

Chapitre 11 : Cerveau et mouvement volontaire

Le réflexe myotatique est une commande involontaire des muscles, mais il est aussi possible de commander volontairement une contraction musculaire, ce qui implique le **cerveau**.

Cet organe, protégé par la boîte crânienne, est constitué par plusieurs types de cellules, découvertes progressivement et dénombrées seulement très récemment (2009) :

- les **neurones**, représentant 50 % des cellules du cerveau, avec environ 86.10^9 cellules ;
- les **cellules gliales**, constituant la « glue » du cerveau (Virchow, 1856) dans laquelle se trouvent les neurones, avec près de 85.10^9 cellules.

Parmi ces cellules gliales, on distingue :

- des **astrocytes**, grosses cellules en étoiles qui recouvrent les surfaces des capillaires sanguins par des prolongements (pieds) où ils prélèvent le glucose et le convertissent en lactate pour les neurones ; ils jouent aussi le rôle de barrière entre le sang et les neurones (barrière hémato-encéphalique) et contrôlent les synapses ; ils représentent 15 % des cellules du cerveau ;
- les **oligodendrocytes**, qui constituent les gaines de myéline des axones par des enroulements membranaires ;
- les **cellules microgliales**, très ramifiées, très dynamiques, et dont les ramifications sont en mouvement permanent, ont une activité phagocytaire (cellule immunitaire du cerveau).

<https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-du-lundi-19-mars-2018>

Dans 1 mm³ de tissu nerveux, il y a 10 à 50 000 neurones, réalisant $0,5.10^9$ synapses et 10 à 50 000 cellules gliales....

Le fonctionnement du cerveau résulte donc d'interactions permanentes et harmonieuses entre tous ces acteurs, permettant par exemple la réalisation de mouvements très précis.

Comment les mouvements volontaires sont-ils élaborés au sein du cerveau ?

Comment le contrôle des mouvements se modifie-t-il au cours du temps ?

I) De la volonté au mouvement

A) Lésions cérébrales et dysfonctionnements moteurs

Les techniques actuelles d'imagerie, comme l'**IRM** (Imagerie par Résonance Magnétique) permettent de réaliser une coupe virtuelle du cerveau avec une précision millimétrique. De façon complémentaire, l'**IRM_f** (f pour fonctionnelle) enregistre les variations d'activité lors de la réalisation d'une tâche précise (ici liée à la motricité), ce qui permet de visualiser les zones impliquées dans cette tâche.

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

L'IRM permet de visualiser la structure anatomique du corps en volume. On distingue l'IRM anatomique de l'IRM fonctionnelle.

L'IRM dite anatomique repose sur l'aimantation des atomes d'hydrogène présents partout où il y a de l'eau et de la graisse. Elle est donc particulièrement adaptée à l'observation des "tissus mous" tels que le cerveau, la moelle épinière, les muscles, les tendons ou encore les viscères (foie, rate, rein...).

L'IRM fonctionnelle repose de son côté sur la mesure de la désoxy-hémoglobine des globules rouges (l'hémoglobine dénuée d'oxygène qui quitte les organes). Elle permet donc de suivre l'afflux de sang oxygéné dans les organes et elle donc très utilisée dans les accidents vasculaires cérébraux, mais aussi, en neurologie, pour poser le diagnostic de la maladie d'Alzheimer ou de la sclérose en plaques.

https://www.allodocteurs.fr/se-soigner/examens-medicaux/scanner/scanner-irm-radio-quel-examen-pour-quelle-indication_13871.html

+ document 1 page 400 du manuel

Les accidents vasculaires cérébraux (AVC) sont des troubles soudains de la circulation irrigant un territoire du cerveau (obstruction par un caillot ou rupture de la paroi d'un vaisseau = anévrisme) ; ils provoquent un arrêt du fonctionnement de la partie non irriguée, ce qui peut se traduire par une **paralysie** (voire une hémiplégie si que d'un côté), montrant qu'une aire motrice est touchée.

<https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/accident-vasculaire-cerebral-avc>

Contrairement aux AVC, les lésions sur la moelle épinière (suite à un choc violent et rupture) se traduisent par la paralysie de la partie située au-dessous de la lésion : paraplégie (membres et tronc inférieurs), ou tétraplégie (4 membres et tout le tronc) ; dans ce cas-là, on observe la suppression des réflexes myotatiques en-dessous de la zone sectionnée.

Dans le cas d'une hernie discale, la compression des racines des nerfs rachidiens provoque une douleur insupportable et des troubles moteurs.

Toutes ces observations montrent qu'il existe des territoires du cortex spécialisés et systématiquement associés à l'exécution d'un mouvement volontaire : ce sont les **aires motrices primaires** et **aires prémotrices**.

B) Des aires cérébrales spécialisées

Les aires motrices primaires (= aires M1) sont parfaitement localisables et elles forment une bande de **cortex frontal**, correspondant à la motricité allant des pieds à la langue : chaque partie du corps est associée à un territoire précis et leur surface est proportionnelle à la mobilité (bouche et main importantes), ce qui est représenté par l'**homunculus moteur**.

