes**



MUSCLES ANTAGONISTES

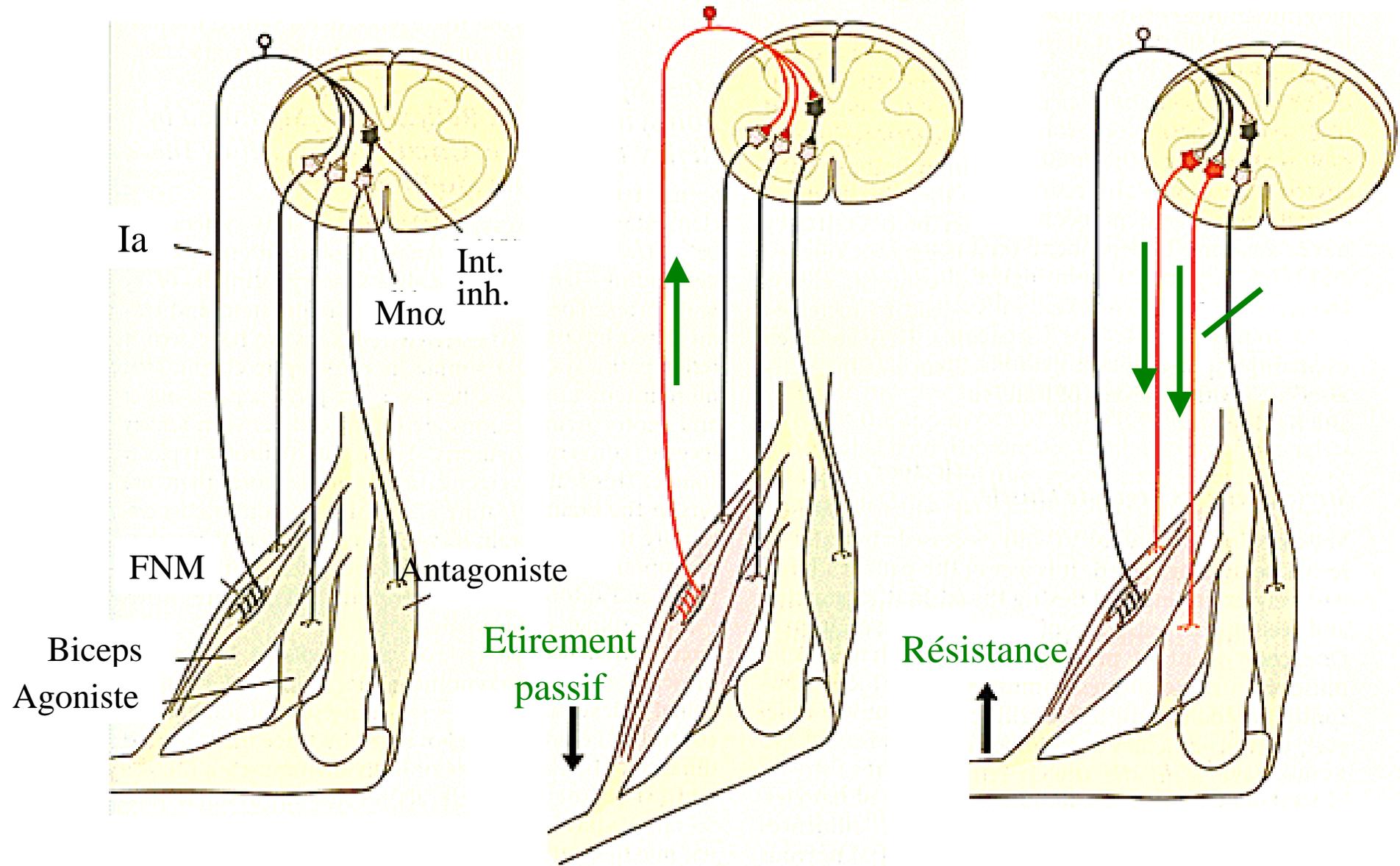


Tous les muscles squelettiques présentent cette sensibilité réflexe, particulièrement les muscles posturaux antigravitaires.

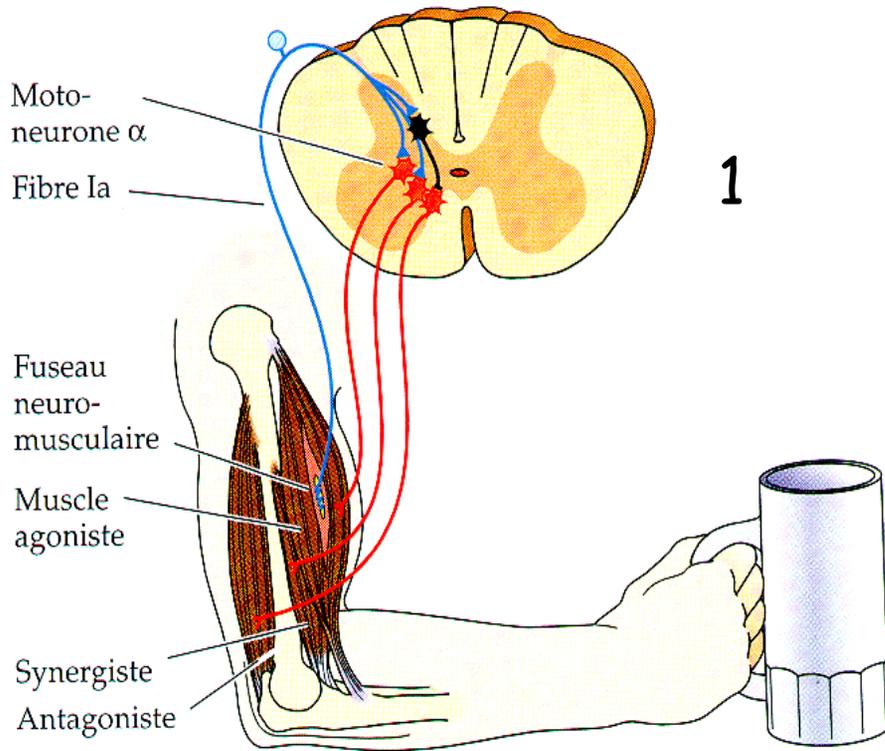
Pourquoi?

Parce que ça leur permet d'entretenir leur contraction et de corriger toute variation involontaire de façon simple.

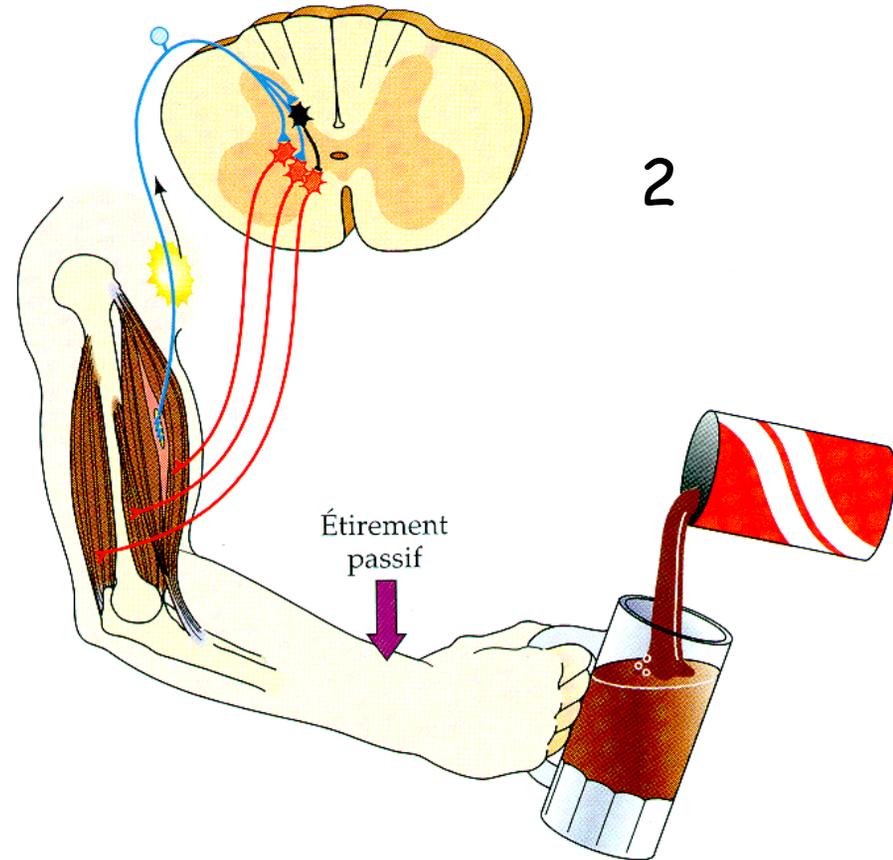
Le Réflexe myotatique et ceux qui l'accompagnent



