

MÉLISSA BONNET

Avec
des jeux et
des tests

QUAND LE CERVEAU APPREND



Mémoire, sommeil, attention...
entrez dans le cerveau des enfants
avec les neurosciences cognitives

esf
SCIENCES
HUMAINES

MÉLISSA BONNET

QUAND LE CERVEAU APPREND



Création de couverture : Caroline Joubert

Couverture : © ImageFlow/Shutterstock

Picto : © Kuroksta/shutterstock ; © Sylverarts/AdobeStock

p. 17 : © SciePro/Shutterstock

p. 62 : © Vasilisa Tsoy/Shutterstock

p. 17 , 19, 28, 33, 43, 46, 53, 56, 58, 61, 62, 70, 71, 73, 77, 88, 94, 102, 104, 123, 130, 131, 158, 159, 219 : © Mélissa Bonnet

© ESF Sciences humaines, 2020

SAS Cognitia - 3, rue Geoffroy-Marie - 75009 Paris

ISBN : 978-2-7101-4009-2

www.esf-scienceshumaines.fr

Suivre notre actualité sur [Facebook](#) et [Twitter](#)

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou ses ayants droit, ou ayants cause, est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

[Remerciements](#)

[Introduction](#)

[Quelle fascinante machine que le cerveau !](#)

[Voyage au centre du cerveau](#)

[1- Entrez dans un univers passionnant](#)

[Le cerveau à l'étude](#)

[À quoi sert un cerveau ?](#)

[2 - Évolution et circonvolutions](#)

[Le cerveau prend en volume](#)

[Un développement à grande vitesse](#)

[3 - Les acteurs cérébraux entrent en scène](#)

[Les neurones : stars de la communication](#)

[Les cellules gliales : indispensables inconnues](#)

[4 - Le cerveau : grand communicant](#)

[Les lobes cérébraux : des territoires dans les hémisphères](#)

[Substance grise et substance blanche, chacune sa fonction](#)

[À la croisée des organisations](#)

[Le corps calleux : un pont entre deux hémisphères](#)

[Les aires de Brodmann : la spécialisation au service du tout](#)

[Les aires corticales primaires : entrées et sorties du système](#)

[5 - Langage cérébral et énergie](#)

[Le signal nerveux : un langage à part](#)

[La synapse : quand la chimie s'en mêle](#)

[Le cerveau, un glouton en énergie](#)

[Comment le cerveau apprend](#)

[1 - La plasticité cérébrale : une puissance dynamique](#)

[Les synapses de Hebb : une madeleine de Proust](#)

[De l'optimisation par l'élagage](#)

[Le langage dans la peau ou la cognition incarnée](#)

[La plasticité cérébrale à l'œuvre](#)

[2 - La mémoire : entre émotions et répétitions](#)

[Au début était l'émotion](#)

[Répéter et agir pour se souvenir](#)

[Lutter contre l'oubli](#)

[L'hippocampe à la source des souvenirs](#)

[La mémoire prend de l'âge](#)

3 - Le sommeil : qui dort apprend

Le train du sommeil

Le sommeil paradoxal pour consolider nos savoir-faire

Le sommeil lent (léger et profond) pour consolider nos savoirs

24 heures chrono

Quand le sommeil vient à manquer

4 - Qu'est-ce que l'attention ?

L'attention : le tout dirigé vers un but

L'attention, un choix coûteux

L'attention sélective : focalisation et inhibition

L'attention soutenue : un effort sur la durée

L'automatisation : optimiser et économiser

Le cerveau, un organe à protéger

1 - Le cerveau, ce grand sensible

Sensibilité physique

Sensibilité émotionnelle

2 - Quand le cerveau se regarde et regarde l'autre

Le réseau de repos : se placer au centre

La théorie de l'esprit : comprendre l'autre

3 - Le cerveau à l'ère du numérique et de l'intelligence artificielle

L'outil numérique : ami ou ennemi ?

Intelligence artificielle : une problématique éthique

Conclusion

Jouons un peu pour mieux comprendre

Références bibliographiques

Remerciements

C'est par la collaboration de longue durée que j'entretiens avec des acteurs incontournables du monde de l'éducation que j'ai pu mesurer l'importance de sortir de son laboratoire de recherche pour aller à la rencontre du grand public et plus particulièrement des enseignants aux interrogations légitimes et sincères. J'ai ainsi eu la chance de travailler avec nombre d'entre eux, pédagogues dévoués, créatifs et d'une profonde humanité.

J'adresse ainsi mes remerciements à l'ensemble des membres du Réseau national des *Maisons pour la science*, notamment la *Maison pour la science en Aquitaine* avec qui je collabore depuis de nombreuses années en tant que formatrice scientifique auprès des enseignants puis comme membre à part entière à la direction. Nos discussions et nos passions communes m'ont fait voyager bien plus loin dans l'univers des sciences que ma spécialisation initiale n'aurait pu l'imaginer.

Je remercie également les personnels du rectorat de l'académie de Bordeaux pour tous nos projets communs et nos échanges si riches et fructueux.

Merci à tous ceux que je rencontre, du monde de la pédagogie et du grand public, pour nos échanges toujours aussi passionnants.

Que cet ouvrage soit un pont réunissant nos univers.

Introduction

Quelle fascinante machine que le cerveau !

« Le plaisir le plus noble est la joie de comprendre »

Léonard de Vinci

Le cerveau humain est une lointaine source d'interrogations. Alors que, dans l'Antiquité, il était considéré comme la partie du corps qui permettait de le refroidir (!), les scientifiques ont progressivement décelé en lui un organe fascinant.

Le cerveau humain est une superbe machine vivante de plus de cent milliards de neurones intimement connectés les uns avec les autres par le jeu d'un réseau de communication d'une densité et d'une complexité stupéfiantes. Organe de traitement de l'information par excellence, il compile, corrèle et anticipe tout ce qui lui parvient, en temps réel.

Le cerveau fait ainsi de l'être humain un être sensible, à tout point de vue. Sensible aux informations en provenance de son environnement extérieur mais sensible également aux informations en provenance de son univers intérieur, le corps. En effet, dans tout l'organisme, il n'existe pas une seule cellule qui ne soit pas, directement ou indirectement, connectée à l'organe. De notre corps, le cerveau sait tout. Réceptacle des sensations corporelles, qu'elles soient agréables, désagréables ou bien nociceptives¹, le cerveau est pourtant lui-même, dans sa chair, insensible à la douleur.

Insensible physiquement, il est cependant d'une sensibilité extrême émotionnellement. Par cette sensibilité, le cerveau est ainsi d'une grande vulnérabilité face au stress, aux situations difficiles ou aux émotions intenses. Un organe fragile mais cependant capable de s'appuyer sur ses émotions, sources de motivation, pour se dépasser.

Contrebalançant cette sensibilité exacerbée, l'organe est également doué de raison. Il peut analyser, comparer, reproduire les actions,

pensées, informations qui lui arrivent. Il se fixe des buts et des objectifs et, lorsqu'il les atteint, s'auto-congratule par un système de récompense intégré.

Si de son univers intérieur le cerveau sait tout, de son environnement extérieur le cerveau *essaie* de savoir. Adaptatif à son présent, doué de mémoire et capable de prédictions, le cerveau humain agit et réagit à la fois dans l'espace et dans le temps. Son architecture dynamique fondée sur ses capacités de plasticité lui permet d'apprendre. De l'apprentissage d'un morceau de musique à celui du théorème de Thalès, de la réalisation d'une boucle d'un lacet de chaussures à celle d'une procédure de chirurgie, de la connaissance d'une langue étrangère à l'utilisation d'outils numériques, comment fait-il ?

Au travers des études et recherches en neurosciences cognitives, l'organe se révèle chaque jour un peu plus, tel un livre ouvert sur lequel peuvent se pencher tous les cerveaux curieux, avides de se comprendre eux-mêmes. Une lecture passionnante et vertigineuse puisqu'elle permet d'accéder à plus que de la simple biologie humaine. Elle permet de révéler l'essence du soi.

Les neuroscientifiques ne doivent pas être les seuls à pouvoir s'immiscer dans les secrets de l'organe, de sa structure à sa dynamique d'apprentissage. Ces informations doivent pouvoir être proposées au plus grand nombre et particulièrement au monde de la pédagogie pour lequel la compréhension du fonctionnement du cerveau et des mécanismes d'apprentissage des enfants et des adolescents peut aider à une démarche optimisée de transmission des savoirs.

L'idée de ce livre est à l'image de la science elle-même : celle du partage. Modestement et de la manière la plus accessible possible, cet ouvrage se propose de révéler un peu des dessous cachés du cerveau.

Connaître pour comprendre, comprendre pour partager. De l'enseignant à l'élève, du parent à l'enfant, du neuroscientifique au lecteur de cette page, un chemin est ainsi toujours accessible pour appréhender l'organe.

Alors, progressons par étapes. Intéressons-nous d'un peu plus près

à cet univers cérébral, de sa structure à sa fonction.
Ce livre vous invite à ouvrir grand les fenêtres de votre esprit pour
entreprendre une virée au cœur de ce fascinant organe.
Mon cerveau passionné espère que votre cerveau passionnant
appréciera la balade...

1. Signaux nerveux relayant la douleur.

Voyage au centre du cerveau

1- Entrez dans un univers passionnant

Le cerveau à l'étude

Il peut être délicat de s'y retrouver parmi le vocabulaire et les appellations multiples se rapportant à l'étude de notre organe cérébral : les neurosciences, les sciences cognitives, les neurosciences cognitives, la psychologie cognitive...

Pour essayer de mieux comprendre ce jargon, il est important de savoir que tous ces champs disciplinaires ne se conçoivent que par rapport à leur *angle d'étude du cerveau*.

Les **neurosciences** constituent le champ disciplinaire qui rassemble les recherches sur les *bases anatomiques et les processus physiologiques* du système nerveux. Les neurosciences elles-mêmes se déclinent en différents sous-champs disciplinaires : moléculaires, cellulaires, intégrées, comportementales, cognitives...

Les sciences cognitives s'intéressent au cerveau *qui apprend et qui prend conscience de son environnement*. Elles tentent de comprendre comment un cerveau acquiert ses connaissances, les stocke en mémoire, les récupère, les utilise et en prend conscience. Les sciences cognitives (du latin *cognitio*, action de connaître) étudient ainsi les *fonctions cognitives* comme la mémoire, l'attention, l'inhibition, la prise de décision, la planification ou la conscience. Les sciences cognitives *regroupent*, notamment, les champs disciplinaires des *neurosciences cognitives*, de la *psychologie cognitive* et de *l'intelligence artificielle*. Cependant, d'autres champs disciplinaires s'intègrent aussi plus largement dans les sciences cognitives comme la *neuropsychologie* (études des fonctions cognitives chez le patient), la philosophie ou bien encore *l'éthologie* (étude des comportements animaux).

En recherche, lorsque l'on étudie les fonctions cognitives, cela peut se

faire, notamment, au travers de l'étude de leurs *substrats organiques* (**neurosciences cognitives**), au travers de l'étude des *comportements associés* (**psychologie cognitive**), ou au travers de leur *modélisation* (**intelligence artificielle**).

Ainsi, faire des **neurosciences cognitives** revient à lever le voile sur les substrats anatomiques et les processus physiologiques qui sous-tendent les fonctions cognitives.

Il est cependant nécessaire de garder à l'esprit que si le cerveau obéit à des lois biologiques, il obéit également à des lois physiques, chimiques et mathématiques. Ainsi, et de plus en plus, l'étude du cerveau devient transdisciplinaire afin d'accéder à une compréhension plus en relief de notre organe cérébral. À titre d'exemple, citons la mécanique quantique, champ disciplinaire de la physique, qui nous a appris que la quantité de messagers chimiques (neurotransmetteurs) libérés entre deux neurones (synapses) obéissait à des lois de probabilités.

L'étude du cerveau est donc plurielle. L'organe est complexe et interpelle à lui seul toutes les sciences connues.

Au travers de toutes ces études, *avons-nous enfin compris le fonctionnement cérébral* ? Effectivement, aujourd'hui, nous avons appréhendé de nombreux aspects du fonctionnement cérébral à l'échelle des molécules, des cellules, des réseaux, des systèmes et des régions. Le fonctionnement de chacun de ces niveaux nous est accessible et compréhensible. Ce qui nous échappe encore, c'est la *compréhension dans la transversalité* : comment le cerveau s'organise pour se coordonner à tous ses niveaux structurels et fonctionnels afin de générer son « tout cérébral », c'est-à-dire vous, cerveau unique, devant cette page, qui pensez et vous interrogez ? Répondre à cette question reviendrait à percer l'un des plus grands mystères de l'humanité.

À quoi sert un cerveau ?

Avant d'entrer dans l'intimité d'un cerveau humain, de ses cellules, de sa substance, de ses capacités de communication et de son

incroyable plasticité, il nous faut d'abord répondre à une première question d'apparence toute simple : À quoi sert un cerveau ?

Gérer notre présent

Le cerveau humain fait partie de ce que l'on appelle le *système nerveux central*. Celui-ci comprend l'encéphale et la moelle épinière.

L'être humain n'est pas le seul à posséder un système nerveux central. La grande majorité des animaux en possède un. Ces animaux, comme les êtres humains, présentent un axe dit *antéro-postérieur*, c'est-à-dire un corps avec une partie postérieure et une partie antérieure (une tête) dans laquelle se concentrent des cellules spécialisées dans la transmission de messages nerveux. À noter que des animaux sans ce plan architectural antéro-postérieur et donc sans système nerveux central existent aussi. C'est le cas, par exemple, des méduses ou des étoiles de mer.

La fonction primordiale d'un système nerveux central est de maintenir, à tout moment, l'organisme dans les *conditions optimales à sa survie*, en développant différents processus de contrôles et d'actions. L'ensemble des mécanismes de régulation et de stabilisation qui permettent à l'organisme de maintenir toutes ses constantes physiologiques à des valeurs conformes à sa survie se nomme *homéostasie* (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur L'homéostasie : entre équilibre et déséquilibre

De la cellule à l'organisme entier, toute composante vivante est en perpétuelle recherche de l'homéostasie. Si l'homéostasie correspond, à l'échelle de la cellule, à un état d'équilibre préférentiel, à l'échelle de l'environnement extérieur, elle correspond à un état de déséquilibre.

En effet, une cellule peut nécessiter, pour sa survie, de contenir, par exemple, plus d'eau ou plus de sucres que le milieu extérieur. Les conditions favorables à sa survie exigent donc que son milieu intérieur soit potentiellement très différent du milieu extérieur dans lequel elle évolue.

L'homéostasie correspond ainsi à la préservation de l'équilibre intérieur, quelle que soit l'évolution éventuelle des paramètres extérieurs. Cela peut se comprendre aisément avec la température. Quelle que soit la température extérieure, un corps humain ne peut fonctionner correctement (et donc survivre) qu'à une température proche de 37 °C. Ainsi, même si le milieu extérieur est à 5 °C ou 45 °C, le corps doit toujours être à 37 °C. La permanence de

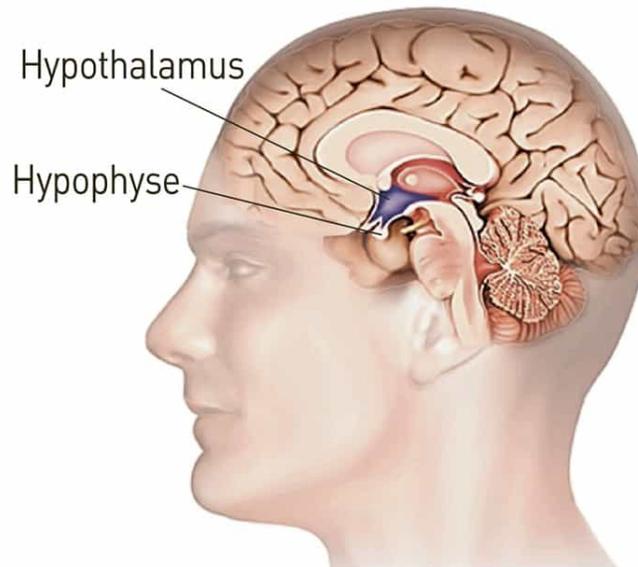
l'état d'équilibre du milieu intérieur (37 °C) ne peut se traduire que par un déséquilibre avec le milieu extérieur.

Il est important de savoir que les règles les plus fondamentales de la physique tendent toujours vers une équilibration/homogénéisation des milieux. S'il existe un déséquilibre entre deux milieux, les lois de la physique tendront vers cette rééquilibration. Prenons à nouveau l'exemple de la température corporelle, si un corps à 37 °C est placé dans un environnement à 5 °C, il va se refroidir. En effet, les règles physiques d'équilibration des milieux provoquent la diffusion de la chaleur du milieu où elle est en plus grande quantité (le corps) vers le milieu où elle l'est le moins (le milieu extérieur). Sans mécanisme de régulation de sa température interne, un corps humain placé dans un milieu extérieur froid se refroidirait donc trop rapidement, altérant son équilibre interne et compromettant dangereusement sa survie.

Ainsi que nous en aurons la démonstration avec le signal nerveux, tout organisme est dit vivant lorsqu'il est capable de *lutter* à son propre avantage *contre* ces lois physiques d'équilibration des milieux. Dans un organisme, cette lutte n'est possible que par une capacité spécifique du vivant : *la maîtrise des énergies*.

Au minimum, le système nerveux central doit donc pouvoir contrôler et maintenir *en temps réel* des variables physiologiques, telles que la température corporelle, les besoins énergétiques, hydriques, de sommeil ou de reproduction.

Ce contrôle en temps réel peut sembler représenter une fonction extrêmement basique, mais elle est pour autant d'une importance capitale. Si l'organisme est carencé en aliments, en eau ou en sommeil et qu'il ne s'en rend pas compte, les conséquences peuvent vite devenir dramatiques. Nous savons, par exemple, qu'un être humain peut difficilement survivre à une carence hydrique de (seulement) deux jours. Imaginez un organisme incapable de ressentir cette carence hydrique (absence de sensation de soif) et qui ne développerait donc pas immédiatement un comportement destiné à rechercher et trouver de l'eau. Gageons qu'il ne survivrait pas longtemps.