Les aires prémotrices (**cortex pariétal**) sont responsables de la planification de l'exécution du mouvement, en lien avec les informations sensorielles (externes ou internes) reçues (intervention de l'aire motrice supplémentaire).

L'ensemble de toutes les aires impliquées dans la commande motrice volontaire forme le **cortex moteur** ; mais d'autres territoires sont impliqués (fonctionnement en réseau).

Maladie de Parkinson qui touche le locus niger (substance noire), dans le tronc cérébral.
<https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/parkinson-maladie>

C) Les voies motrices : du cortex aux muscles

Les messages moteurs efférents (vers l'organe effecteur, différent de afférent : vers le centre nerveux) descendent par des faisceaux de neurones constituant la voie pyramidale dans la moelle épinière. Les **neurones pyramidaux** ou neurones de l'AMP (aire motrice primaire) ont leur corps cellulaire dans la substance grise du cortex et leur axone plonge vers la moelle épinière en changeant de côté du corps juste en-dessous du bulbe rachidien : on parle de **décussation** (= croisement en X).

La connexion synaptique avec les motoneurones se fait soit directement, soit via des interneurones présents dans la moelle épinière (*cf. CH 13 et l'arc réflexe*).

Les voies motrices étant croisées (**contralatéralité**), l'aire motrice gauche contrôle la partie droite de l'organisme et inversement.

II) Le rôle intégrateur des neurones dans la motricité

A) Diversité des terminaisons synaptiques

Toutes les synapses fonctionnent selon le même mécanisme. La seule différence réside dans les effets que peuvent avoir les neurotransmetteurs sur l'élément post-synaptique. Il existe deux grands types de synapses en fonction du neurotransmetteur libéré.

1) Dans le cas de synapses excitatrices, les neurotransmetteurs provoquent, après fixation sur leurs récepteurs spécifiques, une entrée de cations (en général Na^+) dans la cellule postsynaptique.

Le **potentiel post-synaptique excitateur (PPSE)** ainsi formé correspond donc à une légère dépolarisation et permet ainsi éventuellement la naissance d'un nouveau potentiel d'action si le seuil de -55mV est dépassé.

Cependant, si cette dépolarisation est de faible amplitude, elle ne permet pas de franchir la valeur-seuil à partir de laquelle se forme un potentiel d'action. La synapse excitatrice a donc pour effet de rapprocher le potentiel de membrane du seuil de dépolarisation nécessaire pour faire naître un potentiel d'action, mais **un seul PPSE ne suffit pas en général à atteindre le seuil**. Autrement dit, un potentiel d'action isolé émis par le neurone pré-synaptique ne suffit pas en général pour que soit émis un potentiel d'action dans le neurone post-synaptique...

On rencontre, par exemple, ce type de synapse entre un neurone sensitif et un motoneurone dans le cas du réflexe myotatique.

Exemple de neurotransmetteurs excitateurs : l'acétylcholine (surtout sur les synapses neuromusculaires) ou le glutamate (acide glutamique) pour les neurones pyramidaux et à 80 % des synapses.

2) Dans le cas de **synapses inhibitrices**, les neurotransmetteurs provoquent une hyperpolarisation de la membrane plasmique et par conséquent le **potentiel post-synaptique inhibiteur** (PPSI) ainsi formé s'oppose à la naissance d'un potentiel d'action. En effet, les récepteurs placés sur la membrane post-synaptique permettent, une fois activés, l'entrée d'anions (Cl^-) ou la sortie de cations (K^+).

La synapse inhibitrice permet donc d'éloigner le potentiel de la membrane de la valeur seuil nécessaire pour faire naître un potentiel d'action. Elle empêche la naissance d'un potentiel d'action dans l'élément post-synaptique.

C'est par exemple le cas entre le neurone pyramidal ou l'interneurone venant du **muscle antagoniste** soumis au contrôle cérébral et le motoneurone dans le cas du réflexe myotatique.

Exemple de neurotransmetteur inhibiteur : le GABA (acide γ -aminobutyrique).

B) Sommations et intégration cellulaire des messages nerveux

Une cellule nerveuse est connectée avec un très grand nombre d'autres neurones via plusieurs centaines, voire milliers, de synapses sur son corps cellulaire et ses dendrites. Ainsi, le corps cellulaire effectue **une sommation** des informations qui lui parviennent et émet ou non en fonction un potentiel d'action en réponse.

Il existe deux types de sommations :

- une **sommation temporelle** : lorsque, pour un neurone pré-synaptique, les potentiels d'action se suivent à une fréquence assez élevée, les PPSE émis après le passage de la synapse s'additionnent dans le temps et peuvent ainsi franchir le seuil d'excitabilité du neurone postsynaptique.

Ce dernier peut donc émettre à son tour un potentiel d'action ou plusieurs, en réponse à une stimulation assez élevée, à des potentiels d'action se succédant à quelques millisecondes d'intervalle.

