



Un test couramment effectué par le médecin, est celui du **réflexe achilléen ou du réflexe rotulien**. Il s'agit d'exercer un choc léger sur le tendon d'Achille ou le tendon rotulien. Ce stimulus engendre une **réponse comportementale innée, involontaire, stéréotypée** et immédiate : un **réflexe** qui consiste en la contraction du muscle étiré (respectivement soléaire ou quadriceps fémoral).

Quels sont les circuits nerveux mis en jeu dans le réflexe achilléen ou rotulien ?

Quelles sont les voies de commande volontaires et involontaires du mouvement ?

Comment évoluent nos connexions synaptiques avec l'entraînement ?

Dans ce thème, il s'agira dans un 1^{er} temps de préciser nos connaissances en physiologie nerveuse pour comprendre les bases moléculaires, cellulaires et anatomiques de ce réflexe myotatique. Nous aborderons ensuite, l'importance du cerveau dans la motricité volontaire, pour terminer par un aperçu de l'immense plasticité de nos connexions nerveuses.

Thème 3-B-1 Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle

I. Les caractéristiques physiologiques du réflexe myotatique

Cf TP 1

A. Le réflexe myotatique : un outil diagnostique

Le **réflexe myotatique** est un mouvement involontaire, stéréotypé et inné suite à un stimulus.

Le **stimulus** est un étirement pratiqué par le choc d'un marteau sur un muscle (plus précisément le tendon).

En réponse à son propre étirement, le muscle (= **effecteur**) se contracte.

Ex : lorsqu'on étire le tendon d'Achille, et donc le soléaire (=muscle du mollet), on constate rapidement sa contraction, ce qui se traduit par une extension du pied.

B. Les caractéristiques physiologiques de l'état contracté d'un muscle à travers l'électromyogramme

Quelle que soit l'intensité du choc, l'allure de l'EMG est identique et on observe une contraction du soléaire => on a donc un mouvement stéréotypé, inné et involontaire, c'est un réflexe. La réponse du soléaire (qui est sa contraction) est enregistrée 39ms après le choc.

Cette contraction est associée à une variation de la tension enregistrée au niveau du muscle: on constate sur l'enregistrement une augmentation de la tension (dépolariation), puis une diminution (repolarisation), et une diminution plus forte (hyperpolarisation) que l'état initial, puis un retour à l'état initial (état de repos). La contraction dure 20 ms.

Cette **variation de tension est proportionnelle à l'intensité du choc**: plus l'intensité du choc est grande, plus l'amplitude de la dépolariation et de l'hyperpolarisation sont grandes. En revanche la durée de la contraction ne varie pas.

Ainsi la **contraction du muscle effecteur** est associée à une **variation de tension électrique de ce muscle**, mesurable par des électrodes.

C. Le réflexe myotatique met en jeu la moelle épinière comme centre nerveux

Par calcul, pour une vitesse moyenne du message nerveux de 50 m.s^{-1} , on met en évidence que le **centre nerveux** impliqué dans le réflexe myotatique est la moelle épinière et non le cerveau.

Ainsi, le **réflexe myotatique, est une contraction d'un muscle en réponse à son propre étirement**. Son étude, par enregistrement EMG, soulève de nombreuses questions :

- Comment expliquer l'allure de l'EMG dans le cas de la contraction d'un muscle?
- Qu'est-ce qui gouverne l'état relâché du jambier quand son antagoniste est contracté?
- Comment sont organisés les circuits neuraux?
- Pourquoi la contraction d'un muscle est accompagnée de signaux électriques?