**Figure 1 : Localisation de l'hypothalamus (ici en violet) dans le cerveau humain
(Source : Larousse médical)**

Dans le cerveau humain, le responsable de ces fonctions (et de bien d'autres) est *l'hypothalamus*, petite structure phylogénétiquement ancienne de quelques centimètres cubes logée en plein centre de l'organe cérébral. L'hypothalamus est une glande qui, comme son nom l'indique, se situe *sous* (*hypo-*) une autre structure du cerveau appelée *thalamus*. Pour vous représenter la localisation de l'hypothalamus à l'échelle de votre anatomie, levez votre langue et touchez l'arrière de votre palais, l'hypothalamus se situe dans le cerveau quasiment à l'aplomb (voir fig. 1).

En plus des nombreux réseaux cérébraux auxquels il appartient, l'hypothalamus est également connecté via *le système nerveux autonome* à tous les organes du corps (voir encadré ci-dessous).

POUR ALLER PLUS LOIN

Le système nerveux autonome

Géré par l'hypothalamus, le système nerveux *autonome* (SNA) est ainsi nommé, car il regroupe tous les signaux nerveux qui échappent au contrôle volontaire et conscient. Le SNA innerve et contrôle, notamment, l'ensemble des organes viscéraux.

Le SNA est constitué de deux sous-systèmes : le système nerveux *sympathique* et le système nerveux *parasympathique*. Si le système nerveux sympathique a pour rôle de mobiliser les ressources énergétiques pour permettre à un organisme de réagir rapidement (par exemple, en augmentant la fréquence cardiaque et en diminuant les fonctions digestives), l'action du

système nerveux parasympathique est, généralement, à l'exact opposé (diminution du rythme cardiaque, augmentation des fonctions digestives).

Le nerf vague représente une des voies de communication privilégiées du système nerveux parasympathique pour connecter la moelle épinière à des neurones positionnés à côté, voire au sein même des organes viscéraux.

Bien que ne représentant que 1% du volume du cerveau, l'hypothalamus porte à lui seul des fonctions absolument incontournables. En effet, c'est la structure capable de générer nos sensations de faim ou de soif, de mettre en place notre cycle veille/sommeil (voir Le train du sommeil, p. [129](#)), de contrôler notre température corporelle, en un mot de faire en sorte que notre organisme se maintienne dans les conditions optimales à sa survie.

Les fonctions portées par l'hypothalamus sont tellement essentielles qu'une lésion à quelque niveau que ce soit de la structure peut nous être fatale. Cependant, du fait de sa position centrale au niveau cérébral, l'hypothalamus est difficile d'accès et donc relativement à l'abri de traumatismes directs.

Faisons un point d'étape : nous venons de voir qu'un cerveau a initialement pour fonction de gérer *notre présent*. Comment survivre et dans quelles conditions à l'instant T ? Avons-nous trop froid ou trop chaud ? Avons-nous assez mangé, assez bu, assez dormi ? Tous nos besoins sont-ils satisfaits ?

Si tous nos feux sont au vert, alors passons ensemble à l'étude d'une autre fonction cérébrale capitale, progressivement apparue avec l'évolution des espèces : *la mémoire*.

Se souvenir de notre passé

Quelle importance peut-il y avoir à posséder un passé ? Quel atout cela peut-il représenter à l'échelle d'un organisme d'être capable de se souvenir ?

Avoir un passé, c'est ne plus se contenter de simplement réagir aux événements qui surviennent dans notre présent, ne plus les subir comme si c'était toujours la première fois, pouvoir enfin évoluer et être capable de générer des comportements plus adaptés et plus

optimisés.

Avoir un passé, c'est se donner une chance de ne plus refaire encore et toujours les mêmes erreurs.

Par exemple, se souvenir que traverser ce petit chemin communal, c'est la certitude de se faire attaquer par le doberman local peut se révéler décisif au développement d'une stratégie d'évitement pour notre prochain trajet... Comme on le comprend aisément avec cet exemple, se souvenir, c'est avoir appris, et cet apprentissage est susceptible d'augmenter significativement les chances de survie de l'organisme (ou *a minima* d'en diminuer les points de suture !).

Pouvoir générer des souvenirs (*encodage*) **et** pouvoir s'en rappeler (*récupération*) représente l'équation à deux dimensions de toute mémoire et donc *de tout apprentissage*.

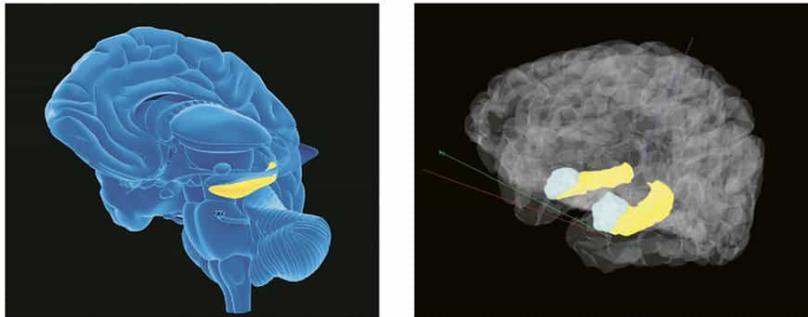


Figure 2 : Localisation des hippocampes dans un cerveau humain

À gauche : Représentation schématisée d'un cerveau humain en coupe sagittale. L'hippocampe de l'hémisphère gauche apparaît en jaune orangé.

À droite : Véritable cerveau humain après segmentation numérique (mise en évidence des volumes) des hippocampes, en jaune, et des amygdales cérébrales en bleu (carrefours des émotions). Les hippocampes sont positionnés en arrière des amygdales cérébrales (Source : M. Bonnet).

La genèse de souvenirs a été autorisée au travers de l'évolution des espèces par le développement de nouvelles régions cérébrales : les *régions hippocampiques* (voir fig. 2).

Les *hippocampes* sont des structures sous-corticales, c'est-à-dire localisées sous le cortex cérébral (*cortex* signifie étymologiquement « écorce ». Le cortex cérébral est donc la partie la plus superficielle du

cerveau).

Les hippocampes sont des structures bilatérales, c'est-à-dire qu'il y en a un dans chaque hémisphère cérébral. Ils sont situés dans les lobes temporaux médians. Les hippocampes *encodent* et *récupèrent* nos souvenirs. Ils sont les gardiens d'une grande partie de nos mémoires (voir La mémoire : entre émotions et répétitions, p. [117](#)).

Avoir un passé et pouvoir s'en souvenir, c'est la promesse d'une *adaptation optimisée à notre présent*. Nos régions hippocampiques constituent ainsi une boîte à outils révolutionnaire que nous partageons avec de nombreuses espèces animales.

Mais il y en a une autre...

Anticiper notre futur

S'intéresser au cortex préfrontal et à son développement permet d'appréhender de la meilleure des façons possibles à la fois une particularité humaine, mais également ses conséquences cognitives chez l'enfant.

Le *cortex préfrontal* est la partie la plus antérieure d'un cerveau humain et la plus récente sur le plan évolutif. Comme son nom l'indique, cette région est située derrière le front. Le cortex préfrontal, que l'on nomme aussi *régions préfrontales*, est particulièrement développé chez les primates humains et non humains. L'être humain possède les régions préfrontales les plus développées du règne animal (voir fig. 3).

Ces régions portent les fonctions cognitives dites de *haut niveau*, notamment les *fonctions exécutives*. Les fonctions exécutives sont nommées ainsi, car ce sont des fonctions cognitives *orientées vers un but*. Elles regroupent les fonctions de contrôle, de planification, de prise de décision, de stratégie et d'inhibition.

Les régions préfrontales permettent donc de développer des comportements orientés vers des buts. Pour cela, elles sont capables de faire des *prédictions* permettant à l'organisme de *se projeter dans le futur*. En se projetant dans le futur, le cerveau devient capable

d'anticiper les *conséquences* de ses actions.

Pour réaliser ce tour de force, les régions préfrontales évaluent en permanence *l'écart* entre leur *prédiction* (le résultat attendu d'une action, par exemple) et la *réalisation effective* (les retours sensoriels associés à l'action réalisée). Les régions préfrontales prédisent donc des conséquences et les confrontent avec la réalité obtenue.

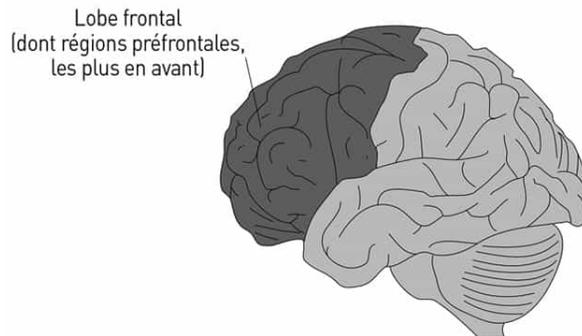


Figure 3 : Les régions frontales et préfrontales (Source : M. Bonnet)

Notre quotidien est rempli de ces mises en jeu des capacités de prédiction des régions préfrontales. Il est même possible d'en avoir un aperçu conscient : par exemple, il vous est peut-être déjà arrivé de lancer une boule de papier vers une poubelle éloignée. Vous avez alors peut-être pressenti (avec une quasi-certitude) que la boule de papier serait à *l'extérieur* de la poubelle alors même qu'elle n'avait *pas encore* atteint sa cible. Cette sensation est la résultante de l'activation des régions préfrontales médiales (régions situées entre les deux cortex préfrontaux gauche et droit) qui ont prédit (avec raison !) que la boule de papier serait dehors. Ce sont les mêmes activations préfrontales qui apparaissent chez le joueur de tennis en finale de Roland-Garros alors qu'il se prend la tête entre les mains juste après son dernier service : ses régions préfrontales ont *vu* que la balle était « fautive » *avant* qu'elle ne touche le sol !

L'importance de l'erreur

Les prédictions qui se sont révélées fausses sont plus fortement codées à l'échelle cérébrale que celles qui se sont révélées exactes. Toute erreur témoigne d'une absence de maîtrise par le cerveau d'une action, d'une procédure ou d'un comportement et

indique donc que des ajustements sont nécessaires. Les retours d'erreur obligent le cerveau à revoir ses programmes et/ou à noter que le contexte a changé et que certains programmes, autrefois corrects, doivent évoluer. C'est la notion de *flexibilité*, fonction fortement portée également par ces mêmes régions préfrontales.

Le cerveau jeune, aux régions préfrontales immatures, nécessite un accompagnement important pour lui permettre de détecter ses propres erreurs. À noter qu'entraîner un cerveau à repérer ses erreurs, c'est le mettre parfois en situation d'en faire. Tout apprentissage s'appuie sur deux valences cérébrales : le retour d'erreur et le système de la récompense qui gratifie l'organe pour chaque réussite. Échec et réussite représentent ainsi deux marqueurs puissants pour le cerveau et l'écart entre ces marqueurs lui donne les pistes d'amélioration de ses programmes.

Attention cependant à l'utilisation de l'erreur/échec dans le cadre d'un apprentissage, car échouer trop souvent sans jamais réussir est un écueil dans lequel il ne faut surtout pas laisser tomber le cerveau. Si le cerveau ne fait que constater ses erreurs sans jamais réussir, il se détournera de l'exécution de la procédure ou du comportement. La réussite et l'activation consécutive du système de récompense favorisent la motivation. Tout échec la déstabilise.

La reconnaissance de l'erreur est essentielle à un fonctionnement optimisé du cerveau, mais l'erreur en elle-même reste à manipuler avec précaution dans le cadre de tout apprentissage.

De cet exemple, nous pouvons comprendre que plus l'exercice de prédiction est fréquent (entraînements réguliers du joueur professionnel, par exemple), plus les gestes moteurs qui portent la tâche en question s'amélioreront et plus la prédiction des résultats associés aux prochaines actions motrices sera affinée.

L'effet de cette prédiction a donc deux niveaux de bénéfices éventuels :

- une *amélioration de la réalisation de l'action en question* (par exemple, une amélioration de la mise en jeu des régions cérébrales motrices impliquées dans la réalisation d'un service au tennis) ;
- une *amélioration des prochaines capacités de prédiction* des régions préfrontales (par exemple, mieux anticiper que le service sera extérieur aux limites du terrain).

Plus le cerveau sera apte à *voir loin dans le temps*, plus il sera en mesure de corriger et d'améliorer ses comportements, actions et fonctions *dans son présent* mais également les prochaines prédictions

dans son futur.

Zoom

Les athlètes de haut niveau : l'excellence de la prédiction



Voici deux vidéos de la légende du tennis Steffi Graf qui permettent d'appréhender, en partie, l'excellence préfrontale des champions sportifs.

Dans la première vidéo (www.youtube.com/watch?v=cLLNAgUAL1c), de 0.36 à 0.42 et à 1.51 il est possible d'avoir un aperçu de la capacité de son cerveau à connaître les limites exactes du terrain à tout moment et malgré ses déplacements perpétuels. Cela peut paraître simple lorsque nous regardons jouer des professionnels, mais savoir ainsi placer ses balles si près des limites extérieures du terrain témoigne à la fois d'une grande maîtrise motrice, mais également de capacités de prédiction exceptionnelles. Dans la deuxième vidéo (www.youtube.com/watch?v=nWDF67zvZCo), il est possible de constater à 0.29 que son cerveau a pris une décision sur l'endroit précis vers lequel il allait envoyer la balle dans le camp adverse, à 0.30 que la balle est déjà frappée mais que le cerveau regarde toujours à l'endroit de la frappe, à 0.31 que la balle tombe sur le terrain et que le feed-back visuel donne à Steffi Graf le résultat de sa prédiction et de son action motrice. À aucun moment de son processus de décision et de frappe, elle n'a regardé l'endroit où elle avait choisi d'envoyer la balle. Une seule information à suivre visuellement : la balle. Le reste de la procédure, notamment le lieu précis visé dans le camp adverse, s'est fait à l'aveugle : le cerveau n'avait pas besoin de voir, il y était déjà...

Par leurs capacités d'anticipation et de prédiction, les régions préfrontales sont impliquées dans la gestion des *difficultés* qui peuvent apparaître dans les situations *nouvelles*, *conflictuelles* ou *complexes*. En effet, nous avons tous en tête, dans des situations tendues, des phrases comme « n'envenimons pas la situation ». Ce genre de phrases porte en son sein la prédiction/vision d'un futur peu engageant et plaide pour un ajustement comportemental consensuel du *présent* commun.

Parce que les problèmes, les pièges, les difficultés, les conséquences ont été anticipés, alors il peut être possible de modifier notre présent

pour s'autoriser un meilleur futur.

Ces informations sont fondamentales pour comprendre les processus cognitifs de l'enfant et de l'adolescent. En effet, il est important de savoir que non seulement ces régions préfrontales sont apparues très tardivement dans l'évolution des espèces mais que leur développement et leur maturation chez l'être humain ne sont pleinement effectifs que vers l'âge de 25-30 ans... Autant dire que chez l'enfant, l'adolescent, voire même chez le jeune adulte, ces régions préfrontales sont loin d'être complètement matures.

Avant l'âge de 25 ans, l'immaturité de ces régions cérébrales a pourtant des conséquences majeures à savoir qu'elle est à l'origine de difficultés pour se projeter, prédire, anticiper à la fois les buts mais également et surtout les conséquences de ses actions. Chez les jeunes, cette immaturité est ainsi susceptible d'expliquer un certain nombre de *conduites à risques*.

Prenons l'exemple d'un enfant de 4 ans qui traverse la route sans regarder ni à gauche, ni à droite. Le parent effrayé et en colère sermonnera son enfant : « Tu es inconscient ! Tu aurais pu te faire renverser ! » En effet, alors que le parent aura vu à l'avance tout un *futur* effrayant, de l'impact de la voiture à l'image du corps de son enfant sur la chaussée, l'enfant, quant à lui, n'aura toujours vu que l'autre côté de la route. Son *unique présent*.

Pour être conscient du danger, il est nécessaire d'être en mesure de voir le futur et les conséquences éventuelles qu'il pourrait renfermer. L'immaturité préfrontale des enfants est en partie responsable de cette *inconscience du danger*. C'est parce que le cerveau d'un enfant est encore mal équipé pour anticiper le futur qu'il a tellement besoin d'être accompagné pour apprendre à le prédire (voir encadré ci-dessous).

Appréhender le temps

Par l'immaturité de ses régions préfrontales, l'enfant est en délicatesse pour appréhender toutes les composantes associées à la notion de temporalité : que représente une semaine ? Combien de temps cela va-t-il me prendre d'apprendre ce poème ?

Un adulte, à qui est demandée une tâche précise pour une échéance définie, saura

combien de temps allouer dans son agenda pour pouvoir répondre efficacement et dans les délais à cette demande. Au contraire de l'adulte, un enfant n'a pas encore cette facilité et peut éprouver des difficultés pour estimer le temps qui lui sera nécessaire pour apprendre une leçon ou réaliser un exercice. Également, il lui sera difficile d'envisager des échéances temporelles, comme la semaine prochaine ou le mois prochain (ou même parfois, quand ils sont très jeunes, les prochaines heures).

Il peut ainsi être parfois délicat pour l'enfant, en difficulté permanente sur les notions temporelles, d'utiliser de manière efficace des outils de gestion de temps comme un agenda, un calendrier ou même une horloge. À noter que le passage de l'école au collège peut accentuer ces problèmes, car le jeune collégien devient potentiellement responsable du jour au lendemain de son agenda personnel.

Aussi, il peut être avantageux pour le pédagogue et pour le parent d'aider l'enfant (et le jeune collégien) dans la gestion de son emploi du temps et/ou dans l'estimation du temps nécessaire à la révision de sa leçon ou à la résolution d'un exercice.

Aider un jeune cerveau à s'approprier la notion de temporalité peut lui permettre de gérer de manière plus efficace et plus autonome son propre emploi du temps et les impératifs que celui-ci va contenir (révisions, rédactions, etc.).

Rappelons, cependant, que la maturation des aires préfrontales *ne suit pas* une loi binaire, mais un *continuum* : à savoir que ce n'est pas parce qu'un enfant n'est pas complètement mature au niveau de ses régions préfrontales qu'il ne peut pas déjà en porter les fonctions. Cependant, même s'il est capable de prédire et d'anticiper certaines conséquences de ses actions, il ne sera jamais aussi efficace que ne peut l'être un adulte.