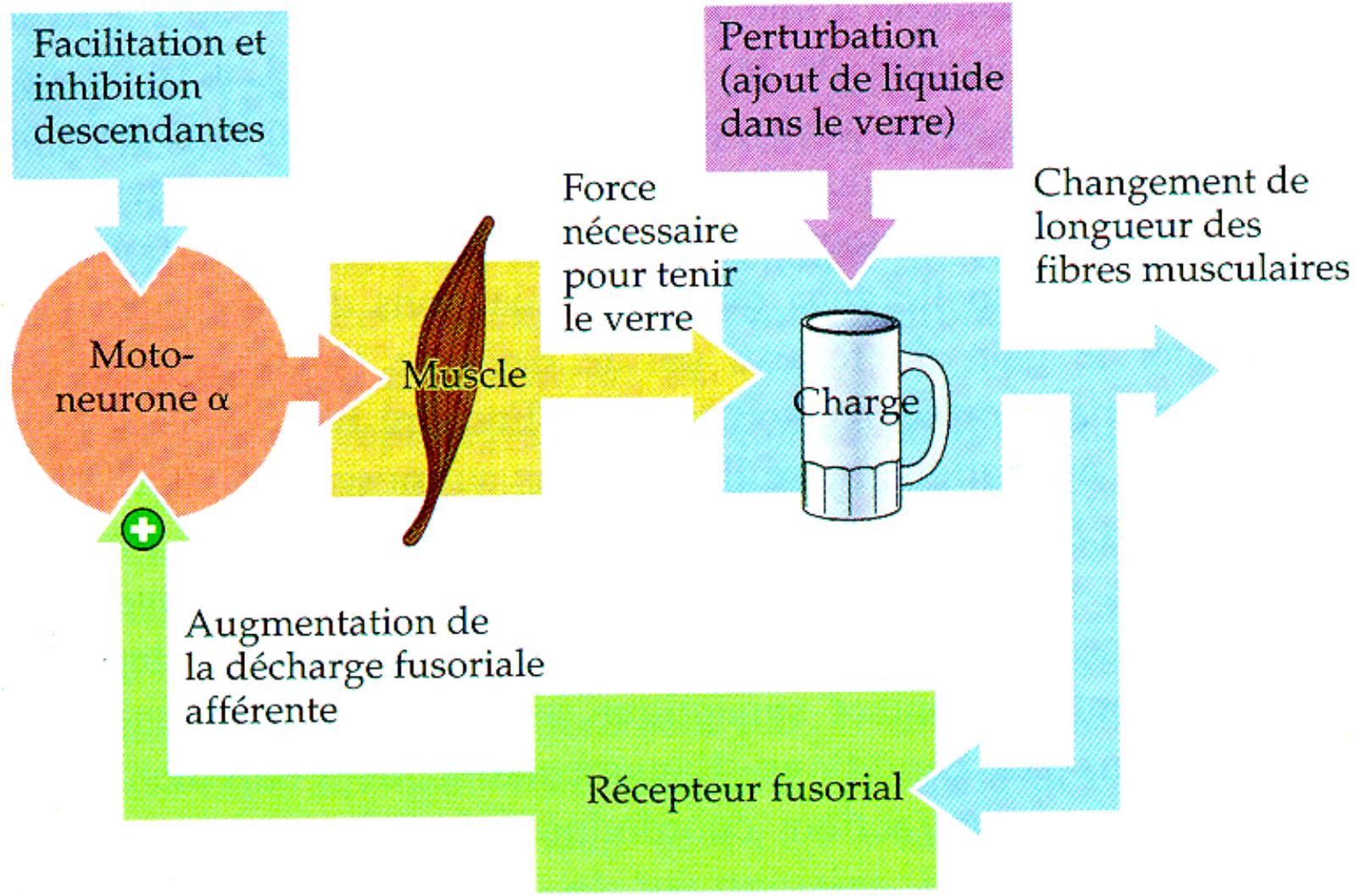
Situation



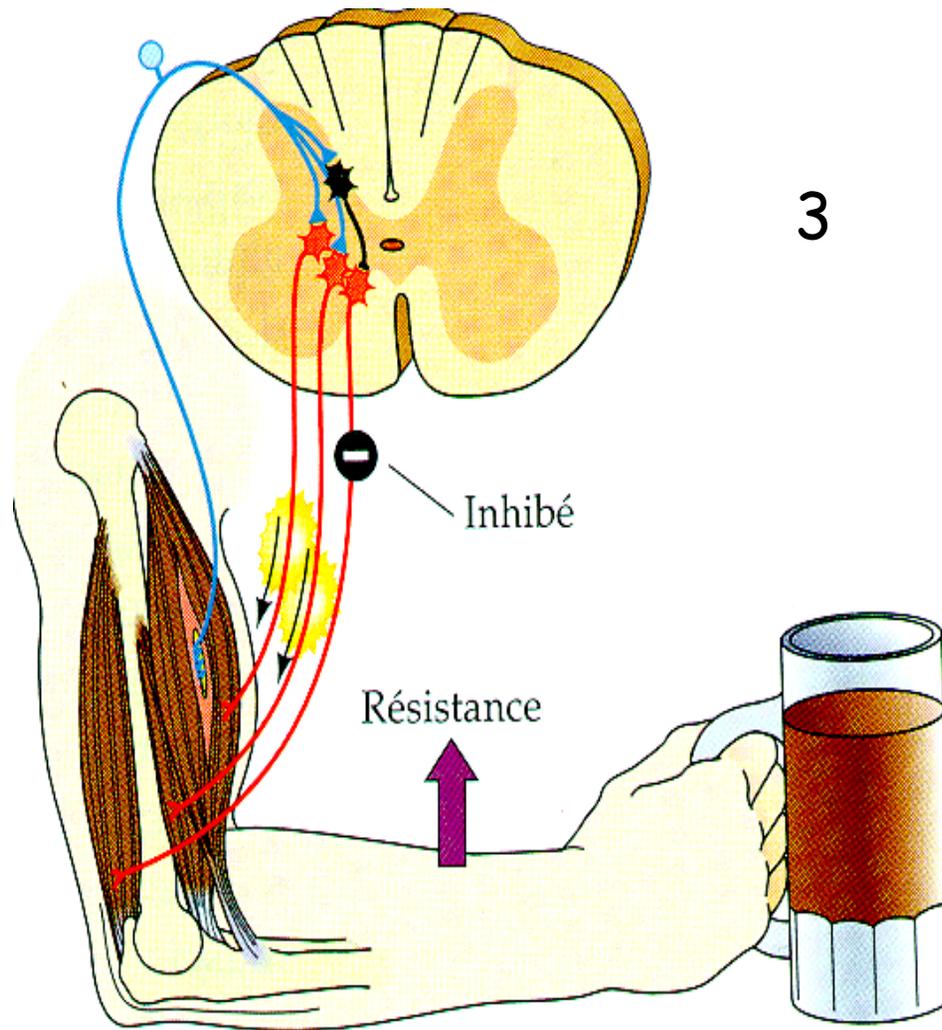
Perturbation



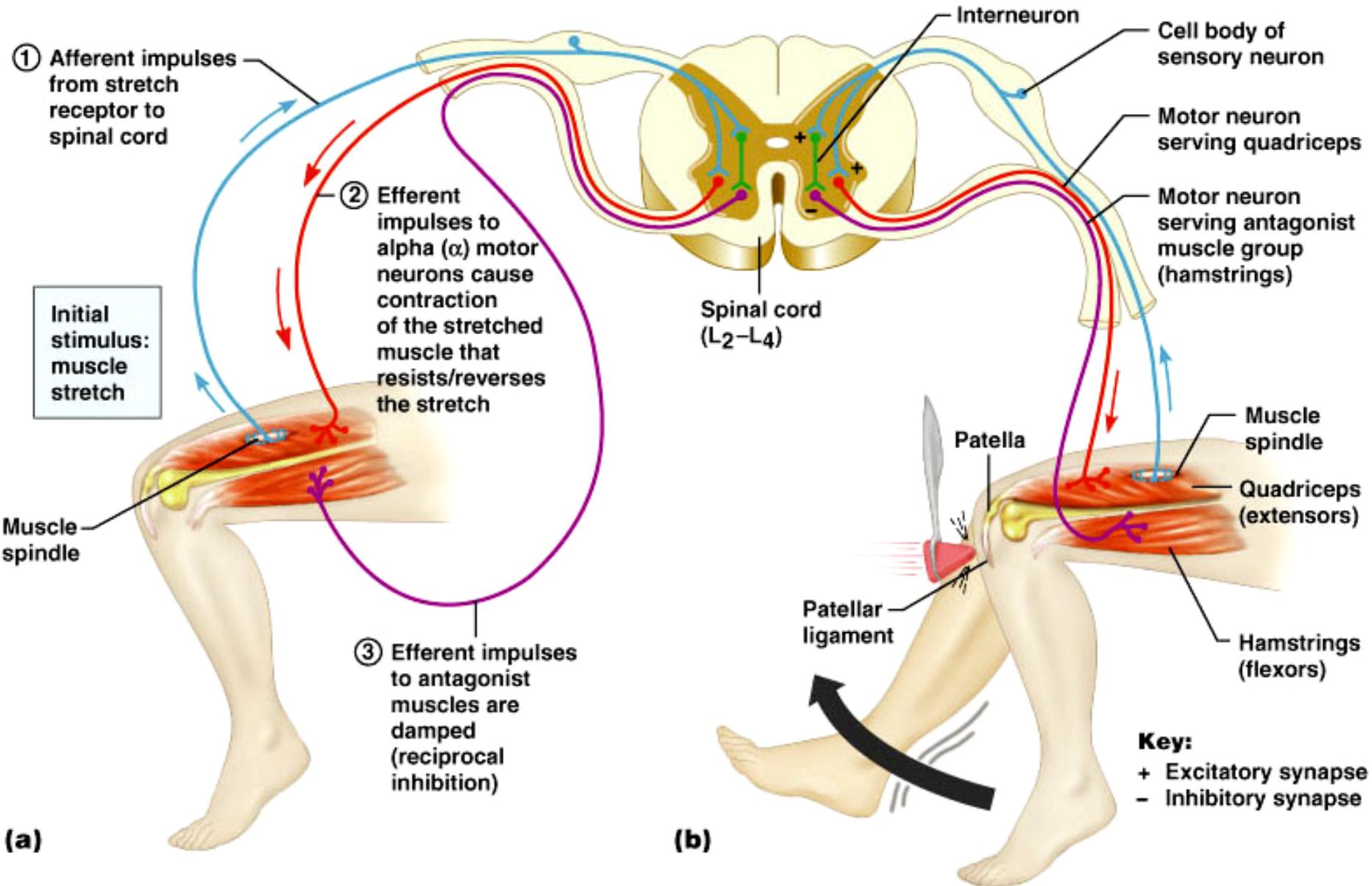
Explication



Résultat



Réflexe myotatique testé par le réflexe rotulien



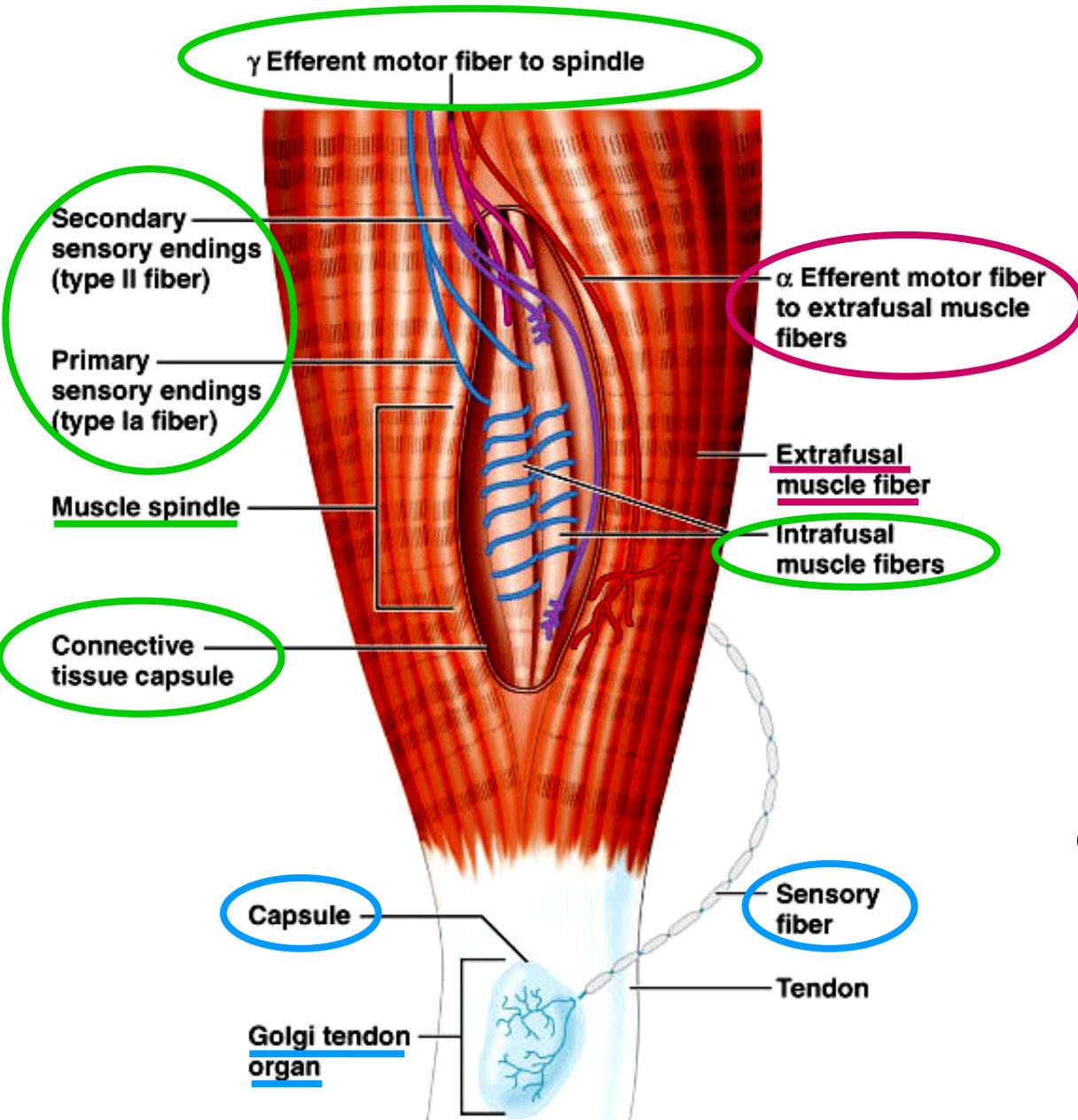
Le contrôle spinal des unités motrices

B/ Par des interneurons spinaux excitateurs ou inhibiteurs

➡ L 'inhibition réciproque

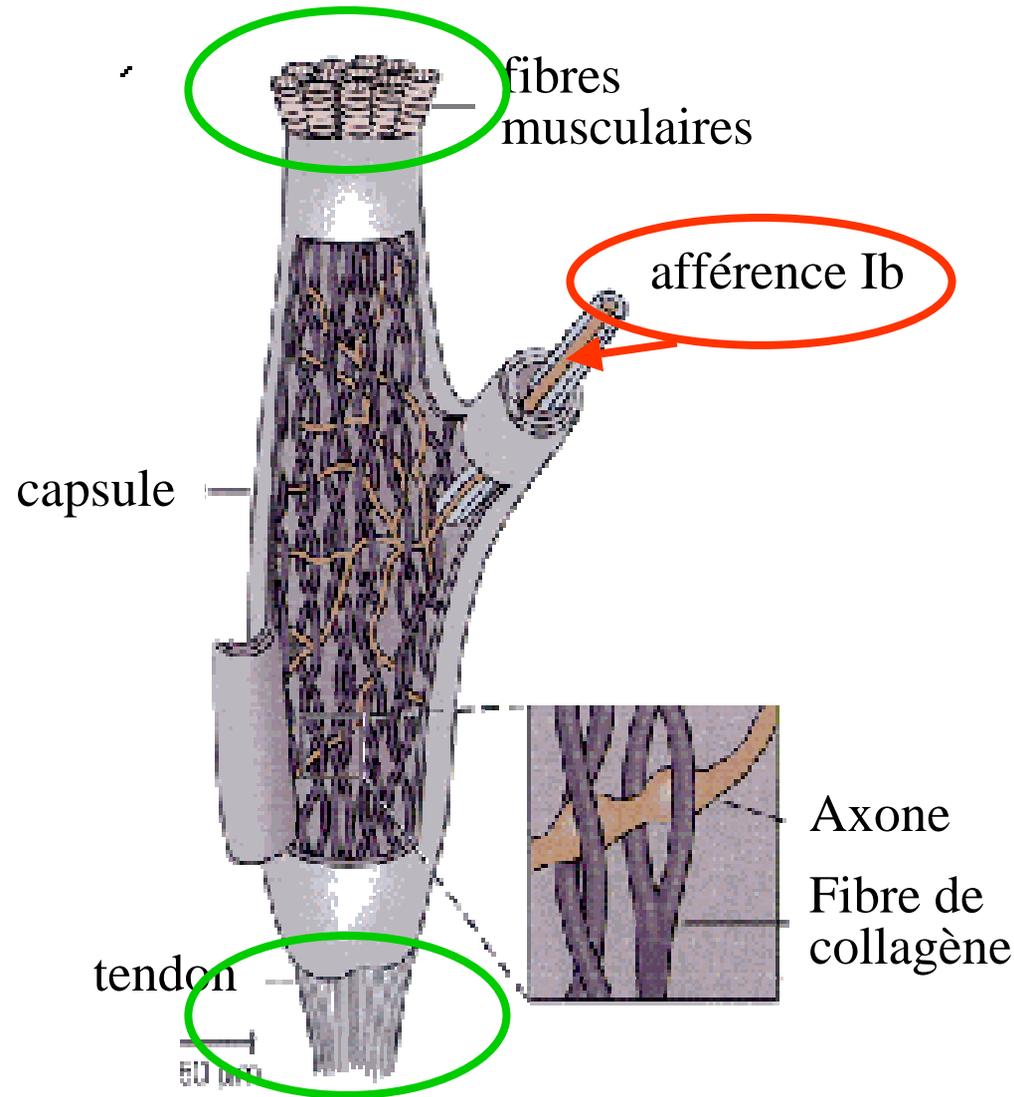
➡ Proprioception à partir des organes tendineux de Golgi

FNM et OTG



OTG : Récepteurs encapsulés présents au niveau des jonctions myotendineuses notamment.

