

Chapitre 10 : Les réflexes

Nous avons vu en début d'année un exemple de communication au sein de l'organisme faisant appel à la **communication hormonale** : régulation de la glycémie ou des cycles sexuels (en 2^{nde}). Il s'agit d'une communication publique, où le messager, l'hormone, circule dans le système sanguin, soit dans tout l'organisme, et où les destinataires du message, les cellules cibles, sont caractérisées par la présence de récepteurs spécifiques. Le message est lui codé en concentration en hormone. Mais les cellules peuvent également communiquer entre elles via la communication nerveuse, faisant appel à des cellules spécialisées, les neurones, et fonctionnant suivant des modalités très différentes.

La structure d'un neurone

L'unité cellulaire de base du système nerveux s'appelle le neurone. Il s'agit d'un type cellulaire animal hautement différencié et spécialisé dans la formation et la transmission d'un message nerveux.

Les neurones sont caractérisés par une structure particulière :

- un **corps cellulaire** contenant le noyau et les organites (mitochondries) ;
- des prolongements cytoplasmiques courts, les **dendrites** ;
- un prolongement cytoplasmique plus long, l'**axone**, protégé par une **gaine** isolante de **myéline** fabriquée par d'autres cellules du système nerveux, les **cellules de Schwann** ; cette gaine s'interrompt périodiquement aux **nœuds de Ranvier** ;
- une terminaison axonale en arborescence formant des connexions avec d'autres cellules (neurones ou non), les **synapses**.

La distinction entre dendrites et axones est liée au **sens de circulation** du message dans ces prolongements cytoplasmiques : il se dirige vers le corps cellulaire dans les dendrites alors qu'il part de ce dernier dans l'axone, toujours unique.

En réalité, ce schéma est quelque peu stéréotypé et les neurones peuvent prendre de nombreuses autres formes cellulaires, mais on retrouve toujours ces éléments de base.

De plus, il existe au sein du système nerveux de nombreuses autres cellules, qualifiées de **gliales**, qui permettent le bon fonctionnement des neurones sans véhiculer elles-mêmes de message nerveux.

tous les axones ne sont pas entourés d'une gaine de myéline

Les prolongements neuronaux, parfois de longue taille, forment des **fibres nerveuses**, regroupées en **nerfs**. Un nerf peut être composé de plusieurs milliers de fibres nerveuses, myélinisées ou non, issues d'autant de neurones.

plus longue cellule humaine, cellule nerveuse du nerf spinal

L'organisation générale du système nerveux

La majeure partie des neurones est regroupée dans deux organes-clés du système nerveux, le cerveau et la moelle épinière, constituant le **système nerveux central**.

Le **cerveau** est protégé par la boîte crânienne. Il est composé de neurones regroupés en centres fonctionnels ou **aires**. Ces dernières, composées essentiellement de corps cellulaires et de fibres non myélinisées, présentent un aspect grisâtre à l'observation, d'où le

nom de **substance grise**. Elle est localisée dans la partie centrale du cerveau et dans les replis externes, le **cortex**. Le reste du cerveau contient la **substance blanche**, formée principalement par des fibres myélinisées associées à des cellules gliales.

La **moelle épinière**, localisée dans le canal rachidien formé par les vertèbres, est également constituée de substances blanche et grise mais, à la différence du cerveau, la grise est centrale tandis que la blanche est externe.

ne pas confondre moelle osseuse et épinière

Ces deux organes sont entourés d'un tissu conjonctif formant une protection mécanique et filtrant les molécules échangées entre le sang et liquide céphalo-rachidien baignant cerveau et moelle. Ce sont les **méninges** responsables de la **barrière hémato-encéphalique**.

liquide céphalo-rachidien et immunité

Les nerfs, qui s'étendent à travers tout le corps, constituent le **système nerveux périphérique**. Les nerfs assurent la transmission de l'information

Les informations de notre environnement auxquelles nous réagissons sont appelées **stimulus externes**. Ces stimulus sont détectés et convertis en message nerveux par des capteurs ou récepteurs du système nerveux, par exemple les yeux, connectés aux nerfs optiques.