Le but d'une leçon

Pédagogiquement parlant, l'enseignant ou le parent sera face à un cerveau qui n'est pas encore assez mature pour porter convenablement les fonctions exécutives. Rappelons que ces fonctions exécutives sont orientées vers des buts. L'élève (ou l'enfant) aura ainsi également besoin d'être fortement accompagné pour comprendre, par exemple, le but exact d'une leçon ou d'un exercice. Car, pour lui, le but d'une leçon est une projection vers le futur d'un travail dans son présent. Une gymnastique temporelle délicate pour l'enfant qu'il doit apprendre à maîtriser.

Plus le pédagogue ou le parent saura expliquer la finalité d'un exercice, plus il sera facile pour le cerveau de l'enfant de comprendre, de lui-même, les différentes étapes qui y mèneront.

À ce niveau se situe toute la pertinence de l'accompagnement de l'enfant par un adulte, car ces fonctions, bien qu'existantes, sont encore en profond développement (voir encadré « Le but d'une

leçon », p. 17). N'ayant pas encore exprimé tout leur potentiel, elles nécessitent de nombreuses optimisations. Il est, cependant, important de souligner que le développement des fonctions portées par les régions préfrontales est variable d'un enfant à un autre, car la maturation de ces régions peut être plus ou moins rapide selon les individus.

Pour terminer, sachons que les régions préfrontales sont dites « *last in, first out* ». Ce qui signifie qu'elles sont les dernières à se mettre en place dans le cerveau humain mais également les premières à s'étioler avec le vieillissement. En effet, ces régions, arrivées très tardivement dans l'évolution et qui mûrent aussi à retard chez l'être humain, sont par conséquent excessivement *fragiles*. Pour nous en convaincre, il nous suffit de voir toutes les « sympathiques » conséquences d'un petit verre de trop... En quelques instants, nous effaçons deux millions d'années d'évolution... (!) (voir encadré ci-dessous)

Zoom sur Le choix, une liberté préfrontale

Le développement cérébral doit être compris comme un processus dynamique pendant lequel le cerveau construit et organise en parallèle sa structure et la fonction que cette structure doit porter. Cet équilibre subtil oscille tout au long du processus de développement du cerveau jusqu'à sa pleine maturation, le rendant particulièrement fragile durant cette période. Ainsi, pendant toute sa phase de développement et de maturation, un cerveau sera particulièrement vulnérable à tout élément perturbateur, notamment les substances exogènes telles que l'alcool ou les drogues. Chez le jeune, ces substances sont susceptibles de fortement compromettre le fragile équilibre structurel et fonctionnel que le cerveau essaie de maintenir pendant sa phase de développement.

Largement immatures et naturellement fragiles, les régions préfrontales portent pourtant les fonctions primordiales de *prise de décision*. Anticiper les conséquences dans son futur pour être capable de faire le meilleur des *choix* possibles dans son présent représente ainsi une difficulté naturelle chez le sujet jeune. Les effets de la consommation de drogues et d'alcool se surajoutent à ces difficultés initiales. En découle un profond manque de discernement, pas seulement pendant la phase de consommation, mais également au moment du *choix* de la prochaine. Pour éviter une spirale délétère qui finit par abolir le discernement mais aussi une problématique addictive susceptible de débiter, il est important de sensibiliser les jeunes enfants sur ce qu'une consommation de drogues ou d'alcool est susceptible de leur retirer : leur choix de dire non.

Être conscient de sa fragilité cérébrale, vouloir protéger son cerveau et les capacités en devenir qu'ils portent peut permettre à l'enfant d'avoir le discernement suffisant pour dire « non » à la proposition de sa première consommation.

La fonction essentielle d'un cerveau humain est de préserver en temps réel la survie de l'organisme dont il a la charge. Pour cela, il peut s'appuyer de manière transversale sur plusieurs niveaux structurels correspondant à autant de niveaux évolutifs.

Passé, présent et futur, le temps est l'allié du cerveau. Doté à la fois de capacités de mémoire et d'anticipation, le cerveau humain peut voyager dans le temps de ses comportements, de leurs racines dans le passé jusqu'à leurs conséquences éventuelles dans le futur. Avec toujours un seul but : maintenir, dans la durée, le meilleur des présents possibles.

3 NOTIONS À RETENIR

- Le cerveau se développe jusqu'à l'âge de 25 ans.
- L'immaturation préfrontale est responsable des conduites à risques chez l'enfant.
- L'erreur est un passage obligé de tout apprentissage.

2 - Évolution et circonvolutions

Pour comprendre le cerveau, il est particulièrement important de s'intéresser à sa dynamique d'évolution au travers des espèces.

Le cerveau prend en volume

S'intéresser à l'évolution du cerveau, c'est faire un premier constat : le cerveau a fortement évolué en termes de *volume*, selon deux orientations principales : *vers l'extérieur et vers l'avant* (voir encadré ci-dessous).

Neuromythe

La taille du cerveau est un critère d'intelligence

FAUX. Ce n'est pas parce qu'un éléphant a un cerveau plus gros que le nôtre qu'il a de plus grandes capacités cognitives. Plus l'animal est grand, plus il est nécessaire que son cerveau possède assez d'unités de traitement (les neurones) pour coder l'ensemble de son organisme. Pour étudier d'éventuelles différences entre cerveaux, il est donc toujours nécessaire de rapporter le poids du cerveau *par rapport* au poids du corps (ce rapport est nommé *coefficient d'encéphalisation*). Par ce calcul, nous pouvons alors constater que l'être humain a le coefficient d'encéphalisation le plus élevé du règne animal (devant l'éléphant, la baleine, le dauphin ou bien encore le chimpanzé).

Précisons par ailleurs que ce coefficient d'encéphalisation est identique entre un homme et une femme. En effet, même si l'homme a, en moyenne, un cerveau plus grand que celui de la femme, son corps est également, en moyenne, plus grand.

Attention, cependant, bien que pertinent, le coefficient d'encéphalisation n'est pas l'outil de référence pour mesurer les capacités cognitives d'un sujet. Le cerveau recèle bien des possibilités dont celles d'être optimisé et optimisable, quelle que soit sa taille.

Le cerveau humain, en termes morphologiques, repose sur une architecture éprouvée tout au long de l'évolution des espèces. Les parties les plus primitives du cerveau, celles partagées avec les règnes animaux qui nous précèdent, se situent majoritairement au centre. Le cerveau a par la suite progressivement bourgeonné *vers l'extérieur*.

La structure cérébrale la plus récente est le *cortex cérébral* (pour mémoire, cortex signifie « écorce » étymologiquement). Comme son nom l'indique, cette couche recouvre les autres parties plus anciennes du cerveau. C'est cette couche qui apparaît plissée sur un cerveau vu de l'extérieur. Ces plissements, aussi appelés *circonvolutions*, sont considérés comme un facteur décisif de l'augmentation de la surface cérébrale dans l'espace contraint que représente la boîte crânienne. L'hypothèse a été émise que ce sont les fibres de connexion les plus longues entre les régions cérébrales non adjacentes qui, en se déformant sous leur propre poids, provoqueraient des courbures et donc les plissements visibles du tissu cortical. Les circonvolutions d'un cerveau humain sont particulièrement importantes comparativement à d'autres espèces animales, mammifères compris (voir fig. 4).

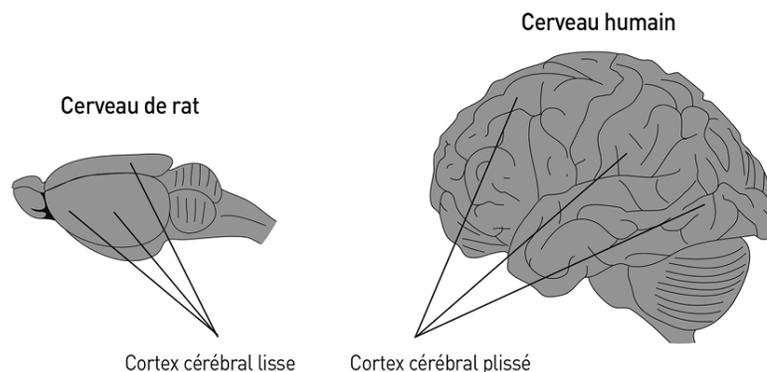


Figure 4 : Comparaison des cortex cérébraux du rat et de l'humain (Source : M. Bonnet)

La dynamique évolutive cérébrale s'est également opérée *vers l'avant*, c'est-à-dire vers les régions frontales. Des régions dites préfrontales (la partie la plus en avant des régions frontales) sont notamment apparues bien plus distinctement chez les primates, humains et non humains. Comme il a été précédemment dit, elles constituent, de par leurs proportions inédites chez l'Homme, une signature morphologique cérébrale typique de notre espèce. Ces régions préfrontales sont le siège de fonctions cognitives dites de haut niveau.

Par cette évolution des structures, le cerveau a donc gagné en volume. Comme nous le verrons par la suite, sa deuxième dominante a été d'avoir aussi gagné en spécialisation.

Un développement à grande vitesse

L'accroissement rapide du volume cérébral constaté chez l'espèce humaine se serait intensifié depuis un demi-million d'années. Contrairement à beaucoup d'autres espèces, le bébé humain naît avec un cerveau mesurant environ un tiers du volume du cerveau d'un adulte. Cette immaturité cérébrale à la naissance serait liée à la taille du bassin des femmes. En effet, si le cerveau finissait sa croissance *in utero*, le crâne du bébé ne pourrait potentiellement plus passer par les voies naturelles...

Zoom sur

L'immaturité cérébrale des mammifères à la naissance

La quasi-totalité des mammifères possède à la naissance un cerveau développé à 90 % de sa taille adulte. Font exception, cependant, les primates (humains et non humains), certains cétacés et les éléphants. En effet, certains dauphins et primates (particulièrement le chimpanzé) possèdent un cerveau mesurant à la naissance seulement la moitié de sa taille adulte.

À noter que, à l'image du bébé humain, l'éléphanteau possède lui aussi un cerveau au tiers environ de sa taille adulte. Comme l'espèce humaine, mais contrairement à la majorité des autres espèces animales,

les éléphants ne naissent pas avec des comportements profondément innés. Cette immaturité comportementale, directement associée à leur immaturité cérébrale,

oblige les bébés des deux espèces à être fortement accompagnés par leurs ascendants dans l'enseignement de ces comportements.

Libéré immature dans le milieu extérieur, le cerveau du bébé terminera donc sa croissance en étant en contact direct avec les stimuli, nombreux et pluriels, de son environnement. Cette immaturité à la naissance conditionne également, au contraire de beaucoup d'autres espèces animales, un besoin exacerbé de soins par les parents (voir encadré « Immaturité cérébrale des mammifères à la naissance », p. [«L'immaturité cérébrale des mammifères à la naissance», page 21](#)). Notamment, toute carence (nutritive, sensorielle, affective, cognitive, etc.) est susceptible d'avoir des conséquences dramatiques sur le développement corporel et cérébral de l'enfant (voir encadré ci-dessous).

De l'importance de toujours stimuler

Des expériences réalisées sur des jeunes animaux ont révélé l'importance de stimuler à la fois sensoriellement et cognitivement un cerveau en devenir.

Ainsi, des chatons privés de stimulation lumineuse (c'est-à-dire élevés dans l'obscurité totale) pendant leurs premières semaines de vie ont présenté par la suite des problématiques visuelles *définitives*, alors même que leurs rétines et leur cortex visuel étaient originellement intègres.

Sans stimulation et/ou sans contenu informatif qui lui parviennent, le cerveau ne crée pas le support neuronal permettant de les traiter. La fonction fait l'organe. Un cerveau, particulièrement pendant sa phase de développement, a besoin d'être régulièrement stimulé par diverses sources et divers contenus informatifs.

Dans ces contenus informatifs nécessaires, il ne faut pas oublier les contenus affectifs. En effet, un cerveau est profondément émotionnel et est donc particulièrement sensible à toute carence affective qui peut être susceptible de fortement fragiliser et/ou compromettre son développement.

L'accroissement du volume cérébral du nouveau-né continue à la même vitesse galopante qu'*in utero* pour atteindre environ les deux tiers du volume d'un cerveau adulte dès sa première année de vie. Pendant les premières années de sa vie, le cerveau de l'enfant présente dans le même temps une perte neuronale massive et une densification des contacts entre les neurones

(synapses) (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur Perdre des neurones, un bon plan ?

L'accroissement rapide du volume cérébral est contrebalancé à la fin de la gestation et dans les tout premiers mois de vie par une importante mort cellulaire (*apoptose*) des neurones. Contrairement à l'idée qu'il pourrait en être faite, le phénomène d'apoptose, quel que soit le type de cellule, n'est pas en soi une composante délétère du système. Bien au contraire, ce processus constitue une régulation nécessaire.

L'apoptose peut être résumée en un programme génétique de « suicide cellulaire ». Au cours de l'apoptose, la cellule (neurone ou autre) disparaît silencieusement et progressivement en limitant les déchets liés à la destruction de ses composants.

Un exemple très parlant d'apoptose est celui relatif à la membrane de peau qui est présente entre les doigts de la main de l'embryon humain. À un certain stade de la gestation, ces cellules entrent en apoptose et disparaissent pour laisser place à l'architecture finale individualisée des doigts. Certains bébés peuvent naître avec cette membrane de peau toujours présente et la chirurgie est alors nécessaire. Celle-ci peut potentiellement laisser des cicatrices, au contraire de l'apoptose qui est un phénomène naturel capable de modeler le système cellulaire selon une architecture définie tout en préservant la structure environnante.

L'apoptose cérébrale survenant vers la naissance est provoquée génétiquement. Cependant, elle est consécutive d'une sélection « darwinienne » des neurones. En effet, elle ne concerne que les neurones qui n'ont pas su interagir avec des cibles dédiées (absence d'interactions dites *trophiques*). À la suite de cette apoptose massive, la population des neurones diminue alors environ de moitié.

Ainsi il est intéressant de noter que des souris génétiquement modifiées – pour lesquelles cette expression génétique est rendue inopérante et qui préservent donc leur capital neuronal – présentent des performances cognitives inférieures à celles de souris non modifiées... Raisonner uniquement sur la quantité de cellules cérébrales revient à raisonner sur une seule dimension. Le cerveau, lui, adapte son système selon plusieurs dimensions : la quantité de ses unités de traitement (les cellules cérébrales) mais aussi, et surtout, leur efficacité et leur optimisation.

La mise en contact très précoce du cerveau immature du bébé humain avec son environnement extérieur pourrait expliquer l'accroissement évolutif majoré du volume cérébral dans l'espèce humaine ainsi que la complexification de ses fonctions. En effet, il existe une relation étroite entre le cerveau et son environnement pour l'acquisition de ses savoirs et savoir-faire. Comme nous l'évoquerons avec la plasticité cérébrale, plus un environnement est enrichi, plus le cerveau est stimulé et plus il se modèlera à la

fois structurellement et fonctionnellement. Et ce, d'autant plus que la mise en contact avec cet environnement enrichi interviendra lorsqu'il est encore jeune et immature.

Toutes espèces confondues, le cerveau humain se singularise par un volume cérébral, des circonvolutions et des régions préfrontales hors normes. Son immaturité à la naissance conditionne un développement en étroite relation avec son environnement. Dénué de comportement qui lui permettrait une survie autonome, le bébé humain dépend totalement de ses parents et a tout à apprendre. À l'échelle cérébrale, cet apprentissage sur le très long terme augure d'une complexification majeure de son fonctionnement et de ses capacités.

3 NOTIONS À RETENIR

- Nos régions préfrontales sont les plus développées du règne animal.
- Le cerveau humain est profondément immature à la naissance et a donc besoin d'être fortement accompagné et stimulé.
- La taille du cerveau n'est pas un critère automatique de performance.

3 - Les acteurs cérébraux entrent en scène

Intéressons-nous désormais aux cellules constitutives de l'organe cérébral. Il en existe deux sortes : les *neurones* (les plus connus) et les *cellules gliales*.

Bien que les neurones soient régulièrement considérés comme les « stars » du cerveau, nous allons voir que faire l'impasse sur les cellules gliales reviendrait à commettre une erreur particulièrement injuste.

Les neurones : stars de la communication

Leur nombre est estimé à environ 100 milliards, et chaque neurone est supposé être en contact avec environ 20 000 autres. Ces chiffres ne sont que des estimations, des variations existent selon les études. L'utilisation de nouvelles techniques d'investigation cérébrale est susceptible de modifier encore ce

nombre dans un futur proche. Cependant, gardons toujours à l'esprit que le nombre d'unités de traitement n'est qu'un des paramètres de la puissance cérébrale.

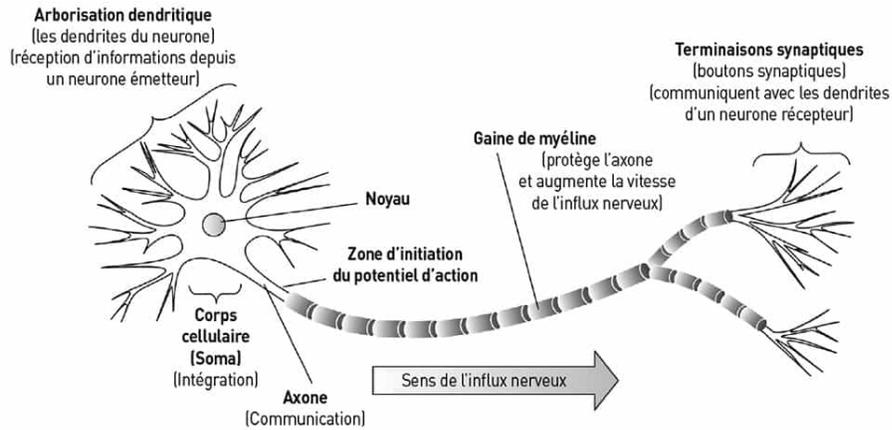


Figure 5 : Représentation schématique d'un neurone (Source : M. Bonnet)

Un neurone est une cellule qui possède trois parties : les *dendrites*, le *corps cellulaire* et l'*axone* (voir fig. 5) :

- Les *dendrites* sont des prolongements membranaires (on parle d'*arborisation dendritique*, car cela évoque les ramifications d'un arbre) qui agissent comme des « oreilles » recevant des paquets d'informations en provenance des autres neurones.
- Le *corps cellulaire* (ou *soma*, étymologiquement « corps » en grec) contient le noyau du neurone et donc son ADN. Le soma reçoit l'ensemble des signaux en provenance des différentes dendrites du neurone et les intègre. Les mécanismes de cette intégration ne sont pas encore totalement élucidés.
- L'*axone* peut être considéré comme la « bouche » du neurone. Il constitue un prolongement membranaire plus ou moins grand selon la cible qu'il doit atteindre. À titre d'exemple, l'axone le plus long de notre corps est celui qui relie la partie inférieure de notre moelle épinière au bout de notre orteil. Selon les personnes, cet axone fait donc généralement environ un mètre... À noter : un nerf est tout simplement un faisceau d'axones.