L'OTG est constitué de faisceaux de collagène entourés par une capsule.

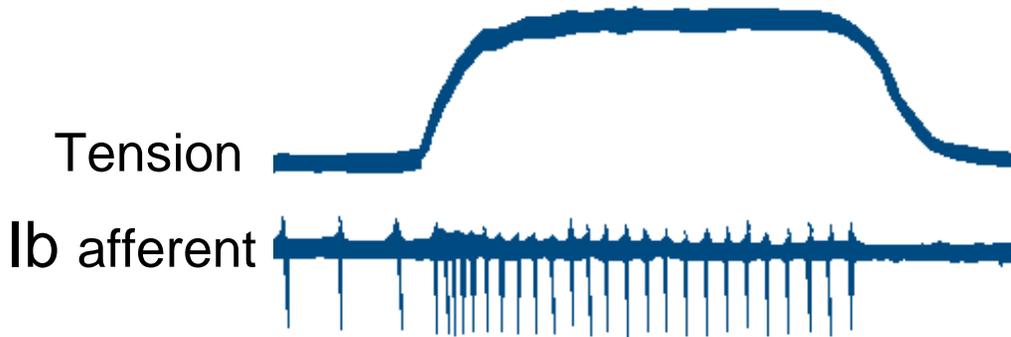
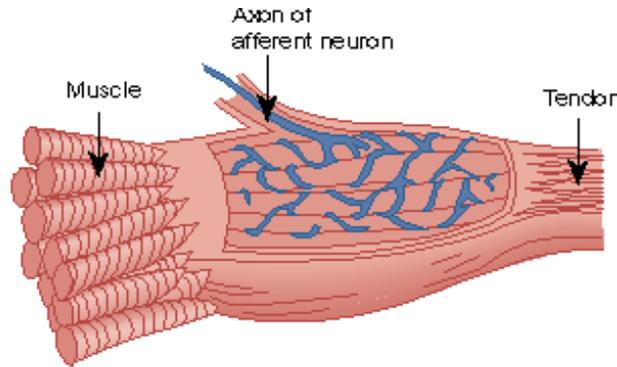


Les fibres de collagène s'insèrent :

- sur les fibres musculaires à l'une des extrémité,
- sur les aponévroses des tendons à l'autre.

L'OTG est innervé par une fibre de gros diamètre de type Ib (Vc 60-125m/sec) qui se ramifie en entrant dans la capsule et s'insinue dans les fibres de collagène.

L'OTG est un mécanorécepteur placé entre l'extrémité de fibres musculaires et le tendon.



