

3.4 PHYSIOLOGIE DES NEURONES : CONDUCTION ÉLECTRIQUE ET TRANSMISSION CHIMIQUE

3.4.1 Aspect électrique : l'influx nerveux (I.N.), son déclenchement et sa conduction le long d'un axone

Le rôle du neurone est de conduire l'influx nerveux. Mais qu'est-ce que l'I.N.?...

Neurone au repos, neurone excité... quelle est la différence?

Commençons par définir ces deux états. La différence entre un neurone au repos et un neurone excité se situe au niveau de la membrane du neurone, particulièrement de la composition chimique des milieux situés de part et d'autre de cette membrane¹ : le milieu intracellulaire (dans la cellule) et le milieu extracellulaire (extérieur). Si on examine la composition chimique de ces deux milieux, on remarque qu'elles diffèrent. Ce qui nous intéresse surtout, c'est la concentration relative des **ions**, des atomes chargés électriquement (ex. : ions sodium Na⁺, ions potassium K⁺, ions chlore Cl⁻, ions calcium Ca²⁺).

Dans un neurone au repos, il y a beaucoup d'ions Na⁺ à l'extérieur de la cellule et peu à l'intérieur ; si le neurone devient excité, des «portes» s'ouvrent dans la membrane du neurone et les ions Na⁺ se mettent à entrer. En termes biologiques, un influx nerveux est donc caractérisé par un changement de perméabilité de la membrane du neurone. À cause des **ions** (qui sont chargés électriquement), cette perméabilité détermine une autre caractéristique : le potentiel de membrane, qu'il est possible de mesurer à l'aide d'instruments électriques (microélectrodes et voltmètre) [voir la FIG. 3 du document SN-12, p. 118 du *Recueil* ; les «étoiles» représentent des corps cellulaires de neurones].

Lorsque le neurone est «au potentiel de repos», il maintient des concentrations inégales d'ions entre son milieu intérieur et le milieu extérieur qui l'entoure. **Sa membrane est dite polarisée** : comme une pile, elle possède un pôle + (le côté extérieur) et un pôle - (le côté intérieur). En effet, il y a beaucoup plus d'ions positifs à l'extérieur de la cellule qu'à l'intérieur (en particulier

¹ *Rappel : la fonction de la membrane est de constituer une limite entre la cellule et son milieu ET de contrôler les échanges entre ces deux éléments. La membrane est dotée d'une perméabilité sélective : elle ne laisse pas entrer ou sortir n'importe quoi. Cette perméabilité varie même selon les circonstances, comme nous le verrons avec l'I. N.*

à cause des ions Na^+ retenus à l'extérieur). Si on mesure la différence de charges, on obtient une différence de potentiel : le potentiel de repos d'un neurone est de **-70mV (millivolts)**. Le signe négatif signifie que l'intérieur de la cellule, notre point d'intérêt, porte moins de charges positives que le milieu extracellulaire [voir la FIG. 2 du document SN-12, p. 117 du *Recueil*].

Lorsque le neurone devient excité, les «portes ou canaux» à Na^+ s'ouvrent et laissent entrer une grande quantité d'ions positifs. La perméabilité aux ions est modifiée par rapport à ce qui se produit dans un neurone «au potentiel de repos» et le potentiel de membrane change : on mesure un potentiel de **+30 mV : le potentiel d'action** d'un neurone. Les «pôles» sont inversés : **sa membrane est dépolarisée**. (Que signifie le signe positif?...) [revoir la FIG. 3 de SN-12, p. 118 du *Recueil*].

Si on en revient à notre première question (quelle est la différence entre un neurone au repos et un neurone excité?), peut-on dire que le neurone au repos est «au potentiel de repos» (comme une ampoule éteinte) et que le neurone excité est «au potentiel d'action» (comme une ampoule allumée)? Oui et non...