II. Les circuits neuroniques mis en jeu dans cet arc réflexe

Cf TP2

A. Observation des cellules mises en jeu dans ce réflexe myotatique

1. La structure d'un neurone

Un **neurone est une cellule**. Il est composé de prolongements cytoplasmiques, ou **fibres**, acheminant le message nerveux électrique, et d'un **corps cellulaire** contenant le noyau. Les fibres qui acheminent un message



vers le corps cellulaire sont appelés **dendrites** (il y en a plusieurs par neurone), la fibre qui achemine un message du corps cellulaire vers d'autres neurones ou d'autres cellules (cellule musculaire par exemple) est appelée **axone** (il y en a un par neurone). La connexion entre une fibre d'un neurone et une autre cellule est appelée **synapse**.

2. La fibre nerveuse **sensorielle** (ou **sensitive**) **afférente** et le **fuseau neuromusculaire**

L'observation au MET révèle un contact étroit entre l'extrémité de la fibre **sensorielle** (=dendrite) et les fibres musculaires. Le moindre étirement est donc détecté par la fibre sensitive qui achemine le message nerveux vers la moelle épinière.

3. La fibre nerveuse **motrice** et la **plaque motrice**

De même, la **fibre nerveuse motrice** établit une connexion étroite avec la fibre musculaire par le biais de bouton synaptique. Une même fibre nerveuse motrice se ramifie et innerve plusieurs fibres musculaires, on parle de **plaque motrice**.

4. La composition du **nerf sciatique**

Après dilacération du **nerf** sciatique, l'observation au MO révèle **plusieurs fibres nerveuses**, ou axones formant un nerf. Ces fibres peuvent être entourées d'une gaine de myéline.

5. L'organisation structurale de la **moelle épinière**

La **moelle épinière** est un **centre nerveux**, qui est constitué, en périphérie d'une substance blanche (due à l'emballage des fibres nerveuses par les gaines de myéline) et au cœur d'une substance grise (concentrant les noyaux des neurones).

Son observation révèle 2 cornes dorsales et 2 cornes ventrales.

B. Le **circuit neuronique du réflexe myotatique**

Des expériences de section/ stimulation ont permis de mettre en évidence un **circuit monosynaptique** dans le cas de l'arc réflexe myotatique.

Le stimulus constitué par l'étirement du tendon du soléaire, est détecté par les fibres nerveuses sensibles au niveau du fuseau neuromusculaire. Ces fibres traduisent ce stimulus mécanique en message nerveux électrique centripète, arrivant par la corne dorsale de la moelle épinière. Les corps cellulaires des neurones sensitifs se trouvant dans le ganglion spinal.

Au niveau du cœur de la substance grise de la moelle épinière, le neurone sensitif afférent transmet via son axone au niveau d'une synapse, le message nerveux à la dendrite du neurone moteur efférent. Le message nerveux est acheminé vers le corps cellulaire du motoneurone, puis est transmis à l'axone du motoneurone, jusqu'à la plaque motrice : au niveau de cette plaque, le message nerveux moteur est transmis aux fibres musculaires qui alors se contractent.

Une **seule synapse** est nécessaire dans cet arc réflexe, celle entre le neurone sensitif et le motoneurone. Cette synapse est dite excitatrice, car elle engendre la création d'un message nerveux au niveau du motoneurone.

* arc réflexe : trajet suivi par le message nerveux

N.B. : la contraction du muscle extenseur suite à son propre étirement est obligatoirement associée à un relâchement du muscle antagoniste fléchisseur. En effet, le motoneurone du muscle fléchisseur est associée à une synapse inhibitrice au cœur de la substance grise de la moelle épinière.

C. Les **caractéristiques du message nerveux le long des fibres nerveuses**.

Cf TD1 doc p.358-359

1. Le **potentiel de repos**

Lorsqu'on implante une microélectrode au cœur d'une fibre nerveuse au repos, on constate une tension négative (-70 mV). On en déduit qu'au repos la cellule nerveuse présente une différence de charge entre le milieu intra et extracellulaire. Le milieu intracellulaire est chargé négativement par rapport au milieu extracellulaire. Cette différence de potentiel de part et d'autre de la membrane plasmique du neurone au repos est appelée **potentiel de repos**.