La contraction des fibres musculaires en série

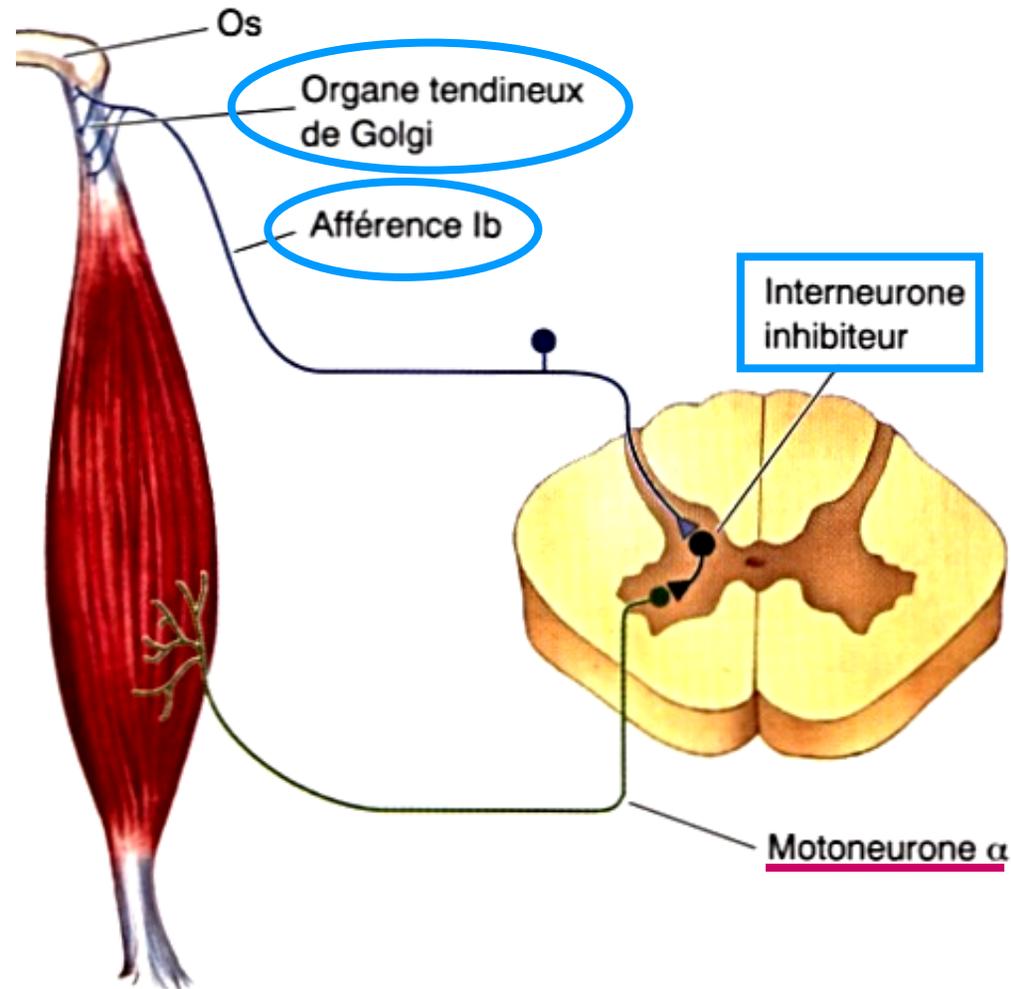
⇒ ↗ tension des fibres de collagène

⇒ compression des fibres sensorielles qui s'y entremêlent

⇒ activation (↗ de la décharge) des fibres Ib

⇒ Les OTG sont sensibles à la tension des fibres musculaires squelettiques

Arc réflexe à partir des OTG



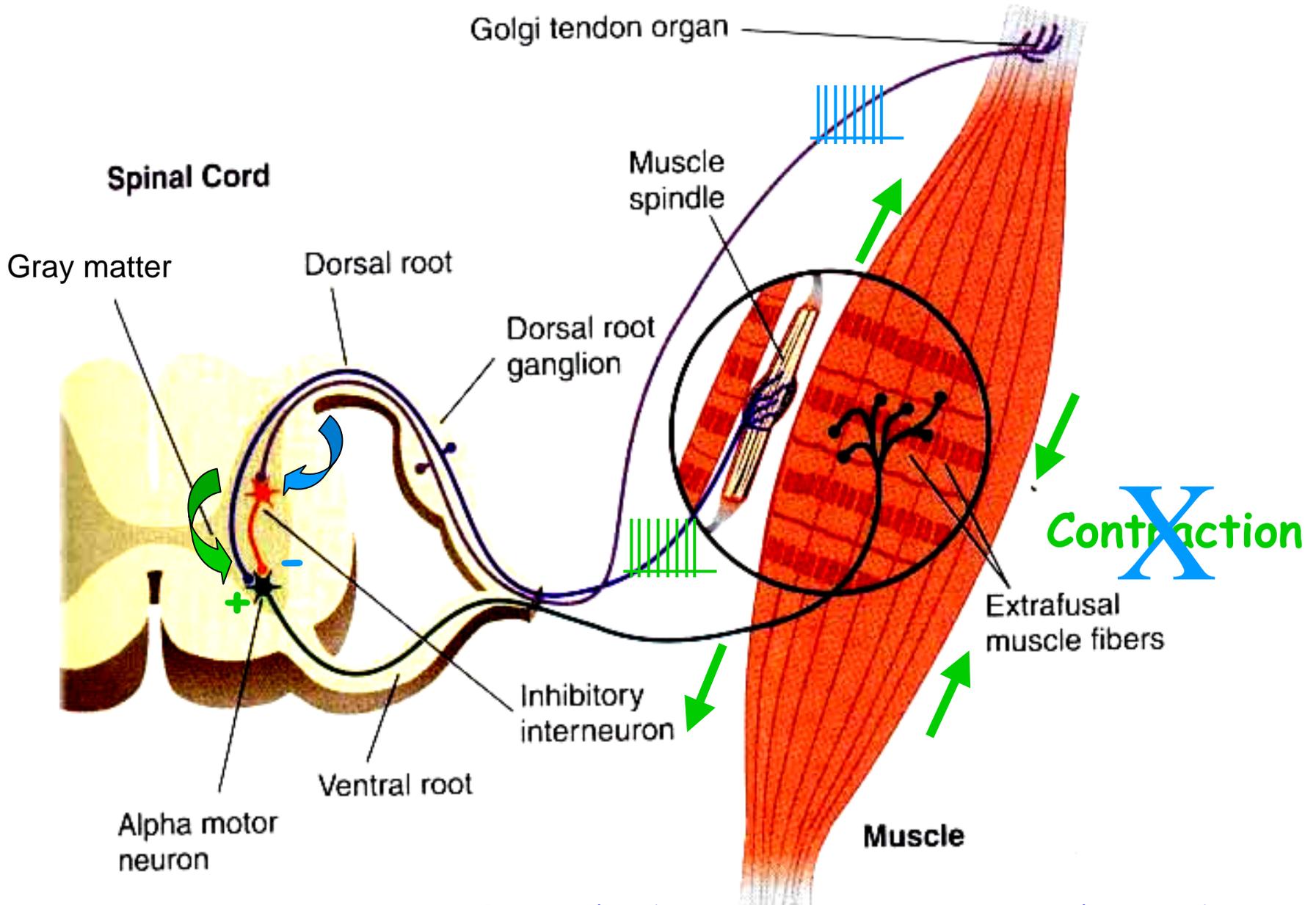
La fibre Ib parvient dans la moelle épinière et vient inhiber les Mn du muscle homonyme

⇒ Réflexe myotatique inverse ou inhibition autogénique

qui se traduit par une réduction voire une suppression de la contraction du muscle à l'étirement de son tendon.

⇒ Le réflexe myotatique inverse est donc un réflexe inhibiteur

REFLEXE MYOTATIQUE ET REFLEXE MYOTATIQUE INVERSE



Parallèlement, les fibres Ib s'articulent avec des interneurones

-inhibiteurs

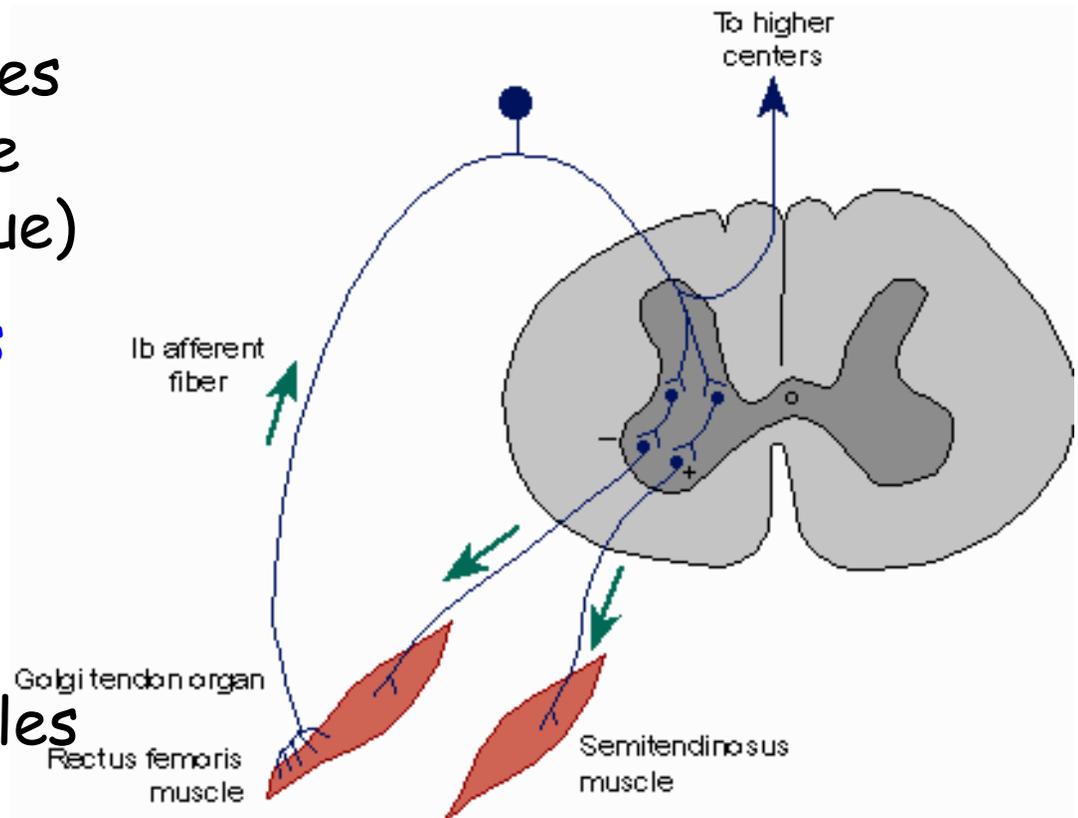
en contact avec les Mn des muscles synergiques (voie généralement disynaptique)

⇒ Inhibition des muscles agonistes

-excitateurs (une voie polysynaptique)

en contact avec les muscles antagonistes

⇒ Excitation des muscles antagonistes



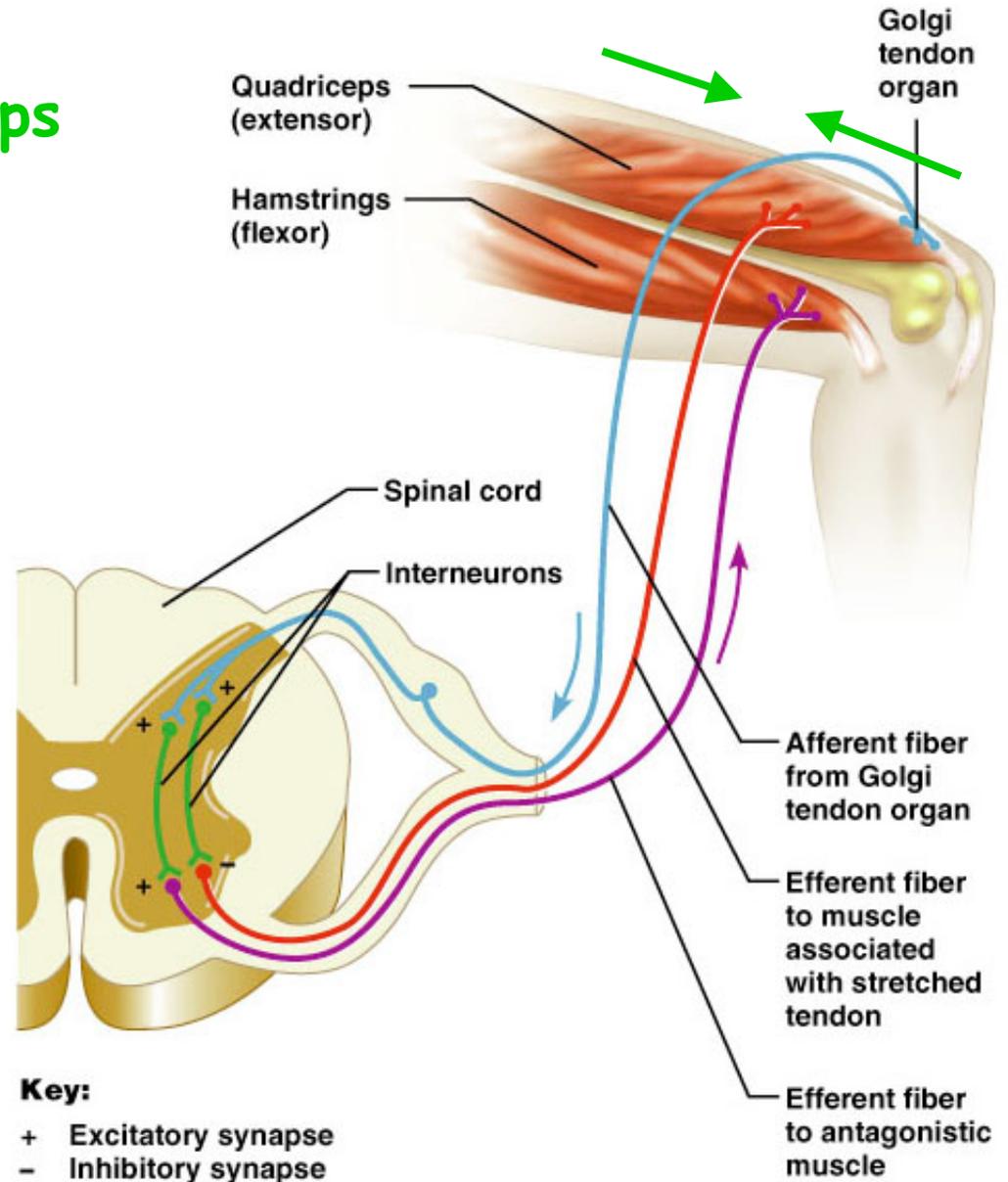
LE REFLEXE MYOTATIQUE INVERSE ET L'INNERVATION RECIPROQUE

Contraction du quadriceps

⇒ augmentation de tension dans tendon rotulien sur lequel il s'attache

⇒ stimulation des OTG

⇒ relâchement du quadriceps (extenseur) et contraction des muscles de la loge post de la cuisse (fléchisseurs)



Le contrôle spinal des unités motrices

B/ Par des interneurones spinaux excitateurs ou inhibiteurs

- ➡ L'inhibition réciproque
- ➡ La proprioception à partir des organes tendineux de Golgi
- ➡ Les récepteurs extéroceptifs : les AFR, afférences aux réflexes de flexion