Ces messages sont acheminés jusqu'aux centres nerveux par des **nerfs afférents** ou sensitifs. En réponse à ces stimulus, les centres nerveux peuvent développer une réponse, acheminée jusqu'aux organes effecteurs appropriés par des **nerfs efférents**.

En quoi la réalisation d'un réflexe neuro-musculaire témoigne de la mobilisation des acteurs de la communication nerveuse ?

I) Du messager au message nerveux

A) Le potentiel membranaire de repos, une propriété commune à toutes les cellules

Lorsque le neurone est au repos, qu'il n'émet pas de message nerveux, on peut à l'aide d'un dispositif approprié mesurer la tension qui règne au niveau membranaire, entre le milieu intérieur et extérieur du neurone. La mise en place d'une **électrode** dans un axone montre qu'il existe une **différence de potentiel électrique** (ddp) entre le milieu intracellulaire et le milieu extérieur : c'est le **potentiel de membrane (ou potentiel de repos)**. *Le potentiel électrique représente l'état de charge électrique globale d'un milieu (positif, négatif ou neutre).* Le neurone a donc sa membrane plasmique polarisée électriquement : cette **propriété** est en fait **commune à toutes les cellules du vivant**.

En ce qui concerne le neurone, on observe sur l'oscilloscope une **tension de - 70 mV**. Le côté intracellulaire de la membrane présente donc un potentiel négatif (charges négatives) par rapport à la face extracellulaire. On appelle **potentiel de repos** cette différence de potentiel électrique entre le milieu intérieur du neurone et l'extérieur.

Le potentiel de repos est dû à une **inégale répartition des ions** (chargés positivement ou négativement) de part et d'autre de la membrane cellulaire du neurone. En effet, la face

interne de la membrane cellulaire du neurone présente un excès de charge négative (ou un déficit en charges positives) par rapport à la face externe de la membrane du neurone.

phénomène actif auto-entretenu (pompes ioniques ATP-dépendantes)

B) Le potentiel d'action : le messager nerveux

1) Description d'un potentiel d'action

Lorsqu'un neurone est stimulé artificiellement à l'aide d'une électrode, on observe à l'aide d'un oscilloscope un signal nerveux. Ce signal apparaît comme la modification brutale et locale du potentiel membranaire de repos. Cette modification de la tension membranaire est appelée un **potentiel d'action**.

On observe sur l'oscilloscope les modifications suivantes :

- une phase de **dépolarisation** : la face interne de la membrane cellulaire du neurone devient de plus en plus chargée positivement ; la tension membranaire s'inverse, passant de -70 à +40 mV ; cette phase correspond à une entrée d'ions positifs (Na^+) ;
- une phase de **repolarisation** : la tension de la membrane redevient négative ; cela correspond à une sortie d'ions positifs (K^+) ;
- une phase **d'hyperpolarisation** : la polarisation de la membrane face interne devient plus négative que le potentiel de repos avant de revenir à l'état initial ; cela est dû à une sortie excessive des ions K^+ .

Cette modification est brève (3 ms), locale et stéréotypée : tous les neurones émettent des potentiels d'action identiques. Le potentiel d'action est donc dû à des courants ioniques qui traversent la membrane plasmique de l'axone sur une portion donnée.

Si le potentiel de repos est universel, en revanche seules **certaines cellules**, qualifiées **d'excitables**, sont capables d'émettre un potentiel d'action en réponse à une stimulation. Lorsque plusieurs potentiels d'action se suivent de manière rapprochée, on parle de **train de potentiels d'action**.

il existe d'autres cellules excitables, notamment les cellules musculaires, cf. l'ECG

2) Formation et propagation du potentiel d'action

Les **corpuscules de Pacini** sont des neurones sensitifs, des **mécanorécepteurs**, récepteurs sensoriels sensibles à la pression, localisés dans la peau. Ils sont constitués d'une fibre nerveuse enroulée à son extrémité par une gaine de myéline formant une capsule. Une pression exercée sur la peau déforme les gaines qui viennent alors appuyer sur la membrane plasmique de la fibre nerveuse. Cette pression distend la membrane cellulaire qui devient perméable.