2. Le **potentiel d'action**

Lorsqu'on stimule électriquement un axone géant de Calmar, on enregistre la propagation d'un signal le long de la fibre aux caractéristiques constantes : dépolarisation, repolarisation, hyperpolarisation, d'une durée de 2 ms environ et d'amplitude constante (entre -70 et +10 mV). Ce signal est appelé **potentiel d'action**. Il se



propage de manière unidirectionnelle le long de la fibre nerveuse et correspond à une inversion de la polarisation de la membrane plasmique.

3. Le codage du message nerveux le long de la fibre nerveuse

Une faible stimulation n'engendre aucun potentiel d'action. En revanche, dès que la valeur seuil de la stimulation est atteinte, on enregistre un potentiel d'action qui se propage le long de la fibre nerveuse.

La naissance d'un PA répond à la loi du « tout ou rien ».

L'intensité de la stimulation est alors **codée en fréquence de potentiels d'action**, en effet le signal qui se propage le long de la fibre nerveuse est de durée et d'amplitude constante. Seule sa fréquence varie.

Bilan : le long d'une **fibre nerveuse** (= axone ou dendrite), le **message nerveux est électrique**. Il correspond à une inversion du potentiel de membrane, d'une durée de 2 ms et d'amplitude constante ; on parle de **potentiel d'action**. Il se propage dans un seul sens. Le message nerveux est alors codé en **fréquence de potentiels d'action**.

D. Les caractéristiques du message nerveux au niveau d'une synapse

Cf TP3 la transmission synaptique

La **synapse** ou espace inter synaptique est le lien entre deux neurones, ou plus précisément entre deux fibres nerveuses (axone vers dendrite par ex).

Cet espace ou fente inter synaptique mesure 20 nm, le **message nerveux** qui le traverse n'est plus électrique mais **chimique**. Il fait intervenir des molécules mises en réserve dans l'extrémité pré synaptique (dans des vésicules), les **neuromédiateurs ou neurotransmetteurs**, tels que **l'acétylcholine**. Lorsqu'un PA arrive à l'extrémité pré synaptique, les vésicules migrent vers la membrane pré synaptique et alors libèrent pas **exocytose** leurs neuromédiateurs dans l'espace inter synaptique. Les **neurotransmetteurs** exocytés traversent l'espace et vont se fixer sur des **récepteurs** de formes complémentaires situés sur la membrane de l'extrémité **post-synaptique**. S'ensuit alors une inversion du potentiel membranaire et donc la naissance d'un potentiel d'action au niveau du bouton ou extrémité postsynaptique, et ainsi la propagation d'un nouveau message nerveux électrique.

Ainsi, au niveau d'une synapse, le message nerveux électrique qui arrive sous forme de PA est traduit en messenger chimique, à savoir libération de neurotransmetteurs dans l'espace inter synaptique. Au niveau de la **synapse**, le **message nerveux** n'est donc plus **codé** en fréquence de potentiels d'action mais **en concentration de neurotransmetteurs**.

Conclusion : Ainsi, le réflexe myotatique sert d'outil diagnostique pour apprécier l'intégrité du système neuromusculaire : par un choc léger sur un tendon, on provoque la contraction du muscle étiré (exemple du réflexe rotulien ou achilléen). Ce réflexe myotatique est un réflexe monosynaptique, il met en jeu différents éléments qui constituent l'arc-réflexe dont le centre nerveux mis en jeu est la moelle épinière.

Comment intervient l'autre centre nerveux, le cerveau, dans notre motricité ?

Thème 3-B-2 De la volonté au mouvement

Cf TP4

Si le réflexe myotatique sert d'outil diagnostique pour identifier d'éventuelles anomalies du système neuromusculaire local, il n'est pas suffisant car certaines anomalies peuvent résulter d'anomalies touchant le système nerveux central et se traduire aussi par des dysfonctionnements musculaires. Ainsi, les mouvements volontaires sont contrôlés par le système nerveux central.