Les **AFR** sont des fibres sensibles fines d'origine

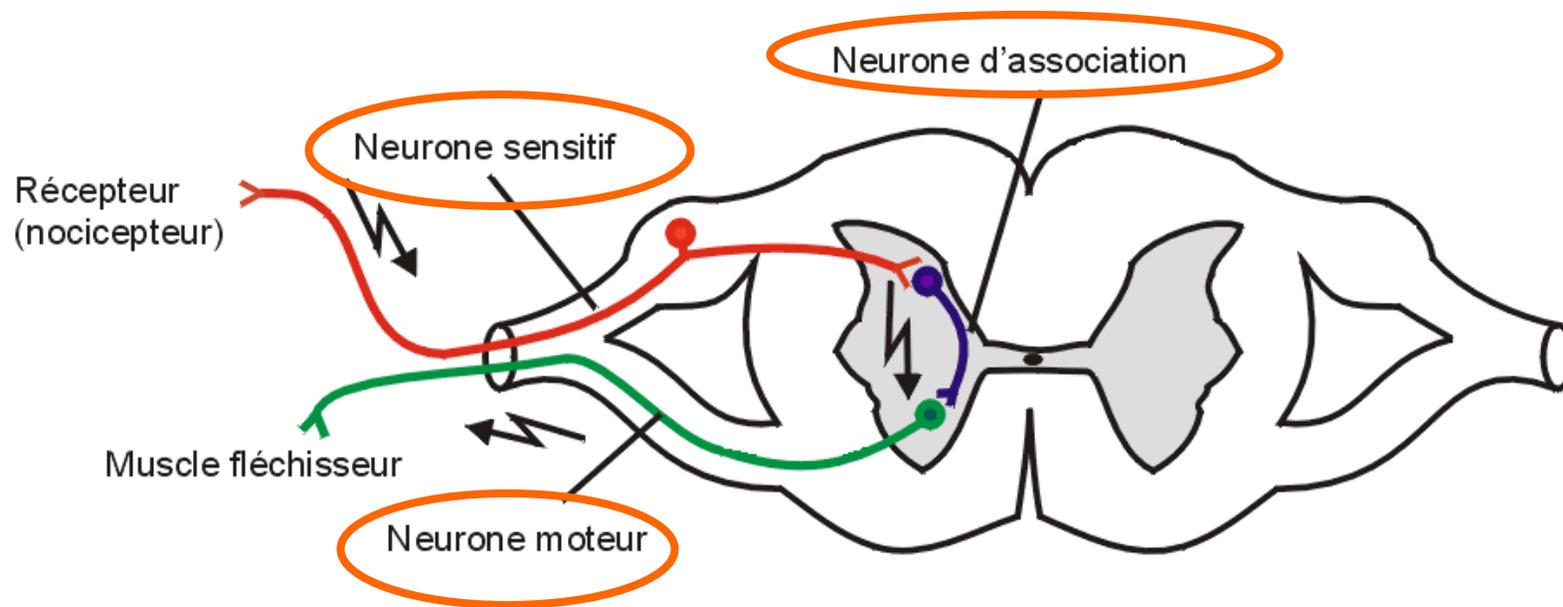
- cutanée (A gamma et C)

- ou musculaires (III et IV)

émanant généralement de récepteurs nociceptifs, qui arrivent directement dans la corne dorsale de la moelle épinière et font synapse dans la substance grise.

Elles sont à l'origine de réflexes complexes beaucoup plus **lents** que le réflexe myotatique car **impliquant de nombreuses synapses**.

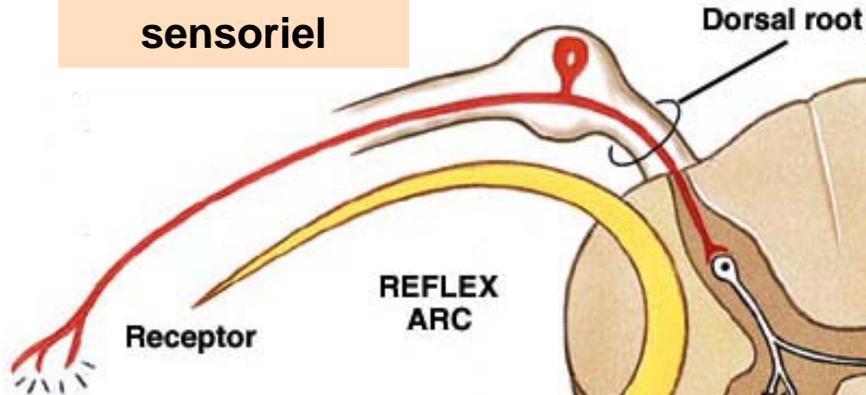
Arc réflexe à partir des AFR comporte au moins 3 neurones



1. Arrivée du stimulus et activation du récepteur

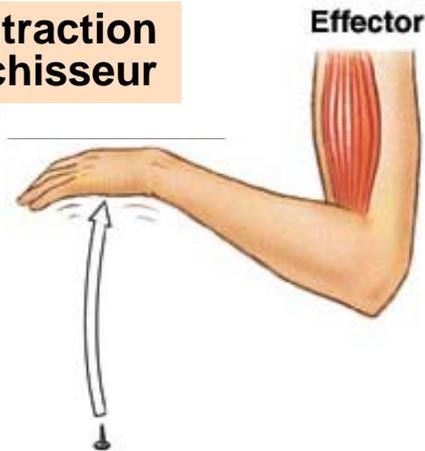


2. Activation du neurone sensoriel



Transmission de l'information aux centres supérieurs par une collatérale ⇒ sensation

5. Contraction du fléchisseur



4. Activation des Mn α



3. Processus intégratif dans le SNC

Le Réflexe ipsilatéral de flexion

Apparaît comme une légère flexion articulaire ipsilatérale de courte durée, en réponse à une stimulation tactile légère de l'extrémité du membre

⇒ Réflexe ipsilatéral de flexion.

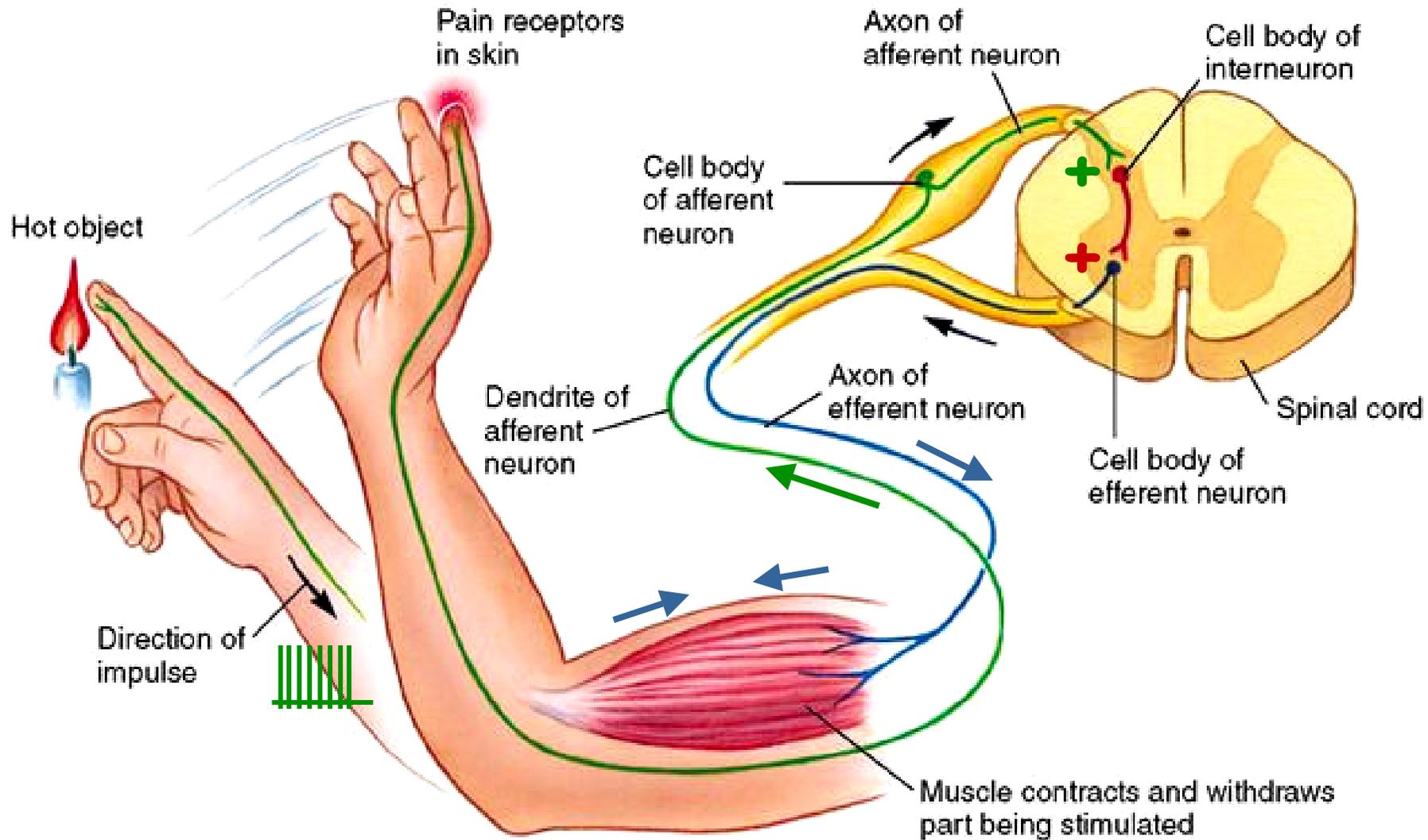
Son but:

éloigner de façon automatique du stimulus la partie du corps menacée.

D'autres effets peuvent se surajouter selon que le stimulus réflexogène est léger, intense ou prolongé.

⇒ quand la stimulation est forte, un retrait complet du membre apparaît.

LE REFLEXE IPSILATERAL DE FLEXION



C 'est donc un réflexe de retrait, de défense

qui affecte la musculature squelettique en réponse à des stimuli généralement douloureux ou agressifs

- **réels** (quand on se pique ou se brûle légèrement)
- **ou perçus** (flexion du tronc si quelqu 'un veut vous donner un coup de poing dans l'abdomen)