- L'image de l'ampoule peut vous aider à saisir le fait que tous les signaux nerveux sont de même nature, peu importe qu'il s'agisse de signaux provenant des yeux, des oreilles, de la peau, de signaux envoyés d'une région à une autre du cerveau ou encore de la moelle épinière vers un muscle. Elle peut aussi vous rappeler que les neurones au repos diffèrent des neurones conduisant un message nerveux, et que tous vos neurones sont, en tout temps, dans l'un de ces deux états ; ainsi, nous pouvons voir l'activité de notre système nerveux comme un ensemble complexe où, à chaque instant, des neurones sont «excités» alors que d'autres sont «au repos».

- Le document **SN-13** (pages **131-132** du *Recueil*) apporte cependant une nuance : le neurone au repos produit (lui aussi!) des potentiels d'action : il conduit des influx «spontanés» et réguliers, à un certain rythme, alors que le même neurone excité conduit des influx à un rythme différent du rythme «de repos». Ainsi, nous pouvons voir l'activité de notre système nerveux comme un ensemble complexe où, à chaque instant la fréquence des influx transportés par chaque neurone est plus ou moins élevée (neurone excité) ou est égale (neurone au repos) à leur fréquence «de base, spontanée».

Gardez donc présent à l'esprit que l'image de l'ampoule allumée ou éteinte est pratique pour visualiser –et pour alléger le texte!-, mais qu'elle est en même temps un peu simpliste par rapport à la réalité...

Mais qu'est-ce qui amène un neurone au potentiel d'action?...

Pour passer du potentiel de repos au potentiel d'action, un neurone doit être stimulé. Par quoi?...

1-Dans le cas des récepteurs sensoriels (donc des neurones sensitifs possédant des dendrites spécialisés dans la peau, la rétine, etc.), un changement dans l'«environnement» du système nerveux (à l'extérieur ou à l'intérieur du corps) constitue un stimulus.

Ex. : la lumière qui frappe la rétine de vos yeux (récepteurs somatiques de type photorécepteurs) ou la distension (l'étirement) de la paroi de votre estomac (récepteurs viscéraux de type mécanorécepteurs).

2-Un neurone est toujours en contact avec des milliers d'autres neurones (on peut y dénombrer de 100 à 10 000 synapses, environ). Des neurones excités peuvent envoyer des signaux à d'autres neurones avec lesquels il font synapse (voir section suivante, 3.4.2).

À tout instant, un neurone reçoit donc des signaux de milliers d'autres neurones (ou de son environnement, dans le cas des récepteurs sensoriels) : c'est en faisant **la «somme» de tous les petits signaux** reçus à ce moment précis que le neurone déterminera s'il doit ou non ouvrir ses canaux à Na^+ pour dépolariser la membrane de son axone, c'est-à-dire produire un potentiel d'action (= un influx nerveux). Pour produire un potentiel d'action, la somme des stimulus doit avoir une intensité suffisante. En effet, il y a un seuil à atteindre, **le seuil d'excitation**². Le neurone doit donc déterminer, à tout moment, si la somme des signaux qu'il reçoit des synapses environnantes requiert ou non qu'il transmette à son tour un potentiel d'action : on a donc bien raison d'associer **les synapses** à une **tâche d'analyse**.

Lorsque le neurone reçoit des stimuli, sa membrane se dépolarise ou s'hyperpolarise au niveau des dendrites ou du corps cellulaire : il y a des dépolarisations et des hyperpolarisations locales, qui se rejoignent et s'additionnent à la base de l'axone, dans **la «zone gâchette»**. À ce niveau, à cet instant, si la dépolarisation n'est pas assez intense (*stimulus infraliminaire*), la membrane se repolarise aussitôt : le neurone reste au repos. Si au contraire la membrane se dépolarise au point où le potentiel atteint ou dépasse le seuil d'excitation dans la zone gâchette (*stimulus supraliminaire*), la dépolarisation se propage le long de l'axone du neurone. Il y a dépolarisation

² Note : selon la littérature, le seuil d'excitation d'un neurone est de -30mV ou de -55mV en moyenne... : cette donnée varie selon les ouvrages consultés et, en réalité, selon les neurones! Retenons pour notre part la valeur de -55mV .

totale, c'est-à-dire **potentiel d'action ou influx nerveux : le potentiel augmente de 100 mV**, et ce peu importe le neurone et peu importe la circonstance. Donc si on compte à partir de -70 mV (le potentiel de repos), on atteint une valeur de potentiel d'action de $+30$ mV ($-70 + 100 = 30$) [revoir la FIG. 3 de SN-12, p. **118** du *Recueil*].