La **perméabilité passagère** permet l'entrée de charges positives (ions Na^+). Expérimentalement, on peut mesurer la dépolarisation entraînée par une pression, en fonction de l'intensité de cette pression. On constate que les potentiels d'action n'apparaissent que si la stimulation permet de dépasser une certaine valeur.

De manière plus générale, le déclenchement d'un potentiel d'action dépend de l'intensité de la stimulation. Il existe un **seuil d'excitabilité** du neurone. En dessous de ce

seuil, dans le cas d'une **stimulation infraliminaire**, le potentiel d'action ne se déclenche pas. Au-dessus, **stimulation supraliminaire**, il y a émission d'un potentiel d'action.

Tous les neurones fonctionnent de la même manière : une stimulation provoque une entrée de charges positives, une dépolarisation et éventuellement un potentiel d'action si cette dépolarisation dépasse la valeur-seuil de - 55 mV. Plus l'intensité de la stimulation augmente, plus le seuil de dépolarisation du neurone a des chances d'être franchi.

la valeur du seuil dépend des cellules excitables

En revanche, une fois que l'intensité de la stimulation a permis de dépasser le seuil de stimulation, le potentiel d'action à d'emblée son amplitude (110 mV) maximale et sa durée constante de 3 ms. Même si l'intensité de la stimulation augmente, il n'y a aucune modification de ces caractéristiques (potentiel d'action stéréotypé). On dit que l'apparition d'un potentiel d'action suit une **loi du tout ou rien**.

analogie du coup de pistolet et de la gâchette

Expérimentalement, on observe que les potentiels d'action ne peuvent se former que dans **l'axone** des neurones.

Une fois déclenché, le potentiel d'action se propage le long de la fibre nerveuse avec une vitesse allant de **1 à 100 m.s⁻¹** suivant le diamètre de la fibre et la présence de myéline. En effet, la présence de la **gaine de myéline accélère** considérablement la vitesse de propagation du potentiel d'action le long de l'axone. Tout au long de sa propagation, les caractéristiques du potentiel d'action restent inchangées. Un potentiel d'action se propage donc sans être modifié.

en fait, le PA à un point donné de l'axone entraîne une dépolarisation du point suivant, donc le franchissement du seuil et la formation d'un nouveau PA et ainsi de suite jusqu'à la synapse

Si le potentiel d'action est stéréotypé, il ne peut donc constituer le message nerveux puisqu'il ne connaît pas de variations et ne peut porter en soi d'information.

C) Le message nerveux

1) Codage du message à l'échelle d'un neurone

Au niveau de la fibre nerveuse issue d'un récepteur sensoriel, naît un **potentiel d'action invariant**. L'augmentation de l'intensité du stimulus, par exemple la pression à laquelle est soumis le corpuscule de Pacini, produit dans l'axone du neurone sensoriel une augmentation du nombre de potentiels d'action émis pour un temps donné. **Le codage de l'information ressentie s'opère donc en fréquence de potentiels d'action** : une intensité croissante du stimulus conduit à une augmentation de la fréquence des potentiels d'action émis par le neurone sensoriel, dès lors que son seuil d'excitabilité est dépassé.

Or chaque fibre nerveuse possède une fréquence maximale d'émission de potentiel d'action. Comment alors coder une intensité croissante de stimulus au-delà des possibilités d'un neurone isolé ?

2) Codage du message à l'échelle d'un nerf

Cf. TP I.

Lorsqu'une cellule nerveuse est excitée et émet un train de potentiels d'action, on dit qu'elle est **recrutée**. À l'échelle d'un nerf, plus le stimulus sensoriel est important, plus le **nombre de fibres nerveuses recrutées** est **important**. Par exemple, dans le cas du réflexe achilléen, l'étirement croissant du muscle, suite au choc sur le tendon d'Achille, met en jeu un nombre de plus en plus important de récepteurs, les **fuseaux neuromusculaires**, ce qui conduit à un nombre de plus en plus grand de fibres nerveuses répondant par l'émission de potentiels d'action.