Connections des AFR

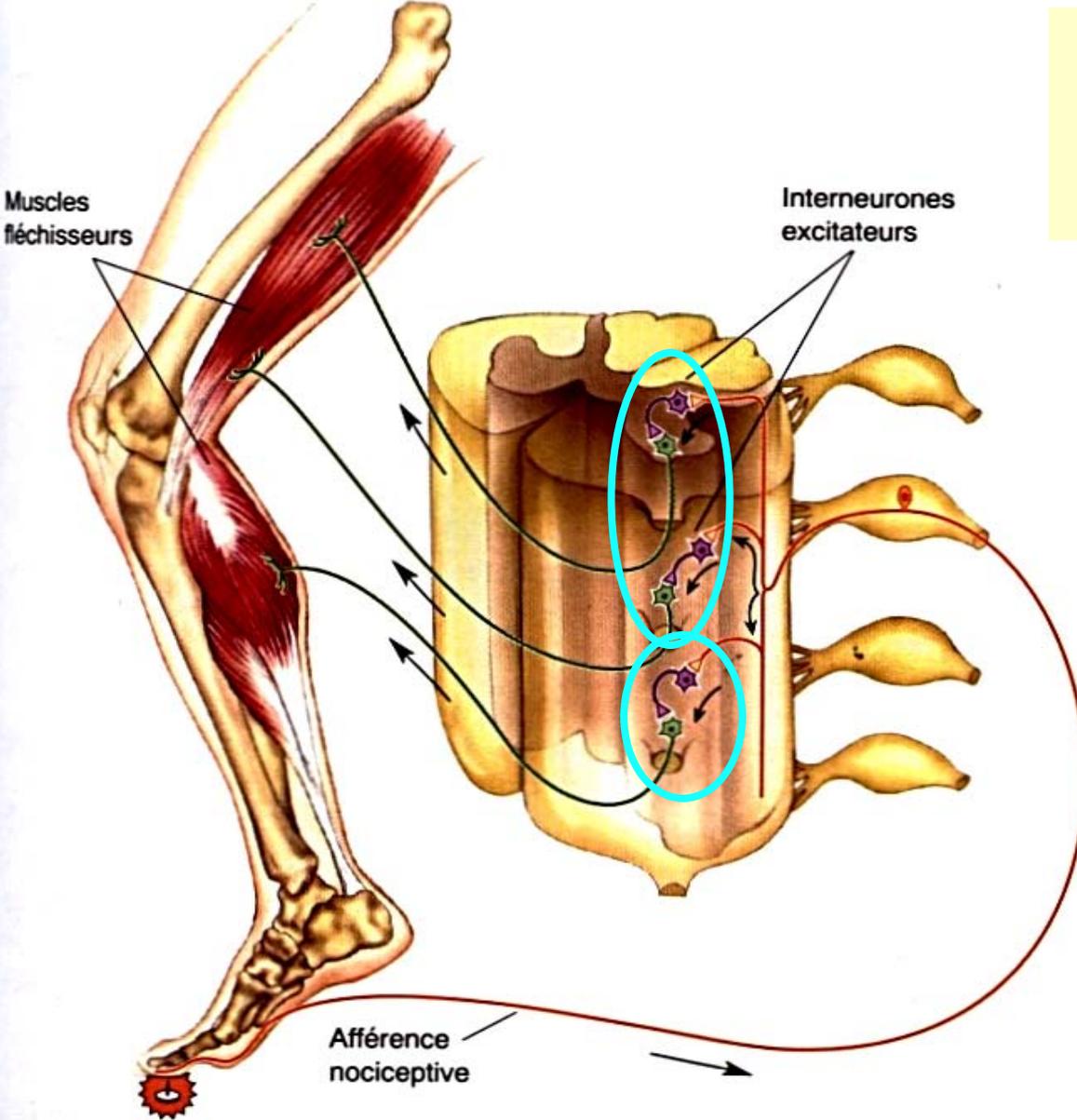
- **indirectes excitatrices** avec les Mn des muscles fléchisseurs du membre stimulé,
- **indirectes inhibitrices** avec les extenseurs du même membre

Le Réflexe de flexion est polysynaptique.

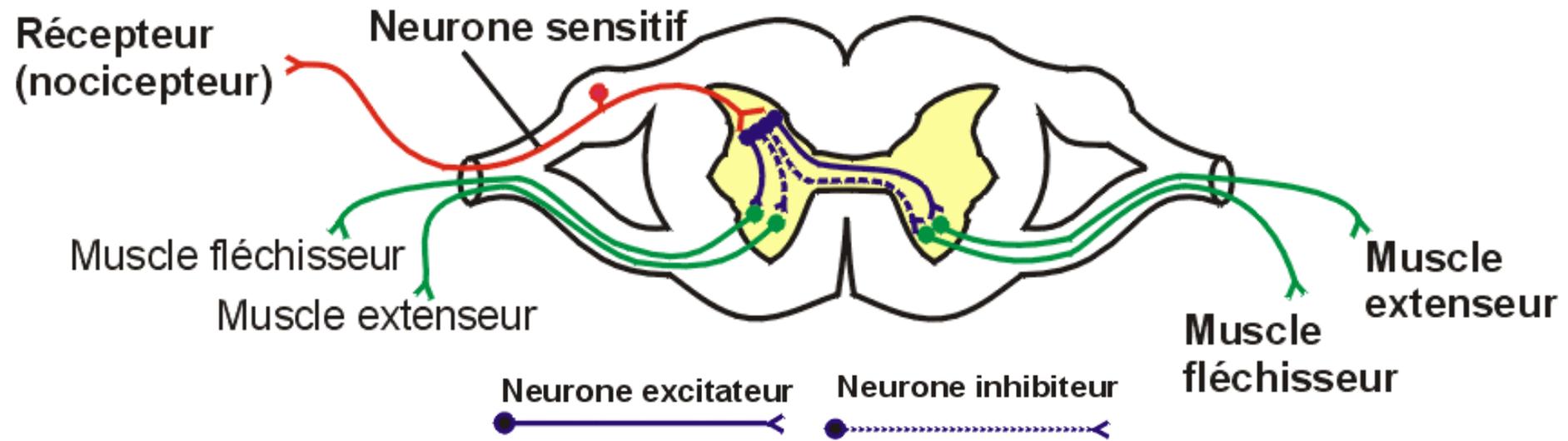
Il comporte au moins 1 interneurone (généralement plus) ⇒ latence supérieure à 2.5-3 msec

Les mouvements engendrés sont donc fonction de l'intensité et de la durée de la stimulation (contraction et durée de contraction ↗ avec l'intensité)

LE REFLEXE DE FLEXION
FAIT INTERVENIR
PLUSIEURS SEGMENTS DE
MOELLE EPINIÈRE



Les interneurones
intercalés entre la
voie afférente et les
Mn susceptibles de
fonctionner comme
voie efférente
assurent la réponse
en fonction de
l'intensité du
stimulus (cf.réseau)

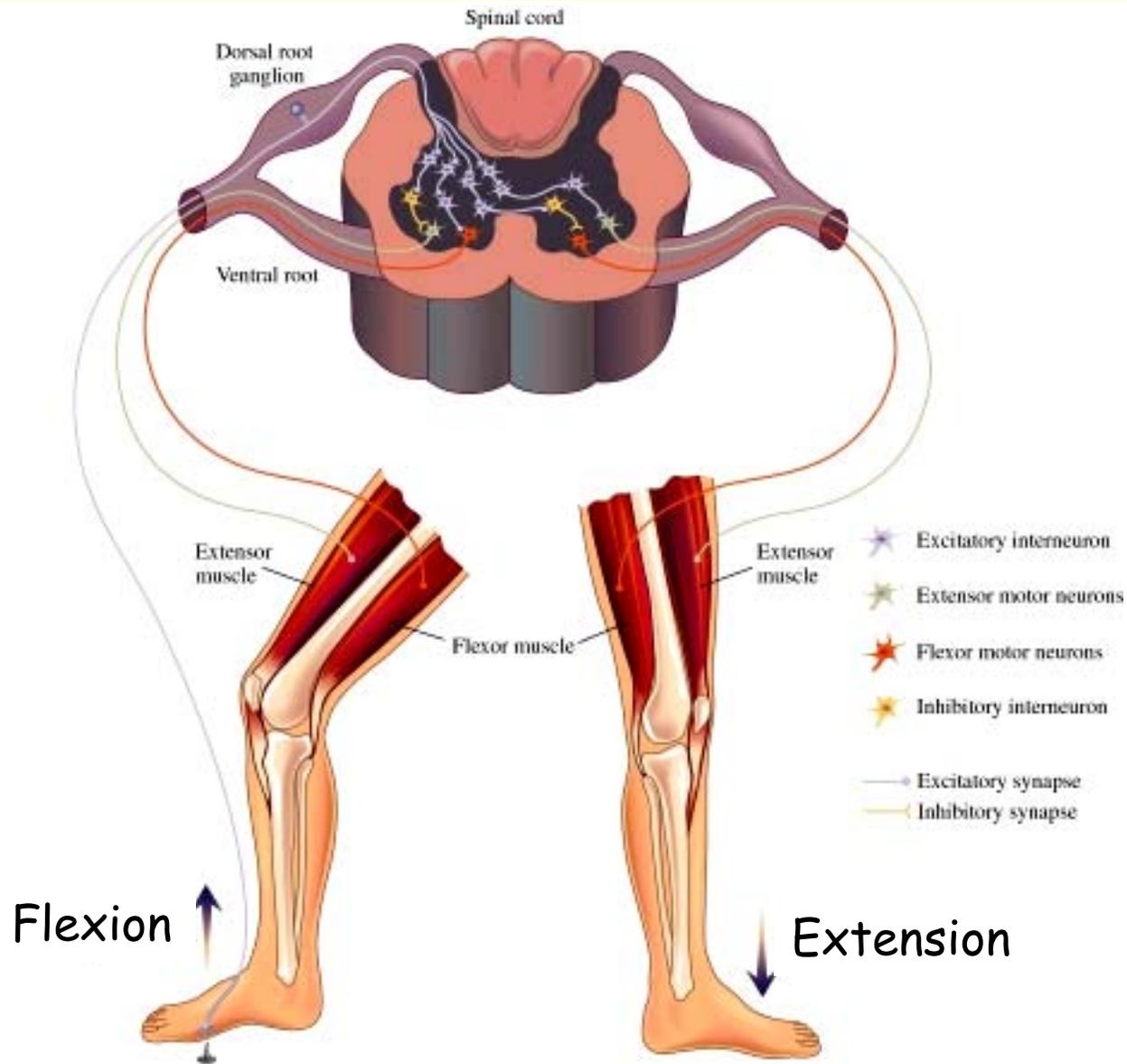


Souvent les réflexes ne se limitent pas au membre stimulé et la flexion ipsilatérale s'accompagne d'une extension controlatérale.

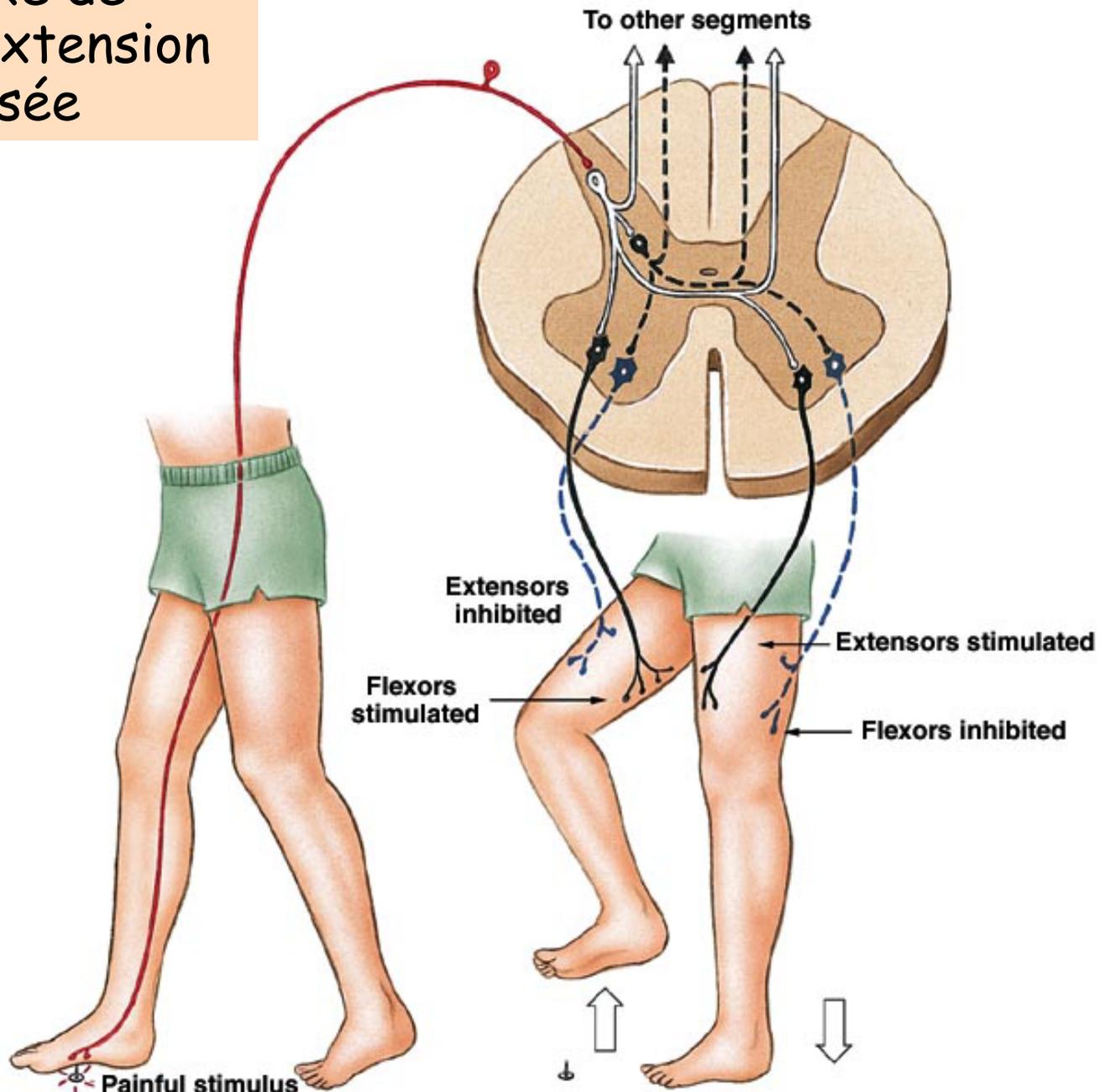
L'arc réflexe fait intervenir une chaîne d'interneurones qui excitent les extenseurs et inhibent les fléchisseurs contralatéraux