En bref : si un potentiel d'action est déclenché, il parcourra le neurone comme une onde, jusqu'au bout (terminaisons axonales), sans perdre de son amplitude ; celle-ci est toujours égale à 100 mV. Par contre, si le neurone n'est pas suffisamment stimulé, il demeurera au repos. Pour ces deux raisons, on dit que la transmission de l'influx nerveux obéit à **la loi du tout ou rien**.

Revenons à notre neurone excité et observons un point x le long de son axone. Quelques millièmes de secondes après avoir subi une dépolarisation, **la membrane se repolarise** puisque les canaux à Na^+ se referment (les ions $+$ arrêtent d'entrer) et que d'autres canaux (à K^+) s'ouvrent et laissent sortir des ions positifs : il y a de moins en moins d'ions $+$ dans la cellule, donc le potentiel de membrane redescend. Enfin, des «pompes à ions» rétablissent les concentrations initiales d'ions en repoussant des Na^+ hors de la cellule et en réintroduisant des K^+ à l'intérieur. Une onde de repolarisation suit donc de près l'onde de dépolarisation qui s'est produite : la membrane du neurone retourne au potentiel de repos (à -70 mV) ; ce n'est qu'une fois revenue dans cet état qu'elle peut transporter un autre influx nerveux. Tant qu'il est dépolarisé, on dit que le neurone est en **période réfractaire**, c'est-à-dire qu'un autre stimulus (même très fort) qui lui parviendrait à ce moment ne pourrait pas l'exciter (le dépolariser) puisqu'il l'est déjà! Sa membrane doit d'abord être repolarisée avant de pouvoir subir une nouvelle dépolarisation [voir la FIG. 6 de SN-12, *Recueil* p. **122**].

Si tous les potentiels d'action sont égaux, comment expliquer qu'on puisse percevoir une sensation (par exemple une douleur) avec plus ou moins d'intensité?

Un stimulus plus fort est perçu comme tel par le cerveau parce qu'il excite un plus grand **nombre de récepteurs** et qu'il déclenche des influx nerveux à une **fréquence plus élevée**. Par exemple, une forte pression excite des mécanorécepteurs dans un certain rayon sur la peau et produit une série d'I.N. très rapprochés les uns des autres, alors qu'une pression plus légère n'est pas détectée sauf par les récepteurs situés à cet endroit même et produit une succession d'I.N. relativement moins rapprochés dans le temps (il s'en produit quand même plusieurs par seconde!).

À quelle vitesse l'influx nerveux se déplace-t-il ?

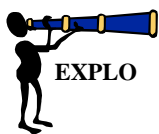
Tous les neurones ne conduisent pas l'I.N. à la même vitesse. Ainsi, les neurones dont l'axone est **myélinisé** conduisent l'I.N. plus rapidement que ceux dépourvus de myéline. Cela s'explique par le fait que, dans les fibres myélinisées, l'I.N. «saute» d'un noeud de Ranvier à l'autre sur l'axone (conduction saltatoire) : au total, seuls quelques points de la membrane doivent être dépolarisés, alors qu'il doit parcourir (et dépolariser la membrane sur) toute la longueur de l'axone d'une fibre non myélinisée (conduction continue). Pour faire une analogie, on pourrait comparer la conduction continue à la lecture intégrale d'un texte, et la conduction saltatoire à la lecture du premier mot de chaque paragraphe du texte. La plupart des axones de nos neurones sont myélinisés ; dans ce cas, l'influx nerveux se propage le long d'un axone à environ 150 mètres par seconde (plus de 400 km/h!). Par exemple, les images se formant sur la rétine sont acheminées au cerveau en 70 millisecondes. Dans un axone non myélinisé, le potentiel d'action peut se propager aussi lentement que 0,5 m/s.

La **température** aussi influence la vitesse de conduction de l'influx nerveux dans certains neurones : sachant que l'on met de la glace pour diminuer les signaux de douleur, pouvez-vous déduire quelle est l'influence de la température sur la vitesse de conduction ?...