Puisque toutes les fibres issues des fuseaux neuromusculaires du muscle se regroupent pour former un nerf, on peut enregistrer ce **phénomène électrique à l'échelle de l'organe** et non seulement de la cellule nerveuse. On appelle ainsi **potentiel global** (PG) le potentiel du nerf correspondant à la **somme de tous les potentiels d'action** parcourant ce nerf à un instant donné.

Plus le stimulus est important, plus le potentiel global du nerf augmente. En effet, augmentent d'une part le nombre de potentiels d'action par fibre nerveuse augmente (car la fréquence des potentiels d'action augmente), et d'autre part, le nombre de fibres recrutées.

Cette augmentation d'amplitude du potentiel global atteint un maximum lorsque toutes les fibres du nerf sont recrutées. À l'échelle du nerf, le message nerveux est donc codé en **amplitude**.

II) La transmission du message nerveux au niveau d'une synapse

A) Structure d'une synapse

syn = ensemble ; hapein = toucher, saisir

Les cellules nerveuses communiquent avec des cellules excitables (autre neurone, cellule musculaire ou glandulaire) au niveau d'une zone de contact : la **synapse**. Le **neurone pré-synaptique** va envoyer un influx nerveux vers cette cellule excitable grâce à une synapse. Une synapse est donc une zone de contact entre un neurone et une autre cellule excitable (le plus souvent un autre neurone). Un axone se termine par une arborescence de boutons synaptiques connectés à des centaines d'autres cellules. Il peut s'agir de dendrites ou de corps cellulaires d'autres neurones mais également de cellules musculaires ou glandulaire.

Au niveau d'une synapse, le **neurone pré-synaptique**, par lequel le message nerveux arrive sous forme de trains de potentiels d'action, est séparé de la cellule post-synaptique, réceptrice du message nerveux, par une **fente synaptique**. Cet espace, rempli de liquide interstitiel, mesure entre 20 et 50 nm de large et empêche la propagation des potentiels d'action.

En effet, le PA, qui est une dépolarisation membranaire, a besoin d'une membrane pour se propager et ne peut donc pas traverser cette fente.

Ce sont donc des messagers chimiques qui prennent le relais : les **neurotransmetteurs** (ou neuromédiateurs). Libérés dans l'espace synaptique par le neurone pré-synaptique, ils se fixent sur des récepteurs spécifiques de la membrane plasmique de la cellule post-synaptique.

B) Le fonctionnement d'une synapse

Le fonctionnement d'une synapse chimique se déroule en plusieurs étapes.

1) L'arrivée des potentiels d'action dans le bouton synaptique déclenche l'exocytose de vésicules synaptiques. Ces vésicules sont des organites de petite taille, entourés d'une membrane similaire à la membrane plasmique, et renfermant une grande concentration de neurotransmetteurs. Lorsqu'un potentiel d'action arrive, ces vésicules sont dirigées jusqu'à la membrane plasmique avec laquelle elles fusionnent, libérant ainsi les neurotransmetteurs dans l'espace intersynaptique.

2) Les **neurotransmetteurs** libérés dans la fente synaptique **diffusent** et se fixent sur des récepteurs spécifiques présents sur la membrane de la cellule post-synaptique. Ces neurotransmetteurs peuvent être de nature chimique variée (**acétylcholine**, adrénaline, GABA, sérotonine, endorphines...) mais un neurone donné ne produit qu'un seul type de neurotransmetteurs. La fente synaptique étant très étroite, le temps mis par ces molécules pour passer d'une membrane à l'autre est très bref.

3) La fixation des neurotransmetteurs sur leur récepteur spécifique (cf.TP2) déclenche son activation : comme il s'agit d'un **canal à ions**, cela consiste en son ouverture. Ainsi, la vague de neurotransmetteurs provoque une circulation d'ions à travers la membrane plasmique de la cellule post-synaptique et donc une **modification de son potentiel de repos**. Si la dépolarisation dépasse la valeur-seuil, un potentiel d'action peut être alors émis.