Les axones sont entourés d'une *gaine de myéline* à l'épaisseur variable. Majoritairement constituée de lipides (c'est-à-dire d'acides gras), la gaine de myéline a une double fonction : *protéger* l'axone du milieu extracellulaire et *augmenter*, proportionnellement à son épaisseur, la *vitesse* de l'influx nerveux. Ainsi, les axones les plus myélinisés autorisent une vitesse de transmission de l'influx nerveux d'environ 100 mètres par seconde !

Zoom sur Nourrir son cerveau

Pour fonctionner correctement et pour maintenir son homéostasie (voir encadré « L'homéostasie : entre équilibre et déséquilibre », p. 10), toute cellule a besoin d'énergie. Celle-ci peut notamment être fabriquée, au sein des cellules, à l'aide de deux éléments : le glucose (le sucre prélevé dans notre alimentation) et l'oxygène (récupéré par nos poumons). Ces deux éléments transitent par le sang pour atteindre tous les organes du corps, cerveau compris.

Cependant, la structure cérébrale n'est pas qu'un tissu qui doit fonctionner, c'est aussi une structure qui doit se réparer et s'entretenir. Tout cet aspect logistique oblige le cerveau à rechercher dans son alimentation des ressources en protéines, nutriments, ions, vitamines et... acides gras. En effet, il est important de garder à l'esprit que toutes les membranes de nos cellules (notamment cérébrales) sont constituées de gras. Tout comme la myéline qui permet au signal nerveux de transiter rapidement d'un neurone à un autre.

Sans pencher excessivement vers une alimentation riche en lipides qui pourrait avoir des conséquences particulièrement délétères pour le reste de l'organisme, il reste donc important de ne pas exclure les graisses de notre régime alimentaire surtout celles d'origine naturelle.

Tout en conservant une alimentation variée, équilibrée et sans abus, ayez donc tout de même un peu moins de scrupules devant votre prochain confit de canard... !

Les différents signaux en provenance des dendrites sont donc intégrés au niveau du corps cellulaire. À la suite de quoi, l'axone génère (ou non) un signal nerveux au niveau de sa *zone d'initiation du potentiel d'action* (la partie la plus en amont de l'axone, celle qui fait suite au corps cellulaire). Si le signal nerveux est généré dans cette zone, il parcourt la totalité de l'axone jusqu'à la *terminaison synaptique* (aussi appelée *bouton synaptique*) où il provoque la libération des *neurotransmetteurs* (messagers chimiques dont les plus connus sont le glutamate, la

dopamine ou la sérotonine) dans la *fente synaptique* (l'espace entre l'axone du neurone émetteur et le dendrite du neurone récepteur). Ces neurotransmetteurs se fixent alors sur un des dendrites du neurone placé en aval. Cette fixation peut éventuellement générer un signal nerveux dans le neurone récepteur.

De cette première étape, nous comprenons que le neurone est une sorte de synthèse du cerveau : du neurone à l'organe entier, le maître mot est la communication. Au travers du signal nerveux, l'information intégrée dans un neurone va pouvoir transiter vers les autres, aboutissant ainsi à une immense chaîne de communication.

Les cellules gliales : indispensables inconnues

Lorsque l'on parle du cerveau, le premier élément qui nous vient naturellement à l'esprit est le neurone. C'est un raccourci régulier et restrictif qui nous fait passer à côté d'une grande partie de nos cellules cérébrales : les cellules gliales (voir encadré ci-dessous).

Au milieu du xx^e siècle, on estimait que les cellules gliales étaient 10 à 50 fois plus nombreuses que les neurones. Cependant, dans les décennies qui suivirent, de nouvelles techniques de marquage cellulaire toujours plus élaborées ont fait régulièrement descendre cette proportion. Très récemment et grâce à de nouvelles études, le nouveau ratio supposé est désormais d'environ une cellule gliale pour un neurone. Même si le nombre de ces cellules gliales est moins important qu'estimé de prime abord, ce ratio signifie tout de même que ce type cellulaire correspond à (au moins) la moitié du cerveau... Ces cellules gliales, injustement oubliées, méritent donc toute notre attention et à plus d'un titre.

Étymologiquement, la glie vient d'un mot grec signifiant « glue ». Au moment de leur découverte, on supposait que ces cellules gliales permettaient à l'organe cérébral de tenir comme un tout. Dans une logique assez similaire, elles ont aussi été nommées *cellules de soutien*.



Zoom sur Les cellules gliales et la relativité d'Einstein

À la mort d'Einstein, son cerveau fut (illégalement) prélevé et conservé. Activement découpé en tranches puis minutieusement observé au microscope dans les décennies qui suivirent, le cerveau du talentueux physicien se prêta, bien malgré lui, au jeu de ce travail d'enquête. Existait-il, au sein de son architecture cérébrale, un support biologique particulier susceptible d'expliquer le foisonnement génial de ses théories ?

Couper l'organe en tranches pour comprendre d'où lui venaient ses idées, c'est – nous en conviendrons – lui faire une certaine offense en excluant de l'équation la puissance du « tout cérébral ». Cependant, le cerveau d'Einstein n'était plus intègre, seule son architecture cellulaire se prêtait à l'étude. C'est ce qui a donc été fait. Au travers de l'ensemble des analyses réalisées, le cerveau d'Einstein se révéla (admirablement) banal. Il était d'ailleurs plus petit que la moyenne, ce qui, admettons-le, contredit l'idée reçue « génie = cerveau plus gros » (voir encadré Neuromythe « La taille du cerveau est un critère d'intelligence », p. <??> !). Cependant, une différence notable fut observée dans son cortex pariétal inférieur. Comparativement à une dizaine d'autres sujets prélevés dans la même région cérébrale, Einstein y présenta un nombre de cellules gliales par neurone significativement plus élevé. Il avait précédemment pu être prouvé chez des animaux de laboratoire que plus leur environnement était enrichi, plus le nombre de cellules gliales par neurone augmentait.

Quelle conclusion en tirer ? Pouvons-nous proposer des interprétations fiables à partir de données issues d'un seul génie ? Étions-nous face à une particularité portée par un seul individu ou était-ce le témoignage de l'importance capitale des cellules gliales dans les traitements cognitifs à haut niveau intégratif ?

Parmi toutes les hypothèses, encourageons-nous avec celle qui nous permet de continuer à croire en nos propres capacités cérébrales indépendamment de l'architecture précise de notre cerveau : ce n'est pas que d'avoir plus de cellules gliales permette de découvrir la théorie de la relativité, c'est que d'avoir plus de cellules gliales *n'empêche pas* de découvrir la théorie de la relativité !

Une des fonctions premières des cellules gliales est de maintenir le cerveau sous haute protection. Cependant, ainsi que nous allons le constater, leur rôle s'étend bien au-delà.

Il est possible de distinguer plusieurs types de cellules gliales dont :

- La *microglie*. Les cellules microgliales constitutives de la microglie représentent le *système immunitaire central* qui est, comme son nom l'indique, spécifiquement consacré à la protection du système nerveux central

(regroupant l'encéphale et la moelle épinière). Le système immunitaire central est donc différent du *système immunitaire périphérique* (présent dans le reste du corps). Le rôle de la microglie est donc de protéger spécifiquement le cerveau contre tout agresseur exogène (virus, bactérie, etc.).

- Les *oligodendrocytes*. Littéralement « cellules aux dendrites peu nombreuses », les oligodendrocytes sont responsables de la genèse de la *gaine de myéline*. La gaine de myéline est créée par des prolongements membranaires des oligodendrocytes qui s'enroulent un nombre variable de fois autour de segments d'axones. Chaque oligodendrocyte peut ainsi créer des portions de gaine de myéline sur plusieurs dizaines d'axones en même temps. Plus la gaine de myéline ainsi créée est épaisse, plus le signal nerveux transite rapidement dans l'axone. Ainsi, par sa présence et son action, l'oligodendrocyte est capable de *moduler* finement la *vitesse* de transmission de l'information nerveuse dans l'axone (voir encadré ci-dessous).
- les *astrocytes*. Étymologiquement, *astro* signifie « étoile ». L'astrocyte est donc une cellule en forme d'étoile, dont on a d'abord découvert la capacité à générer, par sa présence, la *barrière hémato-encéphalique* (BHE).

La barrière hémato-encéphalique est une frontière entre le sang (*hémato*) et l'encéphale permettant de le protéger des éléments potentiellement délétères circulant dans le sang.

Zoom sur

La myélinisation tardive des régions préfrontales

La myélinisation des régions préfrontales est la plus lente à se produire au cours du développement d'un cerveau humain et explique la maturation à retard de ces zones chez l'enfant. Tant que ces régions préfrontales ne seront pas totalement myélinisées (c'est-à-dire vers l'âge de 25-30 ans), le cerveau ne sera pas considéré comme pleinement mature.

Sur quels mécanismes repose la barrière hémato-encéphalique ?

Sachons, tout d'abord, que tous les vaisseaux sanguins de notre corps sont constitués de *cellules endothéliales*. Elles forment la paroi des vaisseaux en se disposant les unes à côté des autres comme des briques. Dans tout l'organisme, à l'exception du cerveau, ces cellules endothéliales sont séparées entre elles par un petit espace. Bien que restreint, ce petit espace autorise des échanges directs entre l'intérieur du vaisseau sanguin (c'est-à-dire le sang) et les *organes*, sans avoir besoin de passer au travers de la cellule endothéliale elle-même. Nous pourrions dire que dans cette configuration, le vaisseau sanguin n'est pas tout à fait étanche.

Au contraire, dans le cerveau, les cellules endothéliales des vaisseaux sanguins sont tellement accolées les unes aux autres qu'elles forment des *jonctions serrées* au travers desquelles rien ne passe. Cette configuration rend le cerveau quasiment étanche aux éléments contenus dans le sang. Pour qu'une molécule passe du sang vers l'encéphale, elle doit donc d'abord traverser la « brique », c'est-à-dire la cellule endothéliale. Pour cela, il est nécessaire qu'elle ait un transporteur spécifique à la surface de cette cellule endothéliale sur lequel elle puisse venir se fixer pour être autorisée à la traverser. Cette configuration génère une sorte de « douane » cérébrale. Ne passent dans le cerveau que les molécules autorisées à traverser la cellule endothéliale (et donc la barrière). Des exceptions à cette règle existent cependant (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur Les drogues, hackers naturels

Si la barrière hémato-encéphalique exerce un contrôle drastique sur les molécules entrant dans le cerveau, elle est pourtant démunie face aux molécules *lipophiles*. Comme leur nom l'indique, les molécules lipophiles « aiment » le gras. Il est important de rappeler qu'une cellule n'est ni plus ni moins qu'une couche de gras (lipides) qui sépare deux milieux aqueux. Les molécules lipophiles ont donc la capacité de s'incorporer à la membrane lipidique des cellules et de la traverser.

La cellule endothéliale, constitutive des vaisseaux sanguins, possède – elle aussi – une membrane lipidique. Ainsi, toute molécule lipophile qui s'intégrera à la membrane

d'une cellule endothéliale sera capable de la traverser sans avoir besoin d'un transporteur spécifique. Elle peut donc contourner d'office la « douane » cérébrale.

C'est malheureusement le cas de drogues dures comme l'héroïne ou la cocaïne. Ces molécules lipophiles traversent sans problème les cellules endothéliales, aboutissant alors rapidement dans l'organe cérébral. Dans l'incapacité de les arrêter au niveau de sa barrière hémato-encéphalique, le cerveau n'a donc aucun moyen naturel de s'en défendre. Seul un comportement d'évitement de la drogue constituera en conséquence l'unique protection cérébrale.

Les neurones ont depuis toujours été les cibles privilégiées des recherches en neurosciences par leur capacité à générer des signaux nerveux. Aussi, les premières expérimentations pour comprendre l'émergence de cette BHE au niveau cérébral ont consisté à mettre ensemble, dans une boîte de Pétri, des neurones avec des cellules endothéliales. Au grand désespoir des scientifiques, les cellules endothéliales ont formé des vaisseaux sanguins aux parois poreuses... Une idée a émergé et l'expérience a été reproduite en ajoutant des astrocytes. Les cellules endothéliales se sont alors disposées en jonctions serrées. Une BHE primitive était née. La protection du cerveau vis-à-vis de composants délétères du sang n'est donc pas assurée par les neurones eux-mêmes mais par des cellules gliales. Cette information a permis de fortement reconsidérer l'importance de ces cellules dans l'architecture cérébrale.

Mais ce n'est pas tout... Les recherches en neurosciences ont permis de comprendre que ces cellules recelaient d'autres capacités aussi fascinantes que mystérieuses. En effet, en étudiant la synapse, lieu privilégié où les neurones se rapprochent assez pour pouvoir communiquer, il a pu être mis en évidence l'importance de l'astrocyte comme troisième participant en plus des deux constitutifs de la synapse (neurone émetteur et neurone récepteur). Au niveau de chaque synapse, des prolongements astrocytaires viennent, en effet, l'entourer et la délimiter. Désormais, nous savons également que, non seulement les astrocytes sont présents au niveau des synapses, mais qu'ils y participent aussi activement en modulant le signal nerveux transitant entre les neurones. Bien que l'ensemble des mécanismes impliqués dans cette modulation ne soit pas encore

totallement élucidé, l'importance des astrocytes dans la communication cérébrale est désormais devenue indiscutable.

Fortement protégée contre tout agresseur exogène par un système immunitaire en propre et par une barrière quasiment infranchissable, la structure cérébrale héberge des cellules aux capacités différentielles tendant vers un but commun : permettre à l'organe d'échanger et de communiquer, en toute sécurité, l'ensemble de ses contenus informatifs.

3 NOTIONS À RETENIR

- Les cellules constitutives du cerveau sont les neurones et les cellules gliales.
- Le cerveau compte 100 milliards de neurones, chacun connecté à environ 20 000 autres.
- La barrière hémato-encéphalique protège le cerveau d'éléments délétères circulant potentiellement dans le sang.

4 - Le cerveau : grand communicant

Maintenant que nous nous sommes familiarisés avec les unités qui constituent l'organe, abordons la structure à l'échelle macroscopique afin d'en comprendre la dimension essentielle : la communication.

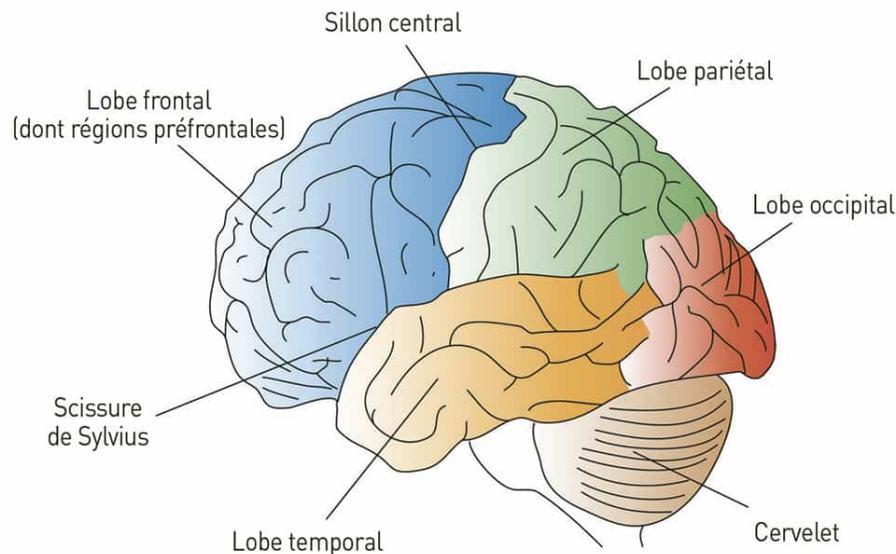


Figure 6 : Le cerveau humain (Source : M. Bonnet)

Depuis l'extérieur, le cerveau nous révèle quasiment exclusivement son *cortex cérébral*, plus particulièrement sa partie la plus superficielle et la plus récente du point de vue de l'évolution : le *néocortex*.

Le cerveau a deux hémisphères, droit et gauche, symétriques et fortement reliés l'un à l'autre par un dense réseau de fibres nerveuses nommé *corps calleux*. La surface de chaque hémisphère présente des *sillons* plus ou moins marqués (les *sulci*, au singulier : *sulcus*) et des plis ou *circonvolutions* (les *gyri*, au singulier : *gyrus*).

Cette architecture en *sulci* et *gyri* permet notamment de distinguer des régions appelées *lobes cérébraux* (voir fig. 6).

Les lobes cérébraux : des territoires dans les hémisphères

Les lobes cérébraux sont bilatéraux , c'est-à-dire qu'il y en a un dans l'hémisphère cérébral gauche et un dans l'hémisphère cérébral droit. Ainsi, lorsque l'on parle des lobes *frontaux*, par exemple, cela signifie que l'on associe dans cette terminologie à la fois le lobe frontal de l'hémisphère *gauche* et le lobe frontal de l'hémisphère *droit*.

Un hémisphère cérébral se divise en quatre lobes :

- Le lobe *frontal* (qui inclut les régions préfrontales) : situé en avant du cerveau, derrière le front et séparé du lobe pariétal en arrière par le *sillon central*. Le lobe frontal est fortement associé aux fonctions dites de *haut niveau*.
- Le lobe *occipital* : situé à l'arrière du cerveau. Séparé du lobe temporal par le sillon occipito-temporal et du lobe pariétal par le sillon pariéto-occipital, le lobe occipital est fortement impliqué dans le traitement de l'information visuelle. À noter : la vision est le sens bénéficiant de la plus grande surface de traitement cérébral chez l'humain.
- Le lobe *pariétal* : situé entre le lobe frontal en avant (dont il est séparé par le sillon central) et le lobe occipital

en arrière (dont il est séparé par le sillon pariéto-occipital). Il prend majoritairement en charge le traitement des informations en provenance du corps et celles qui traitent de la relation de ce corps avec son environnement.