C'est le réflexe de flexion-extension croisée

LE REFLEXE DE FLEXION-EXTENSION CROISEE

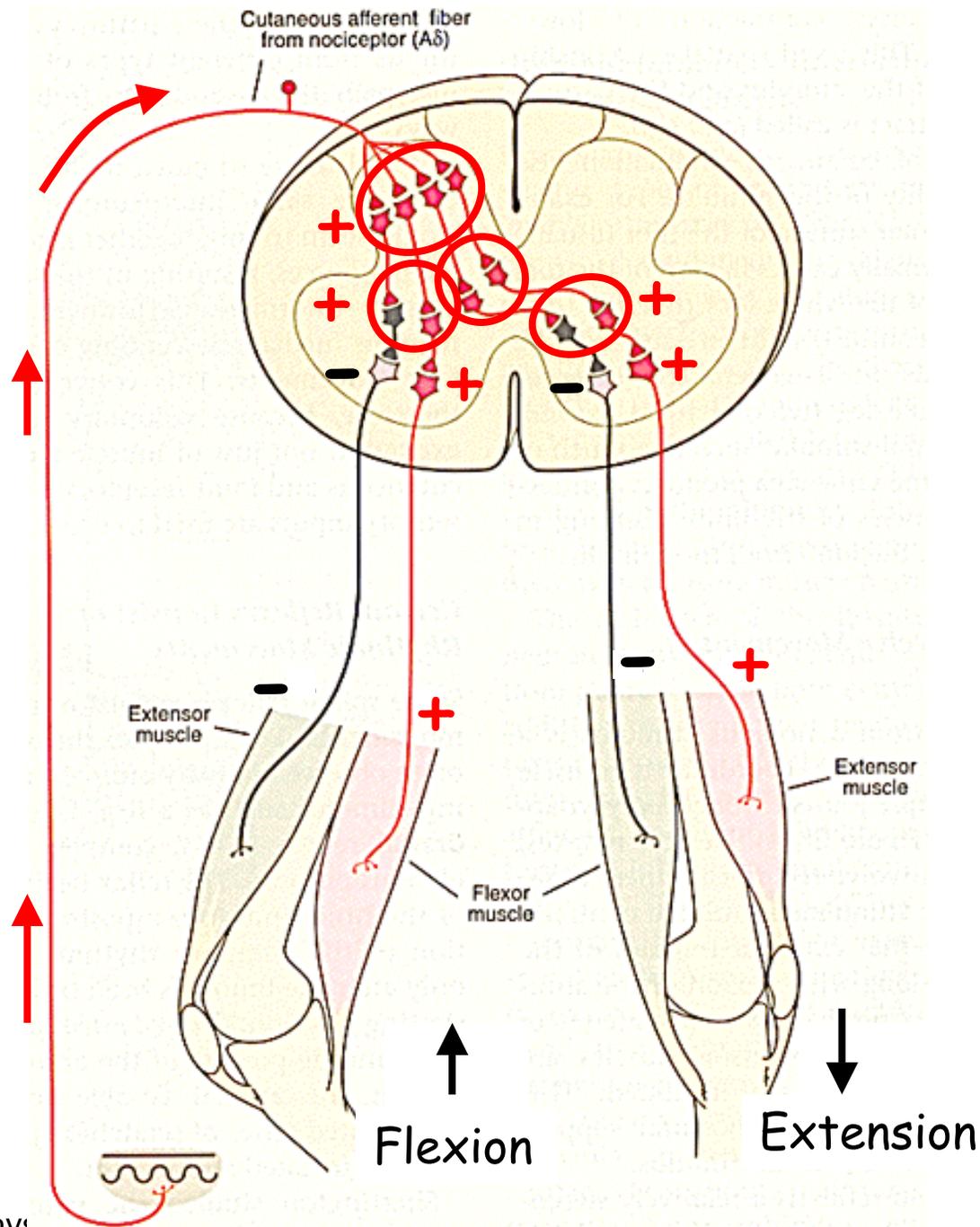


Réflexe de flexion/extension croisée



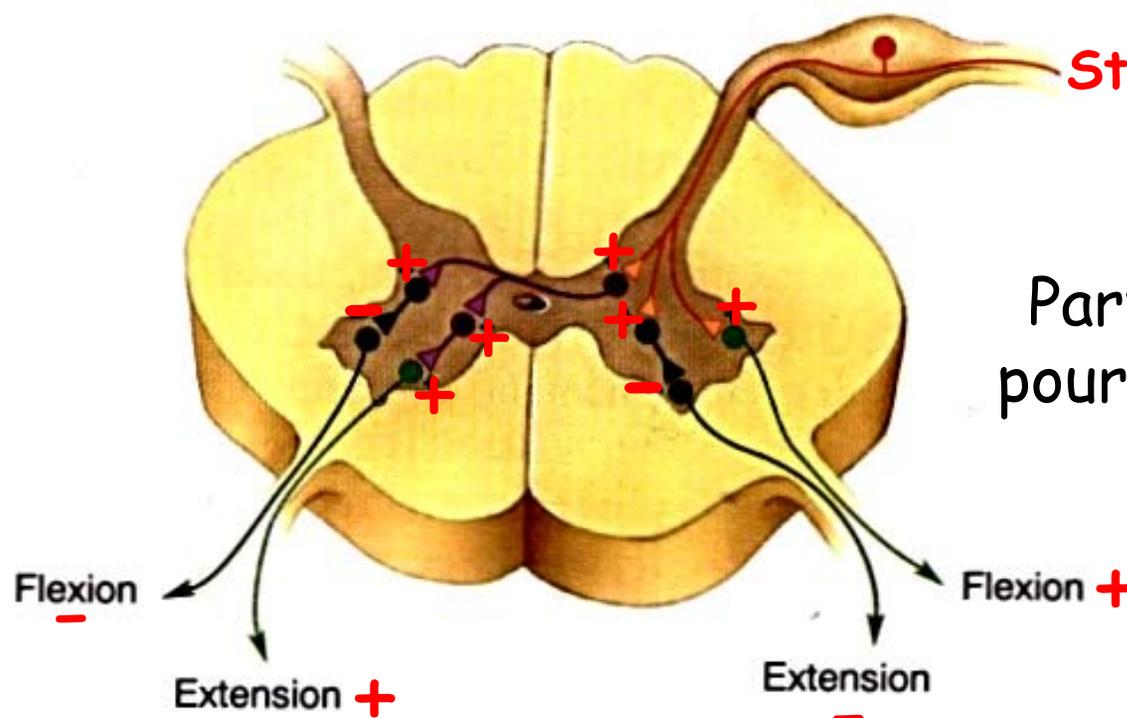
Réflexe de flexion/extension croisée

Membres inférieurs



Réflexe de flexion/extension croisée

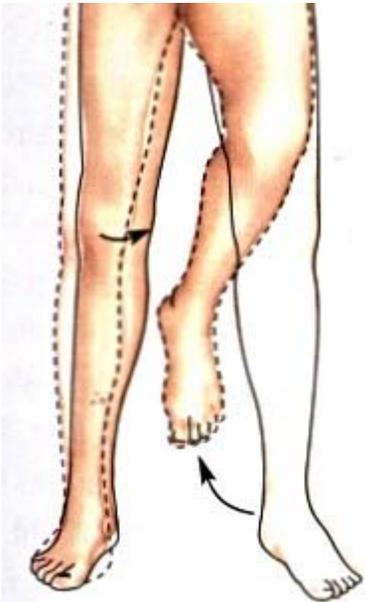
Particulièrement important pour la maintien de l'équilibre



⇒ Flexion homolatérale (-quadriceps, + muscles loge post de la cuisse)