*la transduction dépend de :
concentration en neurotransmetteurs + type de neurotransmetteurs*

Dans le cas d'une synapse neuromusculaire (=synapse entre un neuro et une cellule musculaire), la dépolarisation de la cellule musculaire provoque un PA musculaire, qui entraîne une libération d'ions Ca^{2+} par des vésicules du réticulum sarcoplasmique (=réticulum endoplasmique lisse du myocyte) : cette augmentation de la concentration intracellulaire en ions calcium est à l'origine de la **contraction musculaire** (cf. chapitre 1 et le cycle de contraction).

4) En parallèle, les **neurotransmetteurs** sont **éliminés** de la fente synaptique par l'action d'enzymes qui les dégradent ou sont récupérés par des invaginations latérales de la membrane du bouton synaptique qui reforment des vésicules (**endocytose**). C'est pourquoi la durée de vie du neurotransmetteur dans l'espace intersynaptique est très bref (10 à 15 ms). De plus, le phénomène d'endocytose permet d'éviter que la surface du bouton synaptique n'augmente avec les exocytoses. Le neurone pré-synaptique peut donc très rapidement répondre à l'arrivée d'un nouveau potentiel d'action.

Au niveau d'une synapse, seule la cellule pré-synaptique contient des neurotransmetteurs, la synapse ne peut donc fonctionner qu'en sens unique, du neurone pré-synaptique vers la cellule post-synaptique. La synapse permet de faire passer le message nerveux, de façon **unidirectionnelle**, du neurone pré-synaptique vers une cellule post-synaptique, avec un délai de l'ordre de **0,5 ms**, soit avec une vitesse de $0,1 \text{ mm.s}^{-1}$. Dans une synapse, on passe ainsi d'un messager électrique : le potentiel d'action, à un **messager chimique** : le neurotransmetteur.

Plus la fréquence des potentiels d'action du neurone pré-synaptique est importante, plus la concentration en neurotransmetteur libérée est importante. Par conséquent, **le message**

nerveux jusqu'alors codé en fréquence de potentiels d'action devient un **message codé en concentration** de neurotransmetteur.

*existence de synapses électriques plus rapides
du coup quel est l'intérêt d'une synapse chimique ?*

C) Substances pharmacologiques et perturbations du fonctionnement synaptique

cf. TP 2

Certaines substances naturelles (comme le curare) ou synthétiques (LSD) perturbent le fonctionnement synaptique. Ces molécules **exogènes** peuvent altérer la commande motrice en empêchant le message afférent de parvenir jusqu'à la moelle épinière ou en perturbant le message efférent lors de sa redescendre vers les muscles.

Leur action s'explique facilement une fois que l'on connaît le fonctionnement d'une synapse, qu'elles viennent parasiter. En effet, certaines possèdent une **structure moléculaire similaire** à celle de neurotransmetteurs. Aussi, une fois présentes dans le corps, ces molécules se fixent sur les récepteurs du neurone post-synaptique et perturbent la formation d'un nouveau message nerveux. Autrement dit, le **cerveau crée ou modifie une information qui ne vient pas de la réalité**.

*curare = antagoniste de l'acétylcholine => relâchement musculaire durable (myorelaxant
d'où l'utilisation médicale)
il existe aussi des agonistes qui prolongent effet des neuromédiateurs*

Malheureusement, la consommation de ces molécules peut être lourde de conséquences : effets secondaires nocifs, **dépendances** (= addictions) parfois extrêmement fortes (drogues dites « dures » comme la cocaïne), **accoutumance** qui pousse à augmenter les doses consommées, ce qui peut amener au *bad trip* ou à l'overdose fatale...

III) Le réflexe myotatique, un exemple intégré de mise en jeu de la communication nerveuse

cf. TP 1

La perception de notre environnement repose sur le fonctionnement de notre système nerveux. Après traitement de l'information perçue, ce système permet d'avoir un comportement de l'organisme adapté aux modifications de son environnement.