- Le lobe *temporal* : situé derrière la tempe et l'oreille. Il est délimité par la *scissure de Sylvius* (sillon qui le sépare du lobe frontal et du lobe pariétal). Il est séparé du lobe occipital par le sillon occipito-temporal. Il prend en charge une partie des traitements des informations auditives, mnésiques et émotionnelles. En effet, il héberge les structures essentielles associées à la mémoire (hippocampe) et aux émotions (amygdale).

Dans cette description d'un cerveau en vue externe, il est important de ne pas omettre le cervelet (étymologiquement « *petit cerveau* ») situé à l'arrière et sous le cerveau. Structure impliquée dans les capacités d'automatisation, le cervelet est activé dans de nombreuses fonctions, de la motricité jusqu'à l'attention.

Un cerveau bien hydraté

Le cerveau baigne dans du liquide et celui-ci est aussi présent au niveau de ses cavités, les ventricules. Toutes les cellules cérébrales constituent également des petits compartiments aqueux. L'ensemble de ce système hydrique doit être renouvelé continuellement. Il est donc crucial, particulièrement pour un enfant, de s'hydrater régulièrement. Proscrire cependant la consommation de boisson sucrée le soir juste avant de dormir pour éviter l'énerverment (à cause du sucre) et l'interruption ultérieure du sommeil (à cause de la miction impérieuse).

La présentation des fonctions portées par ces différentes régions cérébrales est, bien entendu, loin d'être exhaustive. Nous y reviendrons progressivement et de manière plus détaillée dans la suite de cet ouvrage.

À noter : l'ensemble de la structure cérébrale baigne dans le liquide céphalo-rachidien (LCR) (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur

Le liquide céphalo-rachidien, notre airbag intégré

Le liquide céphalo-rachidien est présent dans l'ensemble du système nerveux central, c'est-à-dire de l'encéphale jusque dans la moelle épinière.

Entre autres fonctions, nutritives notamment, le liquide céphalo-rachidien permet au cerveau de flotter dans la boîte crânienne, lui évitant ainsi de s'effondrer sous son propre poids.

Mais ce n'est pas tout... Par son rôle d'amortisseur hydraulique entre le cerveau et la boîte crânienne, il empêche également que nous nous assomions à chaque fois que nous penchons la tête pour lacer nos chaussures...

Substance grise et substance blanche, chacune sa fonction

C'est dans le cortex cérébral, la couche la plus superficielle du cerveau, que se concentrent majoritairement les *corps cellulaires des neurones* (pour rappel, le corps cellulaire est la partie du neurone qui intègre les signaux nerveux, c'est-à-dire la partie qui les traite avant d'y réagir).

En dehors du cortex cérébral, des *structures sous-corticales* (noyaux gris centraux, notamment) contiennent également des corps cellulaires de neurones.

L'ensemble des corps cellulaires et des dendrites des neurones (pour rappel, les dendrites représentent la partie du neurone qui « écoute » ce que les autres neurones ont à lui dire) forme la *substance grise*.

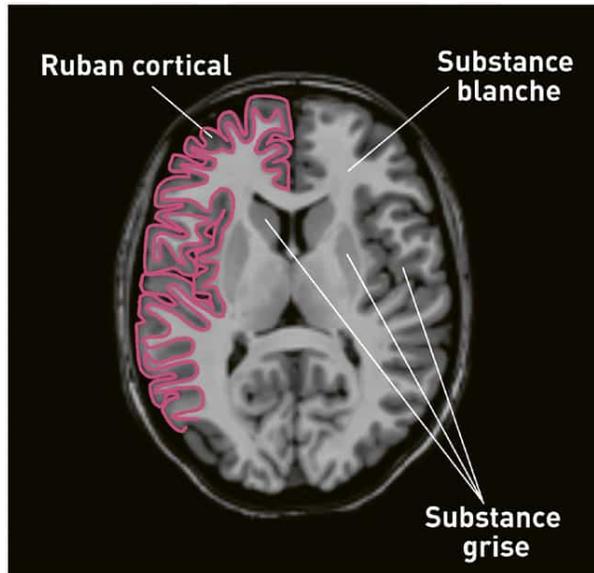


Figure 7 : Image IRM d'un cerveau humain sain en coupe transversale (Source : M. Bonnet)

Les axones (pour rappel, les axones sont les fibres nerveuses qui permettent aux neurones de se contacter entre eux) sont plus ou moins densément entourés de myéline et constituent le réseau de communication du cerveau reliant toutes les régions cérébrales entre elles. Du fait de la présence de myéline, ce réseau apparaît blanc à la dissection et est donc nommé *substance blanche*.

En vue interne et en utilisant la technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) (voir encadré ci-dessous), il est possible d'avoir un aperçu beaucoup plus fin et exhaustif de la structure (voir fig. 7). Nous pouvons par exemple repérer en périphérie les circonvolutions corticales (les petits plis qui apparaissent sur la surface corticale en vue externe). C'est le *ruban cortical*. Le ruban cortical contient des corps cellulaires des neurones et leurs dendrites. C'est donc de la substance grise. Comme nous pouvons le comprendre, les circonvolutions sont composées de neurones : ces neurones affleurent donc à la surface cérébrale. Ainsi, tout choc traumatique à la tête est susceptible de les endommager directement. Un cerveau est un organe d'une extrême fragilité. Cette fragilité plaide que chacun adopte un comportement susceptible de le protéger (voir encadré « Apprendre à protéger », p. 33).

POUR ALLER PLUS LOIN

Le principe de l'IRM

Le corps humain est majoritairement constitué d'eau. Chimiquement, l'eau (H₂O) est une association entre des atomes d'hydrogène et d'oxygène. Les atomes d'hydrogène (ou protons, H⁺) sont donc majoritaires à l'échelle d'un corps humain et sont de fait les plus représentatifs de sa structure. Le but de l'IRM est d'essayer de les révéler pour permettre d'observer plus précisément cette structure.

Les protons possèdent, comme la Terre, des pôles magnétiques, nord et sud. Chaque proton a ainsi sa propre orientation magnétique (appelée *moment magnétique*). Dans une IRM, un champ magnétique puissant est généré. Lorsqu'un sujet passe la porte d'une IRM, une partie des protons de son corps s'alignent sur ce champ et n'ont alors plus leur propre orientation magnétique individuelle.

Lorsque l'examen IRM démarre, des ondes de radiofréquence vont régulièrement être envoyées pour contraindre les protons à s'aligner sur une nouvelle orientation magnétique, différente du champ initial. Lorsque l'onde de radiofréquence s'arrête, les protons, libérés de cette nouvelle orientation magnétique, vont se réaligner sur le champ magnétique originel. L'alignement régulier sur le champ initial entre deux ondes de radiofréquence est réalisé plus ou moins rapidement par le proton, en accord avec sa liaison avec le tissu. En effet, un proton peut être différemment lié dans un tissu et est donc plus ou moins contraint par celui-ci.

En se réalignant sur le champ magnétique initial, les protons réémettent l'énergie qu'ils ont reçue par l'onde de radiofréquence. Cette émission d'énergie, captée par l'IRM, est directement liée à la vitesse avec laquelle les protons se sont réalignés. L'IRM est capable de convertir ces énergies différentielles (reçues de la part des protons) en variations de contraste visibles sur une image : ce sont les niveaux de gris. Ceux-ci nous permettent alors d'identifier les différentes structures cérébrales (substance blanche, substance grise, liquide céphalo-rachidien, etc.).

Comme on peut le voir, le principe de l'IRM est prodigieusement intelligent. L'autre avantage est son innocuité : en effet, en excluant les contre-indications magnétiques et en appliquant le principe de précaution (pour les femmes enceintes, notamment), lorsqu'un sujet sort de l'IRM, les effets magnétiques sur ses protons ne perdurent pas. Depuis quelques années, l'IRM nous permet un accès au cerveau avec une précision inégalée. Le bénéfice en est considérable. Nul besoin d'opération invasive, le cerveau peut désormais nous révéler en quelques minutes tous ses secrets structurels.

À noter que, dans un but pédagogique, les niveaux de gris présentés dans l'image IRM ci-avant ont été choisis pour respecter une certaine « réalité » anatomique, à savoir que la substance grise est représentée en gris et la substance blanche est représentée en blanc. Cependant, selon les variations du champ magnétique utilisées dans une IRM, ce n'est pas toujours le cas.

D'autres structures neuronales apparaissent également en gris sur cette image IRM et sont situées plus au centre du cerveau. Ce sont les *noyaux gris centraux* (également nommés *ganglions de la base*). Contrairement au cortex, dans lequel les neurones sont disposés selon une organisation en couches, les neurones présents dans des structures appelées « noyaux » sont disposés en amas. Les noyaux gris centraux interviennent particulièrement dans les procédures motrices mais ont également un rôle dans certaines composantes cognitives et émotionnelles.

Sur l'image IRM, nous pouvons par ailleurs distinguer la *substance blanche*, c'est-à-dire l'ensemble du réseau de fibres de connexion (axones) entre les différentes régions cérébrales. Toute l'importance de l'IRM se fait jour sur cette image. Il nous est, en effet, possible d'apprécier à quel point la substance blanche est *prédominante* dans un cerveau humain. Nous pouvons ainsi constater que le cerveau est avant tout un *organe de la communication*. Par ce réseau de fibres extrêmement denses et multiples, toutes les régions cérébrales sont connectées/bouclées les unes aux autres, soit directement, soit indirectement. Toute région cérébrale est ainsi inféodée à ses régions partenaires sans qu'aucune région « chef » ne s'individualise. Cette immense boucle d'action et de rétroaction permet la genèse d'un « tout » à la fois stable mais aussi extrêmement dynamique et adaptable : VOUS...

Apprendre à protéger

L'enfance et l'adolescence constituent des périodes propices à une exacerbation de la fragilité cérébrale, pour deux raisons majeures :

- Le cerveau est en plein développement et en pleine maturation.
- Les enfants et adolescents, en difficulté pour anticiper les conséquences de leurs actions, sont plus sujets aux conduites à risques que les adultes (non-port du casque à vélo ou à moto, consommation de drogues, etc.).

Pour aider les enfants à traverser ces périodes critiques, il peut être déterminant de les sensibiliser précocement à la fragilité extrême de leur cerveau afin qu'ils en prennent soin, par eux-mêmes, le plus tôt possible.

À la croisée des organisations

Quels que soient les individus (et en absence de toute pathologie), chaque *hémisphère* cérébral contrôle *l'hémicorps* opposé, c'est-à-dire que l'hémisphère gauche contrôle la partie droite de notre corps, et l'hémisphère droit contrôle la partie gauche de notre corps. L'organisation cérébrale pour le *contrôle moteur volontaire* est donc *croisée*. Ainsi, les atteintes lésionnelles des régions motrices de l'hémisphère gauche, par exemple, sont susceptibles de provoquer des difficultés motrices (voire une paralysie) de certaines parties de l'hémicorps opposé. Il est à noter que cette paralysie n'est pas due à une atteinte des nerfs entre le cerveau et le membre, mais bien à une atteinte de la région cérébrale *contrôlant* ce membre.

En dehors du contrôle moteur volontaire, chaque hémisphère cérébral est également plus ou moins spécialisé pour chacune des fonctions cérébrales. Cette spécialisation peut notamment être liée à la *latéralisation* de l'individu (le fait d'être gaucher ou droitier).

Un exemple de fonction latéralisée est le *langage*. Chez la grande majorité de la population, les fonctions langagières sont portées par l'hémisphère gauche. Il existe, cependant, des particularités chez les sujets gauchers. En effet, l'aire responsable des *composantes motrices du langage* (nommée *aire de Broca*) (voir encadrés ci-dessous) est située dans l'hémisphère gauche chez environ 95 % des droitiers mais chez seulement 70 % des gauchers.

Zoom sur La découverte de l'aire motrice du langage

La découverte de l'aire motrice du langage par le neurologue français Paul Broca fit suite à la prise en charge dans son hôpital d'un patient présentant une aphasie subite. Chez ce patient, l'observation fut faite que, bien qu'il ne puisse plus parler, il comprenait toujours le discours des soignants et de son entourage. Au décès du patient, Paul Broca réalisa une autopsie et constata une nécrose importante d'une partie de la région frontale gauche consécutive à un accident vasculaire cérébral (AVC).

Paul Broca conclut à un rapport de causalité entre la perte de cette région cérébrale et l'aphasie constatée.

L'aire motrice du langage se nomme désormais internationalement « aire de Broca », en hommage au médecin qui en fit la découverte.

Chez environ 15 % des gauchers, cette aire est positionnée dans l'hémisphère droit. Chez les 15 % de gauchers restants, l'aire de Broca présente une organisation bilatérale (c'est-à-dire qu'elle se répartit sur les deux hémisphères cérébraux, elle est à la fois dans l'hémisphère gauche **et** dans l'hémisphère droit) (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur Le casse-tête des gauchers

À l'image du langage, les sujets gauchers peuvent présenter des profils d'activation cérébrale également très différents pour d'autres fonctions cognitives. Cette grande variabilité et hétérogénéité dans leurs activations cérébrales rend régulièrement difficile leur inclusion dans des études de recherche en neuro-imagerie fonctionnelle. En effet, comme il est impossible de faire passer à tout le monde une IRM, ces études ne recrutent qu'un échantillon réduit de personnes. Cet échantillon doit cependant être représentatif de la population générale. Être représentatif permet à l'étude d'être reproductible. La reproductibilité est l'un des fondements de la science. Elle repose sur un concept simple : si l'expérience reprend la même méthodologie alors elle est supposée permettre l'obtention des mêmes résultats. Pour s'assurer de l'existence effective d'un fait, la reproductibilité de l'expérience en sciences est donc impérative. Cependant, le sujet gaucher avec sa grande imprévisibilité et hétérogénéité quant à l'activation de ses régions cérébrales est susceptible d'altérer cette reproductibilité (particulièrement dans le cadre de recherches avec des échantillons relativement réduits, les plus fréquentes).

Ainsi, les exclusions régulières des sujets gauchers des recherches en neuro-imagerie fonctionnelle impliquent qu'une partie non négligeable de nos connaissances les plus récentes nous apparaissent au travers du prisme déformant du seul fonctionnement cérébral des droitiers. Même si les particularités du cerveau des gauchers sont de plus en plus étudiées, elles le sont majoritairement dans le cadre d'études de recherche dédiées. Encore aujourd'hui, la vision globale que nous avons du fonctionnement du cerveau à l'échelle de la population humaine reste donc régulièrement tronquée d'environ 15 % de son particularisme.

Le même constat est fait concernant l'aire de *compréhension du langage* (nommée *aire de Wernicke*). Sa localisation cérébrale est, à l'instar de l'aire de Broca, préférentiellement retrouvée dans l'hémisphère gauche des sujets dans des régions à proximité

immédiate du cortex auditif. Il est à noter que l'atteinte lésionnelle de l'aire de Broca ou de l'aire de Wernicke est responsable, dans les deux cas, d'une *aphasie*.

Patience et longueur de temps

Les enfants gauchers (et parfois encore plus les ambidextres) sont souvent malhabiles pour toutes les nouvelles procédures motrices qu'ils doivent apprendre. Il n'est ainsi pas rare de les voir buter devant un exercice manuel ou un sport quelconque le temps qu'ils trouvent comment gérer en termes moteurs le geste qu'un droitier (le plus souvent) leur montre. Leur cerveau doit en effet produire un programme moteur en miroir de celui qu'on leur présente, ce qui peut leur prendre plus de temps. De plus, leurs *feed-backs* (visuels, somesthésiques, etc.) sont également en miroir. Ils sont donc différents des attendus. Apprendre en miroir et comparer en miroir peut ainsi retarder les apprentissages moteurs.

Il est très important de faire preuve de patience vis-à-vis d'un enfant non droitier pour éviter de stresser son jeune cerveau alors qu'il tente de produire des efforts pour obtenir une performance optimisée.

Le corps calleux : un pont entre deux hémisphères

L'architecture de commande motrice pour laquelle un hémisphère cérébral contrôle l'hémicorps opposé, ou bien encore la spécialisation d'un hémisphère sur l'autre concernant des fonctions cognitives particulières comme le langage, nous rappelle l'importance de pouvoir coordonner le tout au niveau cérébral. Une unité fonctionnelle doit apparaître, non seulement à l'échelle des fonctions motrices, mais également pour toutes les autres fonctions cérébrales, notamment cognitives. Fortement distribuées, ces fonctions nécessitent, en effet, une coordination et une synchronisation très précises.

Pour s'exprimer, ces fonctions doivent pouvoir s'appuyer sur un réseau de communication extrêmement robuste entre les différents territoires cérébraux ainsi qu'entre les deux hémisphères. En effet, et *a minima*, une unité cérébrale ne peut reposer que sur un fort partage des informations/actions prises en charge par chacun des hémisphères cérébraux.

Cette unité fonctionnelle cérébrale entre les deux hémisphères

cérébraux est portée par un *réseau de fibres* exceptionnellement dense les reliant : *le corps calleux* (voir fig. 8).