Enfin, plus le **diamètre** d'un **axone** non myélinisé est grand, plus l'influx y circule rapidement. Dans le système nerveux de certaines espèces animales (des calmars par exemple), on trouve des axones «géants» qui assurent une conduction rapide des influx nerveux malgré l'absence de gaine de myéline de leurs neurones. Ils constituent des sujets d'études prisés pour l'étude de l'activité des neurones, vu la taille de leurs ceux-ci!

3.4.2 Aspect chimique : la transmission du message nerveux dans les synapses

Une fois l'influx nerveux parvenu aux extrémités des terminaisons axonales, qu'arrive-t-il?



EXPLORATION

COMMENT EST FAITE UNE SYNAPSE ET QUE S'Y PASSE-T-IL?

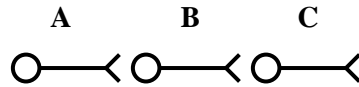
CONSIGNE : Compléter le texte et répondre aux questions.

Réf. : présent document pages 17-18 + Recueil pages 127 à 133 (SN-13) et figures des pages 123 et 124 (SN-12).

Pour compléter et réviser : *Le cerveau à tous les niveaux* (liens « Synapses » via ma page web).

- Rappelons qu'une synapse implique **deux neurones** : l'un **pré-synaptique**, l'autre, **post-synaptique**. On détermine l'élément pré-synaptique (*pré* = avant) et l'élément post-synaptique (*post* = après) en fonction de la direction suivie par l'influx nerveux.

Ainsi, dans l'exemple suivant :



Le neurone A est pré-synaptique par rapport à B (le B étant post-synaptique). Cependant, si l'on considère les neurones B et C, le B est pré-synaptique alors que le C est post-synaptique. Il s'agit donc d'une notion *relative*, qui dépend du point de référence (= l'autre neurone impliqué).

- Après avoir parcouru l'axone du **neurone pré-synaptique** sur toute sa longueur, lorsqu'il parvient aux (1) _____ **terminaux**, l'influx nerveux se trouve face à un vide : en effet, les neurones ne se touchent pas. Ils sont séparés par un mince espace d'environ 30 millièmes de millimètres : la (2) _____ **synaptique**. Comment franchir ce fossé?...
 - Dans les boutons terminaux, l'influx nerveux provoque le déplacement de vésicules (petites «bulles») pleines de molécules-messagères, qui vont déverser leur contenu dans le mince espace qui sépare le neurone pré-synaptique (excité) du neurone post-synaptique. Rappelons que **ces molécules-messagères sont appelées (3) _____** ou neuromédiateurs.
 - Le **neurone (4) _____ synaptique** recueille ces molécules-messagères à l'aide de **chémo-récepteurs** spécifiques, insérés en surface de sa membrane cellulaire, au niveau du (5) _____ cellulaire ou des dendrites. (Attention! Ces récepteurs \neq les récepteurs sensoriels du SN : ce sont de petites protéines membranaires, donc faisant partie de la membrane du neurone, qui ont une forme appropriée pour capter le neurotransmetteur libéré dans cette synapse).
 - Le potentiel de membrane du neurone post-synaptique est alors modifié localement, à la hausse ou à la baisse, puisque le signal ainsi reçu produit soit un **PPSE**, soit un **PPSI**.
 - Un potentiel post-synaptique excitateur (PPSE) se produit dans une synapse excitatrice : la liaison du neurotransmetteur aux récepteurs induit **l'entrée d'ions Na^+** dans le neurone post-synaptique, ce qui fait monter son potentiel de membrane (*Recueil*, p. 124, graphique b). Il a alors plus de chance d'être excité car son potentiel s'approche du seuil d'excitation.
 - Un potentiel post-synaptique inhibiteur (PPSI) se produit dans une synapse inhibitrice : la liaison du neurotransmetteur aux récepteurs induit **l'entrée de Cl^- ou la sortie de K^+** , ce qui abaisse le potentiel de membrane du neurone post-synaptique (*Recueil*, p. 124, graphique a). Il a alors moins de chances d'être excité car son potentiel s'éloigne du seuil d'excitation.
- Comme il a été mentionné précédemment, c'est **l'addition des potentiels gradués** (PPSE et PPSI) qui atteignent simultanément la **zone gâchette** qui, permettant ou non l'atteinte du **seuil**

d'excitation, détermine le comportement de **l'axone du neurone post-synaptique** : production d'un influx nerveux (potentiel d'action) ou maintien du potentiel de repos.