À l'échelle cellulaire, le système nerveux est composé de neurones, cellules excitables capables d'émettre un message nerveux codé en fréquence de potentiels d'action le long de leur axone ou en concentration de neurotransmetteurs au niveau de la synapse chimique.

A) La posture, un équilibre dynamique

1) Les muscles de la posture

Le corps humain, comme celui de tous les organismes vivant en milieu aérien, est en permanence soumis aux effets de la pesanteur qui tend à faire affaisser tête et tronc.

La posture, le maintien inconscient de la position verticale de la tête et du corps, nécessite donc la contraction en permanence ou presque d'un grand nombre de muscles.

2) Le réflexe myotatique : le rétablissement d'un déséquilibre

Tout **déséquilibre** du corps provoque un étirement des muscles concernés : par exemple, un écart à la verticale en station debout entraîne le fléchissement du muscle postérieur du mollet. Cet étirement provoque une réponse rapide et réflexe qui conduit à la contraction du muscle étiré : c'est le **réflexe myotatique**. Ce réflexe rétablit ainsi la posture du corps suite à un déséquilibre.

Le réflexe myotatique se définit donc comme la **contraction d'un muscle en réponse à son propre étirement**. Tous les muscles intervenant dans la posture sont dotés de réflexes myotatiques, réflexes automatiques ne faisant pas intervenir une intervention consciente du cerveau (d'où le nom de **réflexe**).

Ce sont les réflexes myotatiques qui permettent le maintien du squelette dans la position verticale. Le réflexe rotulien (rotule du genou) ou achilléen (tendon d'Achille) utilisés par les médecins pour vérifier l'état du système nerveux sont 2 exemples de réflexes myotatiques.

3) Le réflexe myotatique : un servo-mécanisme

Le réflexe myotatique est un système automate, ou **servo-mécanisme**, où le paramètre à régler est l'état d'étirement du muscle. Tout étirement est compensé par une contraction réflexe en réponse. Il s'agit d'une rétroaction négative ou **rétrocontrôle**.

Pour pouvoir fonctionner correctement, ce système doit posséder les éléments suivants :

- des **récepteurs sensoriels** capables de détecter un étirement du muscle (stimulus mécanique) : il s'agit des **fuseaux neuromusculaires** localisés dans le muscle étiré, capables de convertir ce stimulus en un message nerveux afférent, ou sensitif, grâce à un mécanisme de transduction ;
- un câblage de **transmission**, rôle joué par les neurones sensitif du **nerf rachidien** qui transporte le message nerveux **afférent sensitif** jusqu'à un centre nerveux ;
- un **centre de commande** nerveux, ici la **moelle épinière**, intégrant et analysant ce message avant d'élaborer une réponse appropriée ;
- une seconde **fibre nerveuse motrice** transportant ce message nerveux **efférent** vers le muscle étiré pour lui ordonner de se contracter (plaqué motrice) ;
- un **organe effecteur**, le muscle, dont les fibres musculaires reçoivent le message, et via la production d'un potentiel d'action musculaire se contractent et produisent ainsi la réponse réflexe.

Le résultat est la contraction d'un muscle étiré. Des mesures permettent d'estimer la vitesse de conduction du message nerveux dans le cas de ce réflexe à 40 m.s^{-1} .

At de 40 ms (dépend de la taille : plus rapide chez les individus plus petits)

B) Le support cellulaire du réflexe myotatique achilléen

1) Le circuit neuronal du réflexe myotatique

Le réflexe myotatique achilléen nécessite l'intervention d'un circuit précis de plusieurs neurones.

1) Le message nerveux prend naissance au niveau du **fuseau neuromusculaire** puis chemine vers la moelle épinière par l'intermédiaire d'un neurone sensitif (ou neurone en T vu sa forme). Le message arrive via un long dendrite et repart vers la moelle par un court axone.