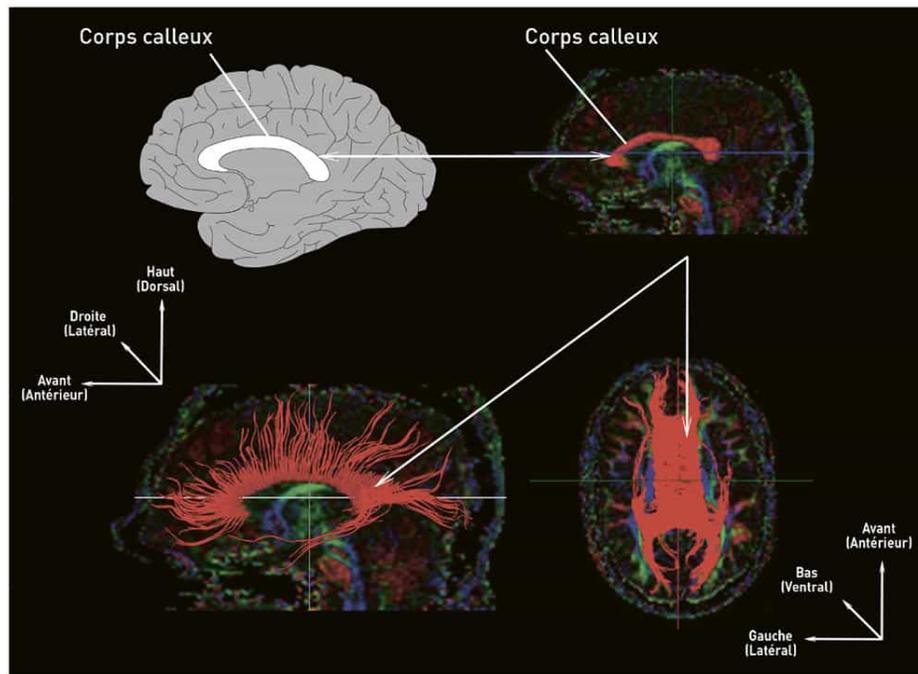


Figure 8 : Visualisation du corps calleux (en rouge), immense réseau de fibres connectant les deux hémisphères cérébraux (Source : M. Bonnet)

- a. Vue sagittale schématisée d'un corps calleux
- b. Véritable corps calleux humain visualisé par imagerie de diffusion
- c. Traçage en vue sagittale des fibres du corps calleux (technique du *fiber tracking*)
- d. Traçage en vue transversale des fibres du corps calleux (technique du *fiber tracking*)

Plus gros réseau de fibres de connexion du cerveau, le corps calleux joue un rôle fondamental comme l'étude de ses lésions nous l'a démontré (voir encadré page suivante).

Zoom sur Les patients *split-brain* : l'atteinte de l'unité

Une épilepsie est une activation anarchique de certains neurones, susceptible de se propager aux régions cérébrales adjacentes. Parfois, lorsque la crise est dite *généralisée*, cette propagation se fait jusqu'à l'autre hémisphère cérébral en passant par le corps calleux, engendrant des conséquences délétères pour le patient. Certains patients présentant des épilepsies généralisées pharmaco-résistantes se sont vu proposer, il y a quelques décennies aux États-Unis, une chirurgie pour le moins radicale : une section du corps calleux rendant les deux hémisphères cérébraux indépendants l'un de l'autre.

La procédure chirurgicale proposée avait ainsi pour but d'empêcher la survenue de ces crises d'épilepsie généralisées. Il est à noter qu'à l'époque les connaissances sur le corps calleux restaient encore largement à construire.

Les patients ayant reçu cette chirurgie ont été nommés par la suite « patients *split-brain* ». Ils ont été très étudiés, car il a été mis en évidence chez eux un *syndrome de déconnexion*. Ce syndrome correspond à un bouleversement majeur de l'unité fonctionnelle du cerveau. En effet, dans certaines conditions, les deux hémisphères des patients peuvent exprimer des comportements très différents, voire antagonistes. Par exemple, la main droite coiffe les cheveux et la main gauche les décoiffe. La main droite prend un objet, la main gauche le remet à sa place.

La problématique majeure du syndrome de déconnexion reste la difficulté pour les deux hémisphères à se partager leurs contenus informatifs respectifs. Pour le mettre en évidence, des études ont utilisé la voie d'entrée des hémichamps visuels. En effet, chaque hémichamp visuel (gauche ou droit) est traité par l'hémisphère cérébral opposé. Donner des contenus informatifs à l'hémichamp visuel gauche revient donc à s'adresser *exclusivement* (chez un patient *split-brain*) à l'hémisphère cérébral droit. L'expérience proposée était la suivante : les patients regardaient un point fixe au milieu d'un écran. Du contenu informatif était donné sur la partie droite de l'écran. Quand on l'interrogeait, le patient pouvait nommer ce qu'il avait vu. Rappelons-le, les aires du langage sont dans l'hémisphère gauche, celui-là même qui a vu la partie droite de l'écran. Par contre, quand une image est présentée sur la partie gauche de l'écran, seul l'hémisphère droit est au courant, mais il est mutique. Il ne peut pas contacter (à cause du corps calleux sectionné) les aires du langage dans l'hémisphère gauche pour exprimer ce qu'il a vu. Si on demande au patient de dessiner ce qu'il a vu avec sa main gauche (qui est contrôlée par l'hémisphère droit qui lui a tout vu), il se met à dessiner l'objet présenté. Quand on demande au patient pourquoi il a dessiné cet objet, il ne sait pas répondre. Car le seul à pouvoir maîtriser la parole, et donc à pouvoir répondre à l'expérimentateur, est l'hémisphère gauche qui lui n'a rien vu...

Le cerveau est un organe unifié, qui, au travers de sa communication exceptionnelle, est en perpétuel partage de l'ensemble de ses contenus informatifs.

Les aires de Brodmann : la spécialisation au service du tout

Les aires de Brodmann, nommées ainsi en l'honneur de celui qui les a cartographiées, sont à la fois la démonstration de la spécialisation cérébrale mais également l'illustration du piège dans lequel il ne faut surtout pas tomber.

Korbinian Brodmann était un neurophysiologiste qui s'est intéressé de manière quasi exclusive à la *cytoarchitecture* du cerveau, c'est-à-dire à son *architecture cellulaire* (organisation, densité et forme des neurones). En effet, selon sa localisation dans le cerveau, un neurone ne présente pas toujours la même

disposition ou la même forme. Brodmann a ainsi entrepris un travail colossal qui a été celui de délimiter des régions cérébrales dans lesquelles les neurones présentaient la même forme/architecture. Ce faisant, il a pu éditer une cartographie d'une cinquantaine de régions cérébrales différentes.

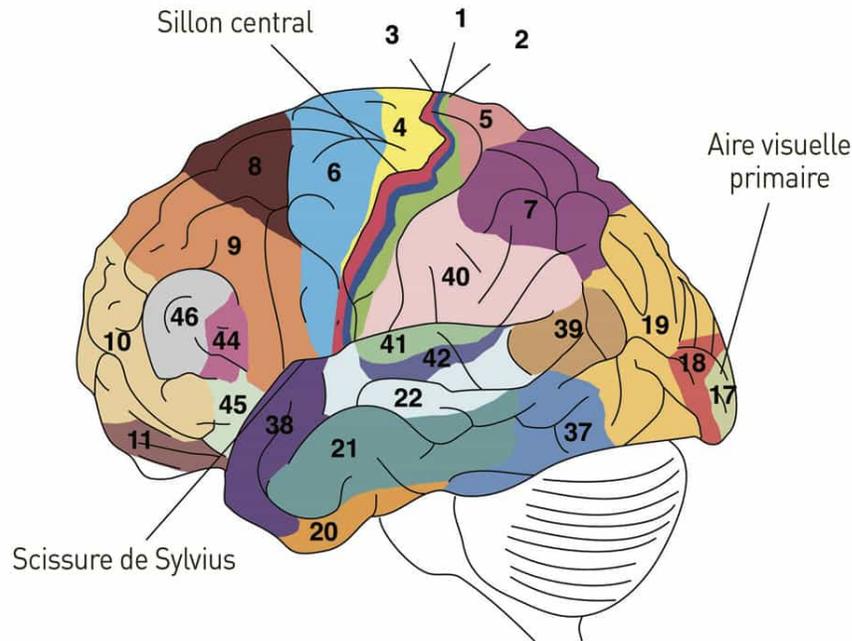


Figure 9 : Représentation schématique des aires de Brodmann (Source : M. Bonnet d'après K. Brodmann)

Cette cartographie est largement utilisée par les neuro-imageurs depuis de nombreuses années, car le travail réalisé par Brodmann a pris une nouvelle dimension lorsque nous avons compris que la *forme* rejoignait la *fonction*. Ainsi, nous savons désormais que des régions physiquement délimitées par la cartographie de Brodmann portent effectivement des fonctions qui peuvent s'avérer distinctes. C'est le cas de l'aire de Broca qui est nommée aire 44 dans l'atlas de Brodmann (voir fig. 9). Sa délimitation physique reprend son territoire fonctionnel de manière très précise. Nous pouvons en outre citer l'aire visuelle primaire, nommée aire 17 dans le même atlas. Sa délimitation physique rejoint là aussi un territoire fonctionnel particulièrement bien défini. Citons encore la région à la jonction des aires 9 et 46 de Brodmann qui porte, notamment, une partie du réseau attentionnel. Pour finir, l'aire de

Wernicke, l'aire de compréhension du langage, se positionne à la jonction entre les aires 22 et 39 de Brodmann.

Cependant, il est nécessaire de prêter attention au piège conceptuel qui apparaît insidieusement. Regarder le cerveau au travers de l'atlas de Brodmann, c'est prendre le risque de se le représenter comme une assemblée de petites régions contiguës, où chaque fonction trouverait sa localisation spécifique. Raisonner ainsi reviendrait à ranimer, en quelque sorte, la vision erronée de Gall et de son hypothèse sur la bosse des maths. Cette vision, pourtant, n'est jamais très loin en neurosciences. En effet, plus nous faisons des études sur le cerveau et plus nous sommes capables d'identifier le rôle de régions cérébrales, voire des populations neuronales, très circonscrites intervenant dans des fonctions extrêmement précises. C'est d'ailleurs l'essence des neurosciences que de découvrir les bases anatomiques des fonctions cérébrales. L'ensemble des études menées tend vers ce but. Pour comprendre le tout, il peut être important d'en isoler les parties : régions, réseaux ou neurones.

Mais, même si toutes les fonctions et capacités que porte notre cerveau sont prises en charge de façon plus spécialisée dans certaines structures que dans d'autres, il ne faut jamais perdre de vue que le cerveau est un organe unifié qui partage toutes ses informations en permanence au sein de tous ses réseaux. C'est par cette mise en jeu unifiée, fortement portée par un réseau de communication d'une très grande richesse que les fonctions cérébrales peuvent s'exprimer. Si certaines régions sont effectivement nécessaires pour certaines fonctions (par exemple, le langage), elles ne seront *jamais* suffisantes, d'autres régions cérébrales se surajoutent. Le tout vaut plus que les parties.

Ainsi, la constellation de régions cérébrales additionnelles peut énormément varier d'un individu à l'autre, sans pour autant que cela n'affecte la performance cognitive résultante. L'activation cérébrale est le fruit du vécu de l'organe. Tout individu possède une signature cérébrale unique qui est le résultat de son expérience d'activation. L'organe ne doit pas être vu comme une

assemblée de régions individuelles mais comme des réseaux plus ou moins spécialisés capables de s'adapter pour produire à tout moment un fonctionnement optimisé. Les fibres de connexion seules autorisent le tout fonctionnel à s'exprimer à l'échelle de l'individu.

Les aires corticales primaires : entrées et sorties du système

Comprendre un cerveau humain, c'est également s'intéresser aux régions *corticales primaires*. Particulièrement étudiées en neurosciences, ces régions *corticales* sont, comme leurs noms l'indiquent, des régions du *cortex*. Elles sont appelées *primaires*, car ce sont des territoires cérébraux qui sont les premiers relais des informations qui sont émises vers, ou qui proviennent de *l'interaction directe du corps avec son environnement extérieur*.

Le corps peut interagir avec son environnement selon deux modalités :

- une modalité *d'action* (il agit sur son environnement extérieur au travers de ses capacités *motrices*) ;
- une modalité *sensorielle* (il perçoit son environnement extérieur et ses actions sur celui-ci au travers de ses *organes des sens*).

Les deux modalités sont, comme on peut le comprendre, intimement corrélées. C'est particulièrement le cas entre le cortex *moteur* primaire (qui est à l'origine de toutes les commandes motrices vers l'ensemble des muscles du corps) et le cortex *somesthésique* primaire (qui est relié à tout le corps et qui permet de percevoir les positions et les mouvements de notre corps dans l'espace. Pour mémoire, *soma* signifie étymologiquement « corps »).

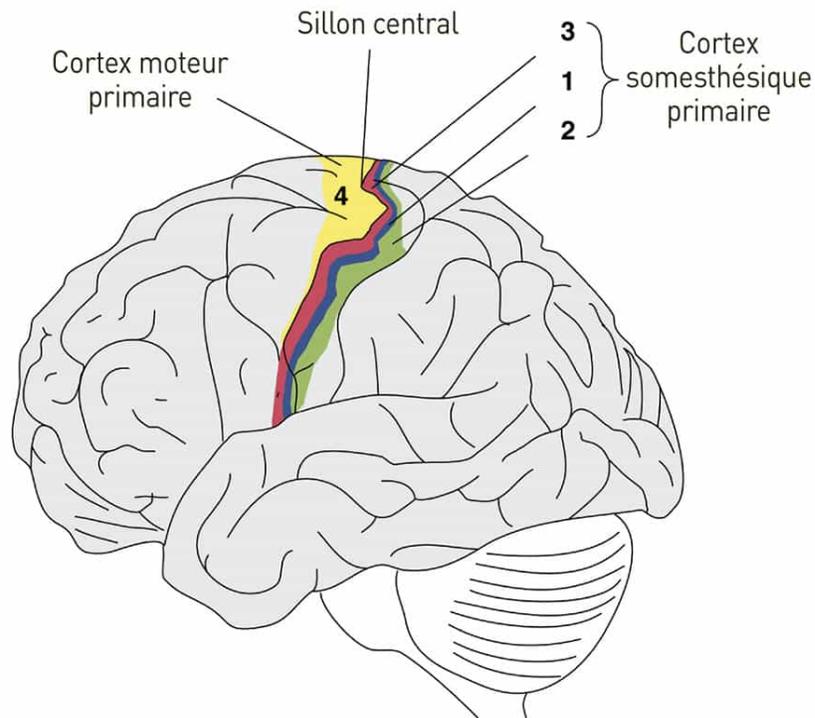


Figure 10 : Les cortex moteur et somesthésique primaires (Source : M. Bonnet d'après K. Brodmann)

À l'échelle d'un cerveau humain, ces deux cortex fonctionnellement interconnectés sont également positionnés l'un à côté de l'autre. Le cortex moteur primaire (aire 4 de Brodmann) est ainsi positionné en avant du sillon central, tandis que le cortex somesthésique primaire (réunissant les aires 1, 2 et 3 de Brodmann) a une position juste en arrière de ce même sillon (le sillon central constitue la démarcation entre le lobe frontal en avant et le lobe pariétal en arrière) (voir fig. 10).

On compte aussi, notamment, reliés à nos autres organes des sens, le cortex *visuel* primaire (relié à la rétine) et le cortex *auditif* primaire (relié à la cochlée).

Ces différents cortex sensoriels primaires réceptionnent toutes les informations des organes des sens de manière « brute de capteur ».

Prenons trois exemples successifs pour comprendre le traitement opéré par un cortex primaire.

Que voit le cortex visuel primaire ?

Positionné chez l'humain à l'arrière du cerveau dans le lobe occipital, le *cortex visuel primaire* (aire 17 de Brodmann) possède des neurones qui réagissent de manière individuelle à des *orientations* de stimuli qui ont été perçus par la rétine. Voici un exemple de stimulus :



Ce stimulus n'est « vu » dans notre région visuelle primaire que par certains neurones, sensibles à cette orientation particulière du stimulus.

Prenons un autre stimulus :



De la même façon, ce stimulus n'est perçu que par des neurones sensibles à cette orientation particulière de stimulus.

Un dernier exemple pour terminer notre démonstration :



Ce stimulus n'est également perçu que par certains neurones de notre région visuelle primaire.

Combinons à présent ces trois stimuli en un seul :



Dans notre région visuelle primaire, trois types de neurones ont réagi à cette combinaison de stimuli, ceux que nous venons de présenter. Cependant, à aucun moment, ces neurones du cortex visuel primaire n'ont compris qu'ils avaient vu un A... Car la lettre A est un concept bien plus élaboré qu'une combinaison de stimuli visuels. Cette lettre porte en elle tout un langage, tout un apprentissage, tout un vécu.

Les régions visuelles primaires se « contentent » de traduire

l'information issue des rétines en une langue que le cerveau peut interpréter. Elles transfèrent une information brute de capteur vers d'autres régions plus spécialisées qui pourront en extraire du *sens*. Les régions qui donneront du sens sont dites *secondaires* ou *associatives* (c'est-à-dire qui *associent* plusieurs modalités, sensorielles par exemple). Ces régions plus intégratives sont très différentes des régions primaires.

Qu'entend le cortex auditif primaire ?

De la même façon que le cortex visuel primaire, le *cortex auditif primaire* (aire 41 de Brodmann) récupérera l'information auditive sous la forme d'une information sensorielle brute.

Les informations auditives proviennent de la *cochlée*, organe constitutif de notre oreille interne. Savante construction à la beauté fragile (attention aux sons trop forts dans les écouteurs des baladeurs qui abîmeront rapidement et irrémédiablement ce chef-d'œuvre naturel), la cochlée vibre de sa base à son apex à des fréquences comprises, respectivement, entre 20 000 Hz et 20 Hz. À noter : l'architecture fonctionnelle de la cochlée est représentée à l'identique, point par point, au niveau du cortex auditif primaire ! Cette représentation fidèle est nommée *tonotopie* (voir fig. 11).

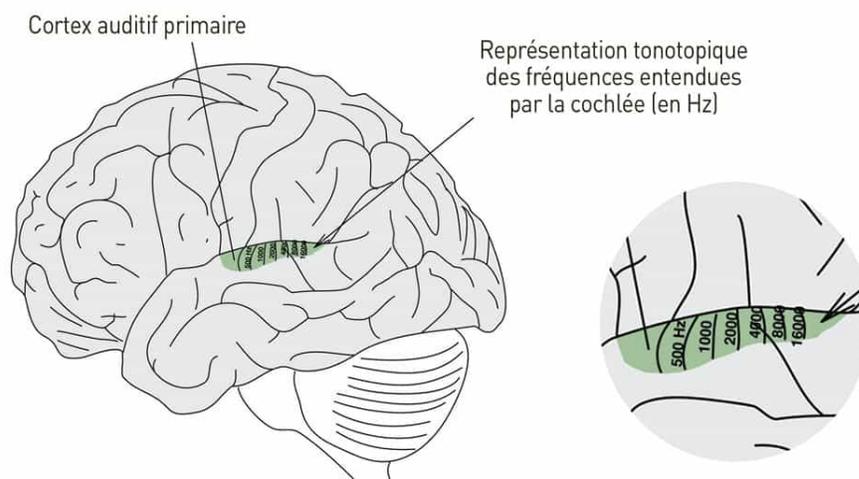


Figure 11 : Le cortex auditif primaire et la tonotopie (Source : M. Bonnet)

Les sons sont traités dans des parties spécifiques du cortex auditif primaire en respectant point par point le traitement des fréquences réalisé dans la cochlée. Ainsi, les territoires cérébraux associés s'étalent selon un axe antéro-postérieur du traitement des plus basses fréquences vers le traitement des plus hautes fréquences.