I. L'exploration fonctionnelle du cerveau par l'IRM

A. L'IRM, une technique d'observation non invasive

L'imagerie par Résonance Magnétique est basée sur la propriété des noyaux atomiques à résonner dans un champ magnétique donné. Cette technique d'exploration permet de préciser nos connaissances sur l'organisation cérébrale. Associée à l'IRM fonctionnelle (IRMf), elle permet de préciser l'organisation de notre cerveau en aire, spécialisée dans les différentes fonctions de l'organisme.

B. L'organisation du cerveau en aires spécialisées

Ainsi, dans le lobe pariétal du cerveau, il existe une aire motrice et une aire pré motrice. L'aire pré motrice commande la planification des mouvements. L'aire motrice contrôle l'activité de nos muscles squelettiques. Les



neurones qui la composent projettent leurs axones vers les motoneurones de la moelle épinière. Ainsi, le motoneurone de la moelle épinière reçoit non seulement des afférences nerveuses des neurones sensitifs (connectés aux muscles) mais également des afférences des neurones cérébraux.

L'étude de cas cliniques de paralysie, révèle que l'hémisphère gauche du cerveau contrôle la motricité de la moitié droite de l'organisme, on parle de commande corticale controlatérale.

II. Le rôle intégrateur des corps cellulaires des motoneurones médullaires

Le corps cellulaire des motoneurones, situé dans la substance grise de la moelle épinière reçoit des connexions synaptiques de **faisceaux de neurones cérébraux**. Ainsi, certaines synapses excitent le corps cellulaire du motoneurone, d'autres l'inhibent. De plus, le corps cellulaire du motoneurone peut recevoir des messages nerveux rapprochés dans le temps, et y répondre par l'émission d'un seul message nerveux. On parle de sommation temporelle et spatiale qui a lieu au niveau des corps cellulaires des motoneurones.

En moyenne, un corps cellulaire présente 10 000 connexions synaptiques : ainsi **le corps cellulaire du motoneurone reçoit des informations diverses qu'il intègre sous la forme d'un message moteur unique et chaque fibre musculaire reçoit le message d'un seul motoneurone**. En revanche un même motoneurone peut innervé plusieurs fibres musculaires.

👉 **fibre musculaire = cellule musculaire**

👉 **fibre nerveuse = prolongement cytoplasmique du neurone, pouvant être un axone ou une dendrite**

Thème 3-B-3 Motricité et plasticité cérébrale

Le système nerveux central peut récupérer ses fonctions après une lésion limitée. La **plasticité** des zones motrices explique cette propriété.

La comparaison des cartes motrices de plusieurs individus montre des différences importantes. **Loin d'être innées**, ces différences s'acquièrent au cours du développement, de **l'apprentissage des gestes et de l'entraînement**. Cette plasticité cérébrale explique aussi les capacités de récupération du cerveau après la perte de fonction accidentelle d'une petite partie du cortex moteur. Les capacités de remaniements se réduisent tout au long de la vie, de même que le nombre de cellules nerveuses. C'est donc un capital à préserver et entretenir.

Conclusion : Ce thème 3B a permis de préciser nos connaissances sur la motricité volontaire et involontaire et sur l'évolution de notre phénotype au cours du temps. Il est important de retenir l'extraordinaire plasticité de notre cerveau, qui repose essentiellement sur la capacité de nos neurones à renforcer et à construire des connexions synaptiques, sous l'effet de l'entraînement. Ainsi, l'apprentissage et l'entraînement, autrement dit l'environnement, contribuent pour l'essentiel à l'évolution de nos capacités tant motrices que cognitives. En revanche, bien que des cellules souches existent dans notre cerveau, et présentent donc un potentiel de régénération de nos neurones non négligeable, nous ignorons encore les modalités de leur activation vers une voie de multiplication et de différenciation. Il est donc capital de préserver nos cellules nerveuses, vouées à une dégénérescence normale au cours de notre vie.