Q1) Dans lequel de ces deux cas le potentiel de membrane du neurone post-synaptique s'approche-t-il du seuil d'excitation du neurone (ex. : il passe de -70mV à -60mV) :

- une synapse excitatrice? une synapse inhibitrice?

Q2) Et dans l'autre cas (ex. : si le potentiel descend à -80mV), le neurone post-synaptique... :

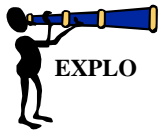
- est plus facile à exciter que lorsque le neurone est au repos (à -70mV)?
 est plus difficile à exciter que lorsque le neurone est au repos (à -70mV)?

•Après que le neurotransmetteur ait fait son travail, il est détruit, capturé par des cellules gliales (ex. : astrocytes) ou récupéré par le neurone pré-synaptique pour être réutilisé. Il est essentiel de **libérer rapidement les chémorécepteurs de neurotransmetteur** : aucun autre signal ne pourra être capté tant que la place est occupée.

•De nombreuses substances jouent le rôle de **neurotransmetteur** dans le SN. La plus connue est sans doute l'acétylcholine (ACh), qui est présente dans toutes les **jonctions neuromusculaires** (JNM). Rappel : JNM = jonction entre un neurone _____ (= 6) (l'élément pré-synaptique) et une fibre **musculaire** (l'élément post-synaptique), qui fonctionne exactement comme une synapse entre deux neurones. La p. 134 du *Recueil (SN-13)* présente les principaux neurotransmetteurs connus et certaines de leurs caractéristiques. Certains neurotransmetteurs se retrouvent dans des lieux bien précis du SN, alors que d'autres sont relativement plus «communs». Certains provoquent toujours des PPSE (ex. : le glutamate ou acide glutamique), d'autres toujours des PPSI (ex. : le GABA). Pour d'autres encore, on constate qu'une même molécule peut être excitatrice dans certaines synapses et inhibitrice dans d'autres. L'effet dans la synapse dépend alors du type de récepteur qui s'y trouve. Ainsi, il existe plus d'une sorte de récepteurs à acétylcholine ; l'ACh produira un PPSE ou un PPSI selon le type de récepteur présent dans la synapse. On peut donc dire d'une synapse qu'elle est excitatrice ou inhibitrice, car il s'y trouve un neurotransmetteur et un type de récepteur, dont la liaison produira un PPSE ou un PPSI dans le neurone post-synaptique.

•Tout cela n'est quand même pas aussi simple (!) qu'il le semble. À titre d'exemple, mentionnons que des neuromodulateurs (autres molécules sécrétées par l'organisme en fonction des circonstances) ont aussi une influence sur l'effet des neurotransmetteurs dans les synapses. C'est donc toute une «soupe chimique», un ensemble de connections complexes et d'innombrables et continuelles interactions entre ces différents éléments, influencés par les

signaux reçus de l'environnement interne et externe, qui sont à l'origine des activités du cerveau! Par ailleurs, de nombreux troubles ou maladies touchant le système nerveux sont dus à des déséquilibres de neurotransmetteurs : c'est donc dire l'importance de ces derniers!



ET QUAND LES NEUROTRANSMETTEURS FONT DÉFAUT?

CONSIGNE :

Identifiez le ou les neurotransmetteurs impliqués dans chacun des troubles suivants.

Réf. : -Recueil page 134
-Lien «Neurotransmetteurs» vers une page du site *Le cerveau à tous les niveaux*)

Suggestion : Découverte. 18 mars 2007. Cannabis et schizophrénie [voir lien sur ma page web]

- a) maladie de Parkinson et dépendance : _____
- b) dépression et suicide : _____
- c) maladie d'Alzheimer : _____ et _____
- d) bipolarité (maniaco-dépression) : _____