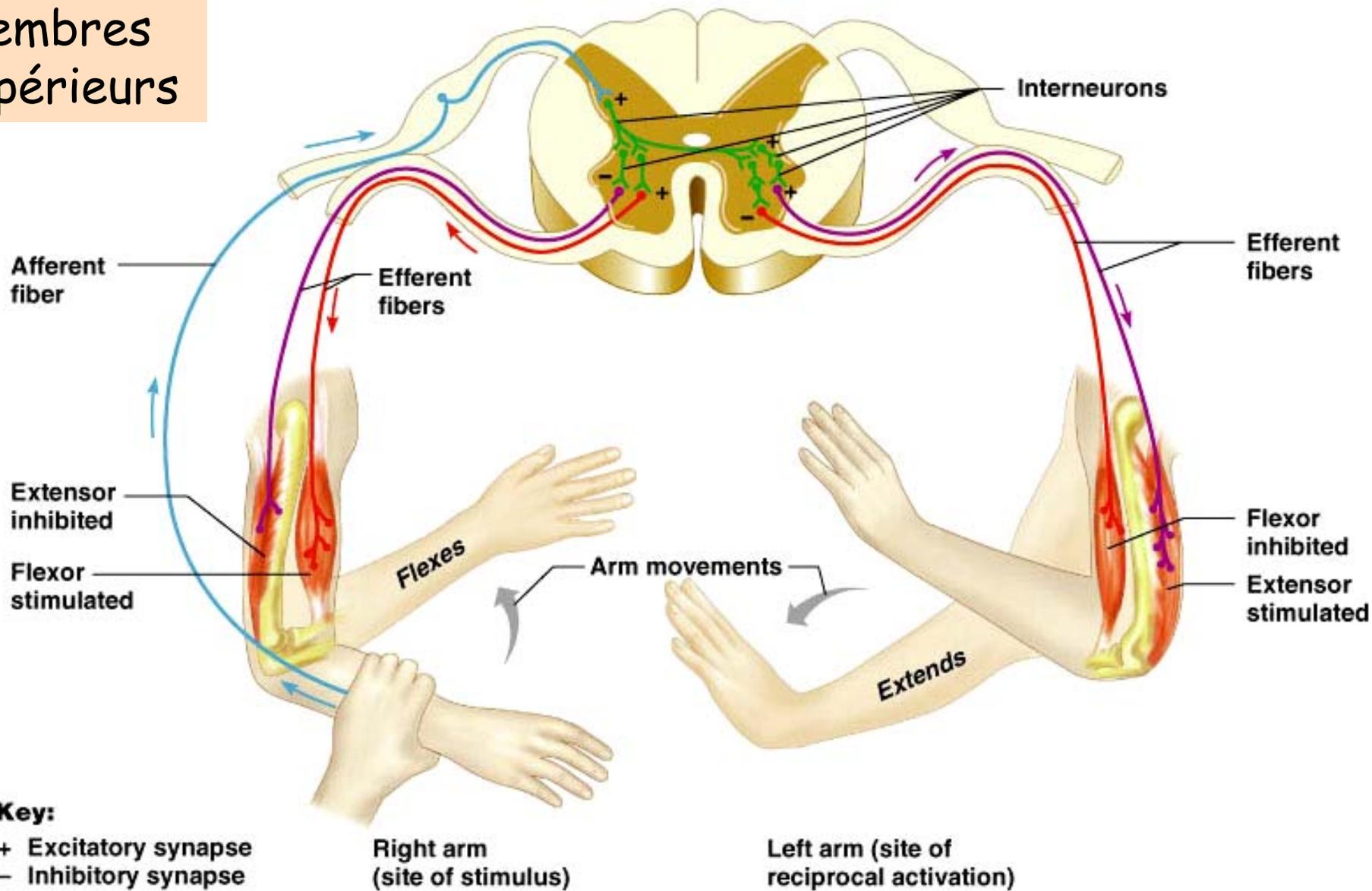
⇒ Extension controlatérale (+quadriceps, - muscles loge post de la cuisse)

pour supporter le transfert de la masse on crée un point d'appui contribuant au maintien de la position debout.



Réflexe de flexion/extension croisée

Membres supérieurs



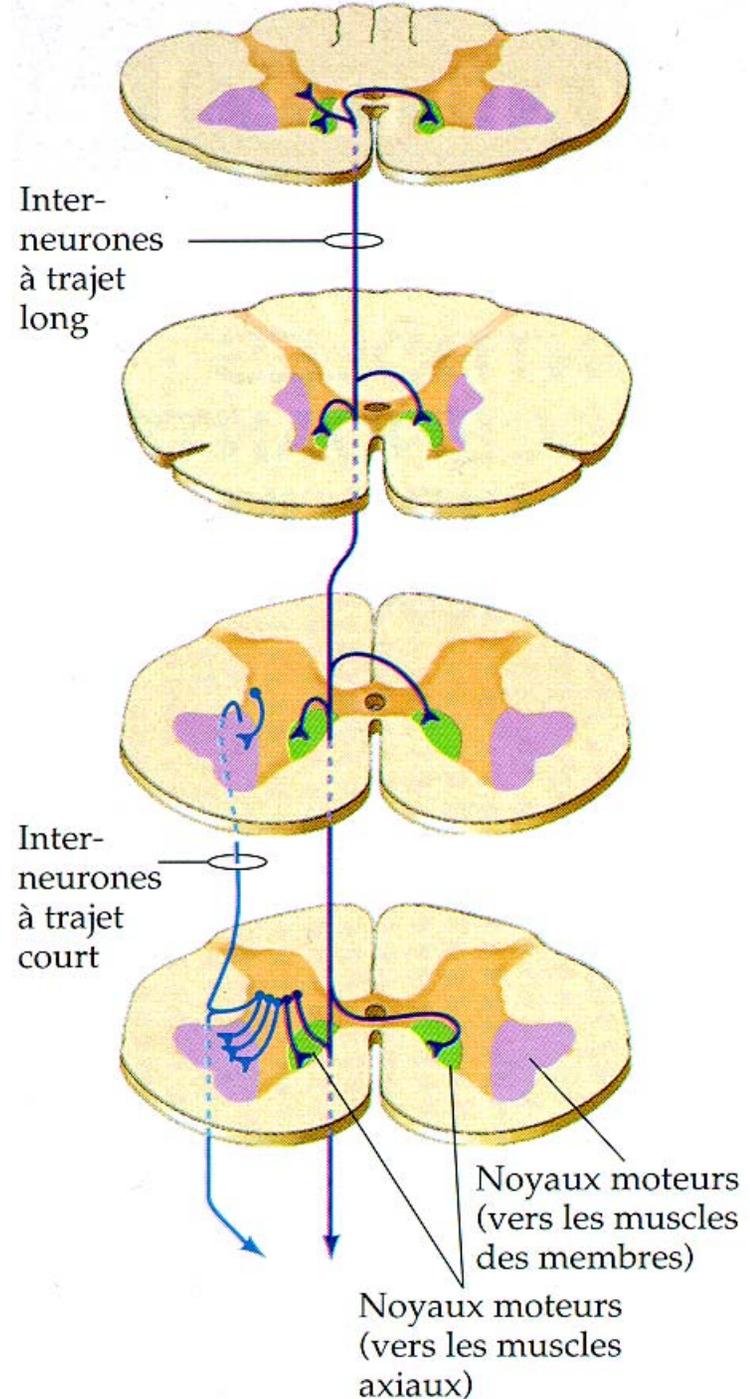
Il peut y avoir **généralisation du réflexe à l'ensemble des autres membres**

(toujours pour maintenir la posture nécessaire à la flexion du membre stimulé)

⇒ ces réflexes intéressent alors un très grand nombre de muscles et d'articulations

⇒ les arcs réflexes font intervenir de **nombreux segments de moelle épinière**

Car il existe des neurones spinaux qui établissent des connexions longitudinales à + ou - longue distance d'un segment médullaire à l'autre, sans jamais sortir de la ME (cf. S1-U1-Phy1).



Les réflexes à partir des AFR

☞ sont pour la plupart des réflexes de protection

☞ conduisent à la réalisation de mouvements coordonnés

Les interneurones intercalés dans les voies réflexes, tout comme les Mn, sont soumis à **l'influence des voies descendantes supraspinales** qui peuvent moduler l'efficacité de chaque arc réflexe.

Nous avons vu que les afférences des Mn α proviennent:

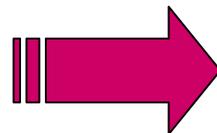
☞ **directement des neurones des ganglions sensoriels**

☞ **d'interneurones spinaux**

excitateurs ou inhibiteurs, faisant partie de circuits impliqués dans les programmes moteurs spinaux.

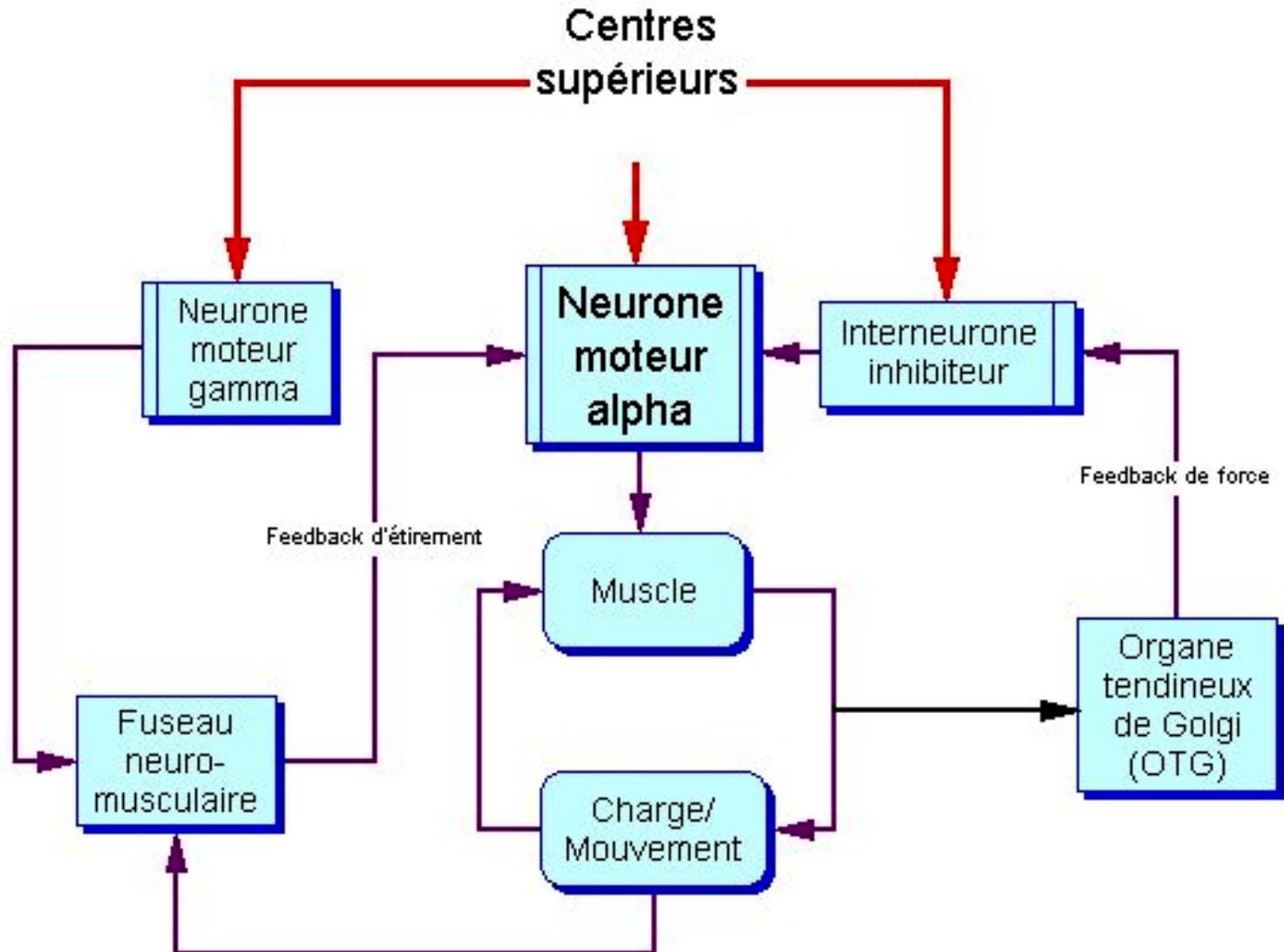
Elles proviennent aussi : **Source 3**

☞ **des niveaux supra spinaux**, notamment les neurones moteurs du cortex moteur cérébral



Le contrôle spinal des unités motrices

C/ Par les niveaux supra spinaux



Dans le réflexe myotatique, l'inhibition réciproque est réalisée par des collatérales d'une même afférence.

Les informations descendantes supra spinales utilisent ce type de circuit pour prendre le pas sur les réflexes myotatiques.

1. Vous commandez volontairement la flexion du coude
2. L'action résultante sur les muscles antagonistes extenseurs (étirement) devrait s'opposer à la flexion.
3. Ce n'est pas le cas car les voies descendantes qui activent les Mn alpha des fléchisseurs activent des interneurones inhibiteurs en contact avec le Mn alpha des extenseurs.

Modélisation de circuits neuronaux susceptibles de rendre compte de l'alternance

flexion-extension au cours de la locomotion