Neuromythe

J'ai une mémoire visuelle ou auditive

FAUX. Même si chaque personne peut préférer qu'on lui présente des informations selon sa modalité sensorielle privilégiée (par exemple visuelle ou auditive), cette préférence n'aura pas d'impact sur ses performances en rappel par exemple. En effet, même si un individu est supposé avoir une mémoire plus visuelle qu'auditive, lui donner une information oralement ne va pas pour autant le faire contre-performer. Au contraire, varier la modalité sensorielle du contenu informatif proposé à un enfant lui permet de combiner, grâce à la pluralité des modalités sensorielles d'entrée, un traitement plus en relief de l'information transmise, car celle-ci aura été traitée à plusieurs niveaux et de différentes façons par son cerveau.

Si le cortex auditif primaire entend un son ou une suite de sons, il ne reconnaîtra pas pour autant leur signification. Le cortex auditif primaire ne reconnaît pas un son comme une partie d'un mot ou encore moins d'une idée ou d'un concept. De la même façon que pour le cortex visuel primaire, les traitements ultérieurs qui donneront du *sens* aux sons entendus seront assurés par d'autres régions corticales (secondaires et/ou associatives), notamment l'aire de Wernicke (aire de compréhension du langage), située à proximité du cortex auditif primaire.

Que perçoit le cortex somesthésique primaire ?

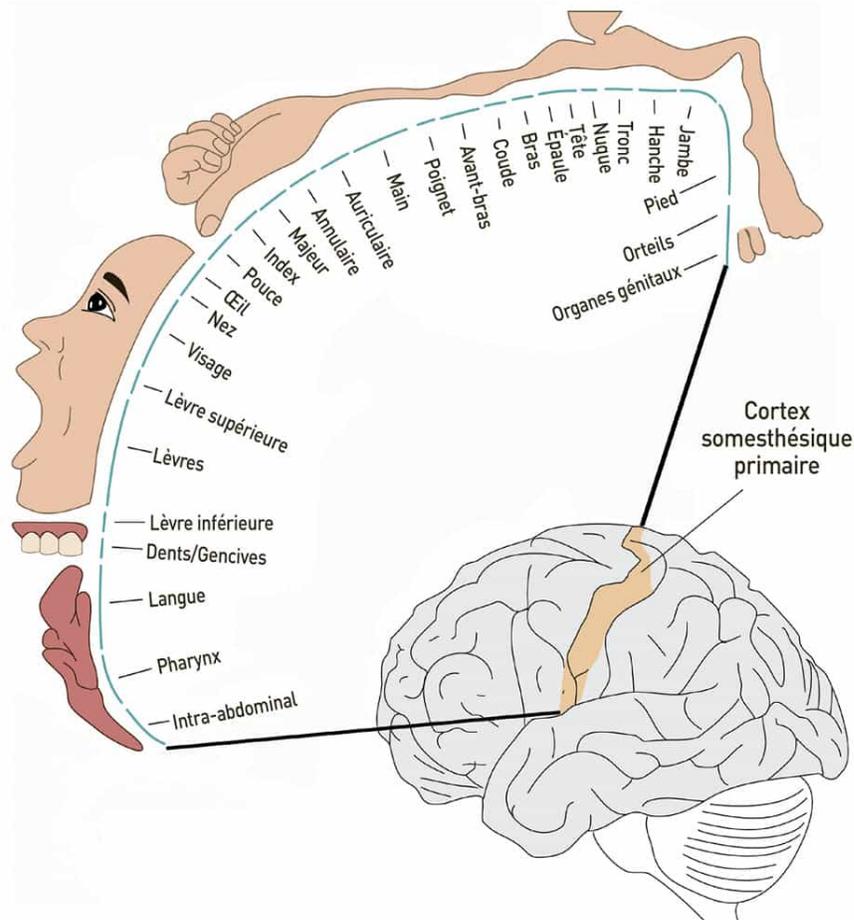


Figure 12 : Homonculus sensitif

Présenter d'ores et déjà le cortex somesthésique primaire nous permet de poser des bases solides pour comprendre un exemple qui sera présenté ultérieurement dans le chapitre traitant de la plasticité cérébrale.

Les régions somesthésiques primaires sont positionnées à l'arrière du sillon central qui sépare le lobe frontal du lobe pariétal. Représentant une petite bande du cortex qui s'étale ainsi, sur chaque hémisphère, de sa partie médiale jusqu'à sa partie latérale, le cortex somesthésique abrite notre *identité corporelle*.

Comme nous pouvons l'apprécier sur la figure ci-dessus, notre schéma corporel est représenté membre par membre, mais pas tout à fait dans l'ordre. Si l'on ramène la grandeur des territoires cérébraux, c'est-à-dire la quantité d'unités de traitement

nécessaires pour coder chacun de nos membres, à un schéma proportionné, nous obtenons ceci :



Figure 13 : Homonculus sensitif

Dans notre cerveau, la représentation de notre corps ne respecte pas les proportions physiques de celui-ci. Il en respecte les proportions *fonctionnelles*...

La fonction fait l'organe. Le cerveau s'enrichit de ses contacts, actions et interactions avec l'environnement. Plus la fonction est majeure, plus les récepteurs corporels sont nombreux, plus le territoire alloué est étalé dans le cerveau. Dans le cortex somesthésique primaire priment notre visage (organe privilégié de nos interactions sociales) et nos mains (organes privilégiés de nos interactions physiques avec le monde extérieur). Bien qu'utiles, le dos, les genoux ou les pieds sont relégués à des dimensionnements corticaux beaucoup plus réduits. Cette représentation exacte de notre corps dans le cerveau est nommée *somatotopie*. Appelée également *homonculus sensitif*, cette représentation est extrêmement fidèle à l'*homonculus moteur*. Effectivement, le cortex moteur primaire se situe juste en avant du

cortex somesthésique primaire (en avant du sillon central) et présente des territoires de commandes des muscles du corps parfaitement comparables à l'échelle de chaque membre du corps (visages et mains surdimensionnés) que celui du cortex somesthésique.

Il sera nécessaire d'avoir bien en tête l'ensemble de ces constatations lors de la lecture du chapitre sur la plasticité cérébrale (voir p. [«1 - La plasticité cérébrale : une puissance dynamique», page 58](#)) lorsque nous aborderons la façon dont un cerveau s'adapte dynamiquement.

Pourquoi s'intéresser aux régions corticales primaires ?

En examinant le ratio entre la surface des régions corticales primaires et la surface corticale totale, on observe que ce ratio est très faible chez l'humain. En effet, chez le rat, environ 80 % de son territoire cortical est dévolu aux régions corticales primaires. Chez le chat, cette proportion descend à environ 50 %. Chez l'homme, la part que prennent les régions primaires au niveau du cortex n'est plus que d'environ 20 % (voir fig. 14).

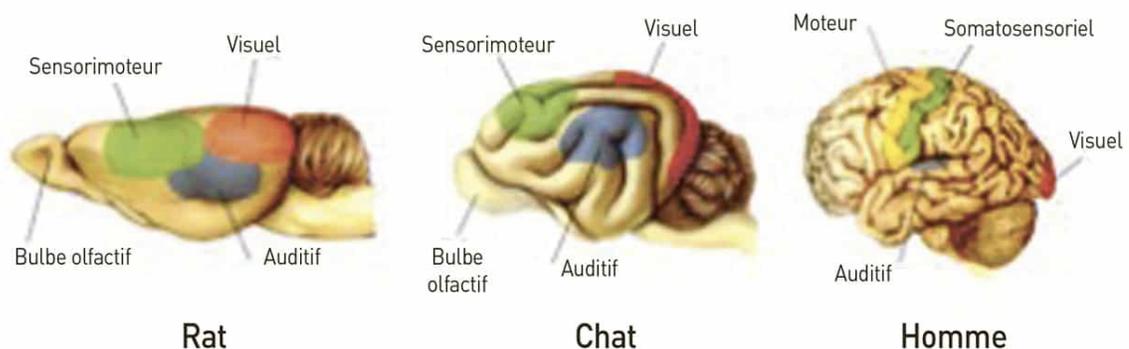


Figure 14 : L'importance des cortex primaires selon les espèces (Source : Bear et al., 1999).

Ainsi, les régions cérébrales les plus intéressantes dans l'image du cerveau humain ci-dessus sont celles qui *ne sont pas* en couleur. En effet, la plus grande partie d'un cerveau humain (au niveau cortical) ne constitue pas du cortex primaire mais du cortex

secondaire ou associatif. La plus grande proportion du territoire cortical d'un cerveau humain est consacrée à des régions *intégratives* qui permettent de *donner du sens* aux informations qui leur parviennent. Un cerveau humain n'est pas simplement sensible à son environnement, il n'est pas seulement un récepteur de ses différentes modalités sensorielles, il ne se contente pas de récolter des informations. Il les intègre à de très hauts niveaux de traitement en les combinant pour en extraire tout le sens qu'elles sont susceptibles de renfermer.

Ainsi que nous pouvons le voir, les interactions qu'entretient le cerveau avec son environnement extérieur sont codées et profondément intégrées dans sa structure. Il émerge ainsi la notion de *cartes cérébrales*. Nous sommes tous des *êtres encartés* à l'échelle du cerveau (voir encadré ci-dessous).

Z oom sur Expérimenter l'encartage cérébral

L'encartage cérébral peut être révélé dans certaines situations de la vie. Par exemple, consécutivement à une visite chez le dentiste pour la mise en place d'un plombage ou bien à cause de la perte d'un petit bout de dent sur un noyau de fruit récalcitrant : inconsciemment et involontairement, le bout de notre langue entreprend alors (et parfois pendant plusieurs heures) de minutieusement explorer la modification intervenue dans le paysage buccal. Le cerveau a reconnu que quelque chose avait changé et essaie de récolter le plus d'informations sensorielles possibles pour mettre à jour sa carte somesthésique. Dans cet exemple, nous pouvons constater que même la morphologie de nos dents est encartée cérébralement.

Toutes ces cartes cérébrales, qu'elles soient motrices ou sensorielles, permettent de coordonner et d'unifier l'ensemble des composantes fonctionnelles d'action du cerveau sur son environnement. C'est parce qu'il connaît avec précision l'état du corps, sa position, ses torsions, ses souffrances éventuelles, sa relation étroite avec son environnement, que le cerveau saura comment commander l'ensemble des muscles du corps pour réaliser l'action envisagée.

Il est important de noter que nous ne sommes pas tous égaux au regard de nos territoires cérébraux alloués à la perception de

notre univers extérieur et à l'interaction de notre corps avec celui-ci. En effet, des différences cérébrales, à la fois structurelles et fonctionnelles, peuvent exister qui dépendront majoritairement de deux facteurs principaux :

1. la *présence et l'intégrité* des *récepteurs sensoriels* (qu'ils soient somesthésiques, visuels, auditifs, olfactifs ou gustatifs) ;
2. la *fréquence d'interaction* entre le corps et l'environnement dans lequel il évolue.

Ce deuxième facteur s'associe fortement aux processus de plasticité cérébrale. En effet, et ainsi que nous pouvons le comprendre, un athlète de haut niveau aura, par exemple, des encartages somesthésiques potentiellement très différents d'une personne sédentaire. Et ce, d'autant plus que l'athlète aura commencé précocement son activité sportive.

Le cerveau s'enrichit en permanence de son action sur le monde au travers de l'ensemble des retours sensoriels (*feed-backs*) que cette interaction génère. Sans plasticité cérébrale, ces *feed-backs* n'auraient que peu d'utilité. De la même manière, sans *feed-back*, la plasticité cérébrale ne pourrait pas correctement s'exprimer. C'est parce que le cerveau est adaptatif et qu'il est équipé pour récupérer des contenus informatifs qu'il est capable d'évoluer et d'apprendre.

Il existe deux conséquences à la compréhension de ces phénomènes :

- un cerveau en interaction avec son environnement, qui vit ses apprentissages par différentes modalités sensorielles, est plus à même d'adapter finement à la fois ses actions sur le monde mais également sa compréhension de celui-ci ;
- plus les capacités de plasticité cérébrale seront importantes, plus les effets de cette interaction seront majorés.

Ce que l'on doit en déduire est qu'un cerveau jeune, aux grandes capacités de plasticité cérébrale, aura tout à gagner à vivre, en

termes moteurs et sensoriels, l'ensemble de ses apprentissages.

L'architecture cérébrale est un équilibre subtil entre spécialisation, mutualisation et cohésion. Seule l'unité fonctionnelle de l'organe, portée par un maillage exceptionnel de fibres de connexion, est garante de l'expression de chacune de nos fonctions cérébrales. Fortement orienté vers l'interaction avec son environnement au travers de ses expériences motrices et sensorielles, le cerveau s'enrichit de celles-ci pour potentialiser l'ensemble de ses apprentissages.

3 NOTIONS À RETENIR

- Le cerveau se subdivise en sous-régions spécialisées mais qui ont besoin de travailler ensemble pour exprimer leurs fonctions.
- Toutes les régions cérébrales sont connectées directement ou indirectement les unes aux autres et partagent leurs contenus informatifs.
- Vivre en termes moteurs et sensoriels ses apprentissages permet à l'enfant de les potentialiser.

5 - Langage cérébral et énergie

Nous avons visualisé la structure du cerveau, à l'échelle de ses cellules et à l'échelle de ses régions. La deuxième étape vers la compréhension du fonctionnement cérébral nécessite de s'intéresser à la façon dont un cerveau communique et partage les informations entre ses différentes unités. Comprendre cette étape est nécessaire pour pouvoir embrasser toutes les données qui vont suivre sur les phénomènes de plasticité cérébrale.

Le signal nerveux : un langage à part

Pour comprendre le signal nerveux, base de toute communication cérébrale, il ne faut pas se laisser rebuter par la physique ou la chimie. Nous allons tour à tour parler de charges positives et de charges négatives, d'ions sodiques et potassiques et de concentrations ioniques. Voilà nos acteurs, le décor est planté. Mais rassurons-nous, l'enchaînement des événements est au final très simple et de cette extrême simplicité va émerger le fonctionnement infiniment complexe de notre cerveau.

Le potentiel d'action : une communication électrique

La spécificité et la force d'un neurone résident dans sa capacité à générer un signal électrique ou *potentiel d'action*.

Comprendre le signal nerveux n'est pas simplement comprendre le neurone, c'est lever le voile sur la formidable machinerie de communication du cerveau.

Représentons-nous, tout d'abord, l'axone (pour rappel, les axones sont les fibres nerveuses qui permettent aux neurones de se contacter entre eux) et plus particulièrement sa membrane. Qu'est-ce qu'une membrane cellulaire sinon une séparation physiologique entre deux milieux, un milieu intracellulaire (l'intérieur de l'axone) et un milieu extracellulaire (l'extérieur de l'axone). Tout va se jouer au niveau de cette membrane axonale.

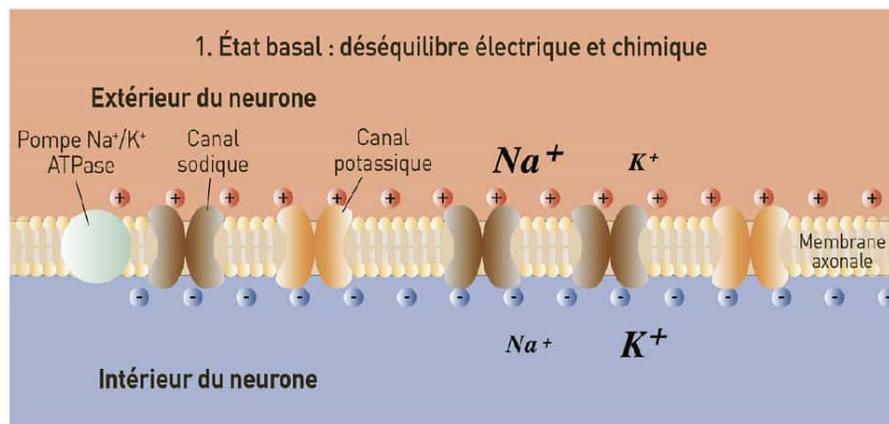


Figure 15 : Membrane axonale (Source : M. Bonnet)

La membrane d'un axone a cela de particulier qu'elle se comporte comme une *pile*. En effet, près de la surface *externe* de la membrane, il y a plus de charges *positives*. Et près de la surface *interne* de la membrane, ce sont les charges *négatives* qui sont en surnombre. C'est cette différence de charges qui crée la pile au niveau de la membrane de l'axone. On appelle cette différence de charges, le *dipôle membranaire*, car, comme son nom l'indique, il a deux pôles, positif à l'extérieur et négatif à l'intérieur.

Voilà pour la physique : une simple différence de charges

électriques.

Attaquons la chimie...

De part et d'autre de la membrane de l'axone, certains ions ne sont pas repartis selon les mêmes proportions. Il y a plus d'ions *sodiques* (Na^+) près de la surface *externe* de la membrane et plus d'ions *potassiques* (K^+) près de la surface *interne* de la membrane.

Avant tout signal nerveux, le neurone est donc en *déséquilibre* à la fois *électrique* et *chimique* de part et d'autre de sa membrane axonale. Ce point est capital (voir fig. 15, étape 1: État basal).

À partir de cette étape, les acteurs vont s'exprimer...