- une **sommation spatiale** : le corps cellulaire peut également faire une synthèse des informations reçues par l'ensemble des synapses qu'il possède. En effet, les potentiels postsynaptiques peuvent parcourir une faible distance sur la membrane avant de s'amortir et de disparaître. Si durant ce trajet, ils rencontrent d'autres PPS, leur amplitude peut s'additionner.

Des PPSE se combinant favoriseront une dépolarisation suffisamment importante pour déclencher l'émission d'un potentiel d'action alors que les PPSI joueront le rôle contraire. Par conséquent, le neurone déclenche ou non des potentiels d'action en fonction des messages nerveux reçus sur l'ensemble de ses synapses, inhibitrices comme excitatrices.

⇒ **Le neurone est donc l'élément intégrateur de base du système nerveux.**

C) Des réponses motrices intégrées

L'amplitude du réflexe myotatique dépend des conditions du sujet : la contraction volontaire du muscle inhibe le réflexe myotatique ; au contraire, si on est distrait, le réflexe est amplifié (par exemple traction des bras, réflexe rotulien plus fort).

La contraction répond donc au stimulus, mais elle tient compte d'autres informations : il y a **intégration** des informations, rendue possible par l'interneurone et les sommations des

informations sont réalisées au niveau du corps cellulaire du motoneurone qui est en liaison avec le neurone en T excitateur et l'interneurone ou le neurone pyramidal inhibiteur.

Finalement, un message unique arrive à la fibre musculaire qui n'a aucune capacité intégrative : ce sont des propriétés émergentes des réseaux neuronaux qui sont à l'origine de la complexité des tâches réalisées. Seuls les neurones ont ses propriétés intégratrices (ici le motoneurone) : le myocyte reçoit un ordre déjà intégré : c'est un strict effecteur...

III) La plasticité cérébrale

A) Des variations de cartes motrices en relation avec le mode de vie

L'organisation du cerveau est commune à tous dans ses grandes lignes (et propre à l'espèce), mais il existe des **variations individuelles non innées** : les cartes motrices d'individus différents montrent en effet des différences importantes dans la localisation et la surface des aires correspondant aux différentes parties du corps, en relation avec leur activité.

ex : violoniste : grand développement de la motricité des doigts

B) Les capacités de récupération du cerveau

Un AVC se traduit par une zone nécrosée (détruite définitivement) ; si l'individu survit, il peut y avoir une **récupération** du déficit moteur (plus ou moins limitée, suivant l'ampleur de la lésion), qui dépend de la rééducation.

Ce n'est pas une remise en service de la zone lésée, dont les cellules sont définitivement mortes, mais une suite de remaniements des aires voisines par **réagencement des réseaux neuronaux** : de nouvelles synapses sont formées, et il y a recrutement de neurones préexistants auxquels sont réattribués des fonctions motrices. Cela se traduit par un déplacement des aires (dans les 2 hémisphères) et l'établissement d'une nouvelle carte motrice.

De même, en cas d'entraînement à une tâche, l'effet est observé même après seulement quelques dizaines de minutes d'entraînement ! Les modifications sont alors transitoires et réversibles : les synapses se font et se défont. Pour obtenir un ancrage dans la durée, il faut l'intervention des cellules gliales et donc la nécessité d'une consolidation par répétition des entraînements.

La plasticité est donc la **capacité de remaniement des territoires spécialisés du cerveau au cours de la vie**. C'est la base des apprentissages (ici moteurs).

Exemples étonnants = plusieurs années après amputation, si greffe, réappropriation du territoire contrôlant l'organe greffé

C) L'évolution de la plasticité au cours de la vie

Les réseaux de neurones et les synapses sont acquis au cours du développement par apprentissage. Même chez adulte, un entraînement moteur provoque une amélioration de performances et une extension de l'aire concernée.

Les modifications sont rapides (en mois) mais pas forcément durables, d'où l'idée de **plasticité des réseaux de neurones**, que l'on peut aussi concevoir comme un **équilibre dynamique** (cf. PLS n°520, février 2021).

Comme les modifications musculaires suite à de l'entraînement (cf. sujet Ch1)

Le capital neuronal est donc à préserver et à entretenir (on perd autour de 10 % des cellules nerveuses au cours de la vie), mais cette perte est ralentie par la pratique d'activités physiques et intellectuelles régulières ; de même, le développement de maladies neurodégénératives est aussi retardé par ces pratiques, et elles concernent beaucoup moins les personnes ayant eu des métiers intellectuellement stimulants...

Conclusion

La plasticité du cerveau est un espoir de guérison dans maladies neuro-dégénératives (problèmes liés au vieillissement, sur lesquels il n'y a pas de prise évolutive).

En effet, certaines zones du cerveau (hippocampe, zone sous-ventriculaire) sont capables de produire de nouveaux neurones qui peuvent s'intégrer dans des réseaux préexistants. Toutefois, il n'y a pas d'application médicale à court ou moyen terme, ce qui implique de privilégier l'idée d'un capital à préserver et à entretenir.

Mots-clés : intégration par le neurone moteur, sommation temporelle et spatiale, aire motrice, plasticité cérébrale, neurotransmetteur, molécules exogènes.