Cette voie afférente emprunte un nerf rachidien et entre dans la moelle par la racine dorsale. Le corps cellulaire du neurone sensoriel est localisé dans le **ganglion spinal** de la racine dorsale, ce qui représente une exception.

2) Le message nerveux passe du neurone sensoriel au neurone moteur ou **motoneurone** au niveau d'une synapse excitatrice. Le corps cellulaire du motoneurone est localisé dans la substance grise centrale de la moelle épinière. L'axone du motoneurone transporte le message nerveux vers le muscle étiré au sein d'un nerf rachidien (le même que pour le message afférent) en sortant par la racine ventrale. L'axone du motoneurone forme avec le muscle étiré une synapse neuro-musculaire, ou **plaqué motrice**, qui conduit à sa contraction.

Ce réflexe met en jeu deux neurones reliés par une seule synapse, on parle de **réflexe monosynaptique**.

Cependant, ce réflexe doit se compliquer légèrement pour être fonctionnel. En effet lors de ce réflexe, le **muscle extenseur étiré** (muscle postérieur du mollet) **R** alors que le muscle opposé, le **muscle fléchisseur** (muscle antérieur du mollet) subit un étirement et par conséquent devrait lui aussi se contracter d'après le principe du réflexe myotatique. Il s'agit de deux **muscles antagonistes** qui doivent répondre de manière opposée pour que la réponse soit efficace.

2) Réflexe myotatique et muscles antagonistes

En fait, ces muscles antagonistes sont coordonnés, ce qui évite une contraction presque synchrones des muscles antagonistes qui conduirait à un blocage du mouvement.

Le muscle extenseur étiré (muscle postérieur du mollet) reçoit l'ordre de se contracter via la synapse excitatrice tandis que le muscle antagoniste, fléchisseur, reçoit au même moment, via un **interneurone**, un message inhibiteur qui conduit à son relâchement (étirement passif).

Cette coordination est possible grâce au rôle de l'interneurone de la moelle épinière, activé par l'arrivée du message afférent. Le même message sensoriel conduit donc à deux réponses opposées :

- une stimulation du motoneurone du muscle extenseur (synapse excitatrice) induisant une contraction musculaire ;
- une inhibition du motoneurone du muscle fléchisseur via la synapse inhibitrice de l'interneurone et donc un relâchement du muscle concerné.

Il s'agit d'un **circuit réflexe bisynaptique** qui met bien en évidence l'intégration, le traitement de l'information sensorielle aboutissant à deux réponses motrices différentes.

Conclusion

La **communication nerveuse** est **rapide** et **efficace** : en délivrant le message directement à la cellule-cible, il y a moins de délai et de dilution qu'avec la communication hormonale. Le message nerveux est par ailleurs directement communiqué à sa cellule destinatrice : on parle de **communication privée** par opposition avec la communication hormonale, publique.

De plus, du fait de la diversité synaptique, il y a possibilité de moduler la transmission du message nerveux et de constituer des réseaux de communication neuronale extrêmement complexes. Ce sont ces réseaux qui sont à l'origine de **l'émergence** d'un certain nombre de fonctions cérébrales indispensables à des phénomènes aussi divers que la respiration, la **posture**, le déplacement, la **perception**, mais également le langage, la **mémoire** ou la conscience...

Le réflexe myotatique est un exemple simple du travail d'analyse, **d'intégration** qu'opèrent les centres nerveux, ici la moelle épinière.

Si ce réflexe est inconscient, ne faisant pas appel à une commande cérébrale, une simple expérience permet de montrer que la réalité est un peu plus complexe. Un individu peut choisir de perdre l'équilibre, ce qui prouve que le cerveau peut reprendre le contrôle de ce réflexe : les motoneurones concernés possèdent donc des synapses de neurones situés dans le cerveau...

*Mots-clés : éléments fonctionnels de l'arc-réflexe ; muscles antagonistes ; caractéristiques structurales et fonctionnelles du neurone ; éléments structurels des synapses neuro-neuronale et neuromusculaire ; codage électrique en **fréquence** ; codage biochimique en **concentration**, **neurotransmetteur**, molécules exogènes.*