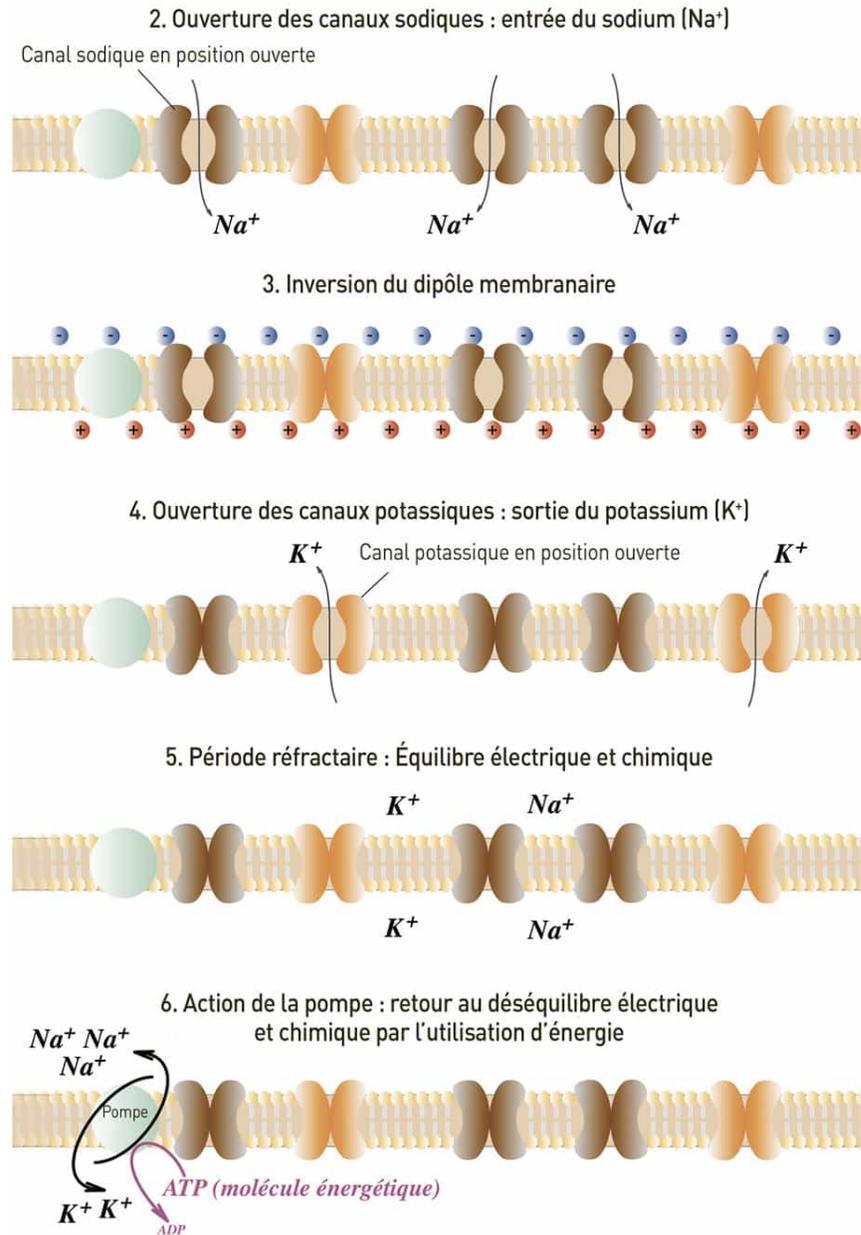


Figure 16 : Les étapes du signal nerveux (Source : M. Bonnet)

Quand le neurone s'active, sa membrane axonale devient brusquement poreuse aux ions *sodiques* (Na^+) par l'ouverture de canaux *sodiques* (les canaux sont des protéines fichées dans la membrane qui permettent, lorsqu'ils sont en configuration ouverte, de laisser passer des ions spécifiques d'un côté à l'autre de celle-ci).

Ces ions sodiques vont alors traverser la membrane, du milieu

extracellulaire vers le milieu intracellulaire, pour *deux* raisons :

- parce que les ions sodiques (Na^+) portent une charge positive et vont donc être fortement attirés – comme des aimants – par la surface interne de la membrane qui est chargée négativement (les charges électriques opposées s'attirent) ;
- à cause de la loi physique d'équilibration des milieux.

Pour comprendre cette loi, il faut d'abord prendre un exemple. Imaginons deux bacs d'eau séparés par une membrane poreuse. Si nous mettons de l'encre rouge dans un des deux bacs et que nous attendons assez longtemps, l'encre va diffuser de manière homogène, et les deux bacs vont progressivement prendre la même coloration rosée. C'est la loi d'équilibration/homogénéisation des milieux. Il en est de même pour les ions sodiques qui vont se comporter exactement de la même façon que l'encre. Ils sont en plus grand nombre à l'extérieur qu'à l'intérieur du neurone, donc ils vont transiter de manière importante du milieu extracellulaire vers le milieu intracellulaire jusqu'à obtenir l'homogénéisation de leur concentration de part et d'autre de la membrane. Ils diffusent ainsi de l'extérieur du neurone vers l'intérieur du neurone jusqu'à atteindre leur point d'équilibre.

Les deux forces physiques qui font entrer les ions Na^+ dans le milieu intracellulaire sont donc *électrique* et *chimique*. C'est ce que l'on appelle le *gradient électrochimique*. Il est à noter que le neurone, à ce moment des événements, ne fait que laisser s'exprimer les lois les plus simples de la physique (voir fig. 16, étape 2 : Ouverture des canaux sodiques).

Abordons le deuxième volet du signal nerveux. L'entrée massive d'ions sodiques (chargés positivement, rappelons-le) amène une quantité importante de charges positives près de la surface *interne* de la membrane axonale. Ceci provoque une inversion de la polarité de la membrane (la pile inverse son pôle positif avec son pôle négatif), la surface externe devient négative tandis que la surface interne devient positive. Il y a *inversion du dipôle*

membranaire (voir fig. 16, étape 3 : Inversion du dipôle membranaire).

Cette inversion du dipôle provoque l'ouverture des *canaux potassiques*. Les ions potassiques (K^+) obtiennent alors toute latitude pour bouger d'un compartiment à l'autre. Et ils vont le faire en suivant les mêmes lois physiques que celles qui ont fait bouger les ions sodiques (Na^+) : ils sont chargés positivement et l'extérieur de la membrane est devenu négatif. Et ils sont en plus grande quantité à l'intérieur qu'à l'extérieur. Les ions potassiques transitent donc du milieu intérieur du neurone vers le milieu extérieur, mus par le même gradient électrochimique (voir fig. 16, étape 4 : Ouverture des canaux potassiques).

Il est possible d'enregistrer ces événements grâce à des électrodes directement au contact de l'axone. En effet, ces transferts de charges électriques de part et d'autre de la membrane ne sont ni plus ni moins que des *courants électriques*. Les enregistrements obtenus à partir d'électrodes positionnées sur l'axone permettent d'observer une courbe qui fait un pic, nommée à juste titre « *spike* » en anglais et « *potentiel d'action* » en français. C'est le signal nerveux qui constitue la base de tout *langage cérébral* (voir fig. 17).

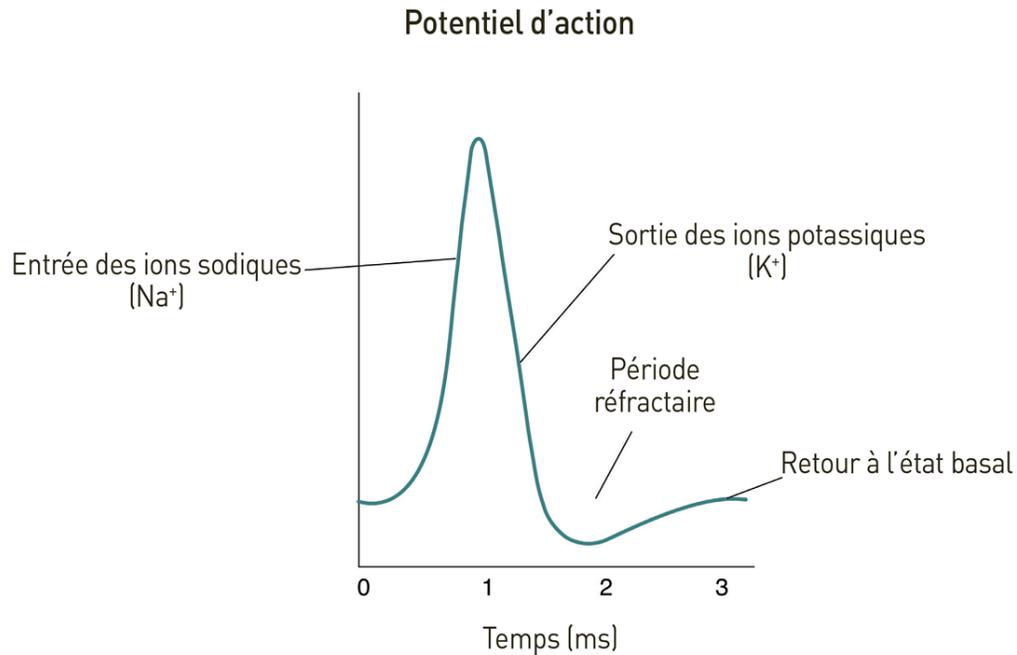


Figure 17 : Étapes du signal nerveux (Source : M. Bonnet)

Le coût en énergie du signal nerveux

Après la genèse du potentiel d'action, le neurone entre dans un état nommé « *période réfractaire* ». Dans cet état, le neurone est à l'équilibre électrique et chimique de part et d'autre de sa membrane donc les ions n'ont plus de raison, ni physique ni chimique, de bouger. Il ne peut pas y avoir de transfert de charges donc pas de potentiel d'action. Dans cet état, le neurone ne peut donc plus s'activer (voir fig. 16, étape 5 : Période réfractaire).

Mais comment le neurone revient-il à son état de déséquilibre électrique et chimique, précurseur et clé de voûte de tout signal nerveux ?

À y réfléchir, le plus intéressant dans un neurone n'est pas le potentiel d'action lui-même mais l'événement qui le suit, celui qui va lui permettre d'obtenir, à nouveau, le déséquilibre électrique et chimique. Cette action est produite par la mise en jeu d'une protéine nichée dans la membrane de l'axone. Cette protéine agit comme une *pompe*. Elle évacue les ions sodiques vers l'extérieur

de la membrane et dans le même mouvement les ions potassiques vers l'intérieur, ramenant progressivement la membrane à un déséquilibre (voir fig. 16, étape 6 : Action de la pompe).

Si vous avez déjà essayé de rapprocher deux aimants par leurs faces chargées identiquement (« *plus* » avec « *plus* » par exemple), vous saurez que les aimants ont tendance à se dérober sous l'action. Les charges électriques identiques se repoussent. Donc pour faire se coller les aimants, nous sommes obligés d'utiliser de l'énergie (musculaire !). Il en est de même pour la pompe dans la membrane de l'axone nommée à juste titre la pompe Na^+/K^+ ATPase. Comme son nom l'indique, elle utilise l'ATP, *molécule énergétique* de l'organisme, pour fonctionner et forcer les charges identiques à rester ensemble.

Zoom sur Le neurone : l'exemple de la maîtrise des énergies par le vivant

Il est à noter que le neurone ne se trouve à *l'équilibre* électrique et chimique de part et d'autre de sa membrane axonale que dans deux situations très différentes :

- après chaque signal nerveux qu'il génère. Il entre alors dans une période réfractaire normale ;
- à sa mort. La mort se caractérise, en effet, par l'incapacité à maîtriser les énergies. Dans cet état, le neurone ne peut plus utiliser la pompe Na^+/K^+ ATPase et recréer son déséquilibre électrique et chimique précurseur du signal nerveux. Cela peut arriver, notamment, lorsque le neurone n'a plus été supplémenté en oxygène. Car l'oxygène est nécessaire à la production d'ATP qui est la molécule énergétique de l'organisme. À l'échelle du cerveau entier, si tous les neurones ont été privés d'oxygène, l'impossibilité d'utiliser l'ensemble des pompes Na^+/K^+ ATPase entraîne l'état de *mort cérébrale*, c'est-à-dire l'incapacité du cerveau à produire de nouveaux signaux nerveux.

Les neurones et leurs activités sont un exemple parlant de la capacité du vivant à utiliser les lois de la physique et de la chimie à son avantage mais également à *aller contre* ces mêmes lois grâce à la *maîtrise de l'énergie*.

C'est à cette étape que se révèle toute l'importance de l'organe cérébral : *sa composante énergétique*. Chaque neurone, pour chacun de ses potentiels d'action, devra consommer beaucoup d'énergie pour revenir à un état susceptible de pouvoir générer un

nouveau signal nerveux. Ainsi, par la gloutonnerie en énergie de toutes ses unités de traitement, le cerveau qui ne représente pourtant que 2 % du poids du corps est responsable de 20 % de sa consommation énergétique... Le fonctionnement cérébral nécessite donc une quantité d'énergie sans commune mesure par rapport au poids de l'organe. Pour comprendre un cerveau, il est donc essentiel d'en comprendre la *dimension énergétique*. Son coût énergétique est tel qu'il conditionne l'ensemble de ses stratégies de fonctionnement (voir chapitre 2, « La plasticité cérébrale : une puissance dynamique », p. 58, et encadré ci-dessus).

Le message nerveux : de l'information en transit

L'activité d'un neurone est dépendante des signaux électriques qu'il reçoit. Mais cette dépendance n'est pas automatique, elle suit une loi binaire. Si la quantité d'informations reçues dépasse un certain *seuil* (nommé *seuil d'activation*), alors un potentiel d'action peut être observé. Dans le cas contraire, le neurone restera muet.

Tous les neurones ne s'activent pas de la même façon en termes de profil d'activation (la forme du potentiel d'action peut varier entre neurones), d'ions engagés ou de durée.

Il est également à noter que plus la quantité d'informations reçues par un neurone augmente, plus celui-ci est susceptible de réagir en augmentant la *fréquence* de ses potentiels d'action, jusqu'à la genèse éventuelle de *bouffées* de potentiels d'action.

Ainsi, l'ensemble des possibilités d'activations à l'échelle d'un neurone, et encore plus à l'échelle des réseaux, constitue un *code* encore largement incompris par la recherche en neurosciences. En effet, même si nous comprenons certaines réactions de certains neurones dans certaines conditions, le *langage combiné* de ces différentes unités de traitement à l'échelle d'un cerveau entier nous échappe encore profondément.

La synapse : quand la chimie s'en mêle

La synapse correspond à la zone de rapprochement entre l'axone du neurone émetteur (le neurone qui parle) et le dendrite du neurone récepteur (le neurone qui écoute). À l'arrivée du message nerveux (potentiel d'action) dans la terminaison synaptique (la partie la plus distale de l'axone), une cascade d'événements se met en place.

La terminaison synaptique (*bouton synaptique*) se présente comme un renflement de la membrane du neurone. Dans ce renflement sont prisonnières de petites vacuoles qui contiennent des messagers chimiques : les *neurotransmetteurs* (voir fig. 18).

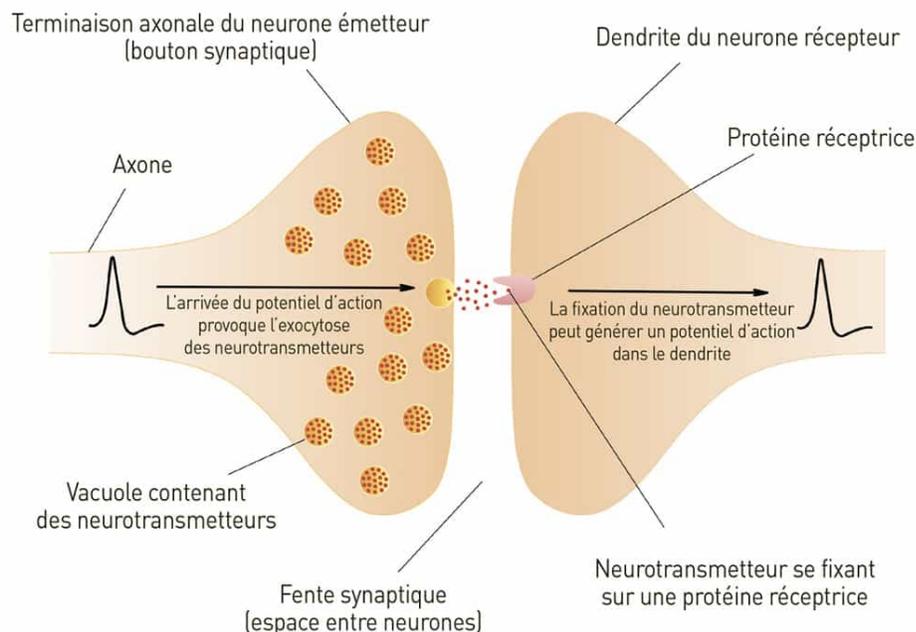


Figure 18 : La synapse (Source : M. Bonnet)

Zoom sur

La synapse en maître du hasard

La libération des neurotransmetteurs ne suit pas une loi déterministe et n'est donc pas prévisible. Bien au contraire, la libération des neurotransmetteurs est soumise aux lois des probabilités, c'est-à-dire au hasard ! Attention cependant, le hasard doit être compris ici au sens statistique du terme. Le hasard suit des lois mathématiques précises qui sont au cœur de nombreux travaux en physique quantique. Dans certains de ces travaux, les vacuoles contenant les neurotransmetteurs ont ainsi été assimilés à des « quanta » (paquets) d'informations.

Par la maîtrise des lois des probabilités, la synapse pourrait s'autoriser une extrême

flexibilité dans ses réponses et donc dans sa communication. Cette flexibilité est supposée être à l'origine d'une partie de nos capacités de plasticité cérébrale.

Lorsque le potentiel d'action parvient à la terminaison synaptique, il provoque l'*exocytose* des vacuoles dans la *fente synaptique*. L'exocytose est un phénomène très simple : les vacuoles se rapprochent de la membrane axonale au regard de la fente synaptique et fusionnent avec elle. En fusionnant sa membrane avec la membrane axonale, la vacuole s'ajoute et libère donc son contenu dans la fente synaptique (voir encadré « La synapse en maître du hasard », p. [«La synapse en maître du hasard»,_page 54](#)).

La fente synaptique correspond à l'espace entre la membrane de l'axone du neurone émetteur et la membrane du dendrite du neurone récepteur. Il est important de rappeler que les neurones baignent dans un milieu aqueux permettant aux neurotransmetteurs de se disséminer (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur Le retard chimique

Il fallut attendre le milieu du XIX^e siècle et le neuroscientifique Ramon y Cajal pour découvrir que la structure cérébrale n'était pas un maillage ininterrompu de fibres, tel une gigantesque toile d'araignée, mais bien la somme d'unités disjointes et individualisables : les neurones.

À bien y réfléchir, le fait que les cellules neuronales soient séparées les unes des autres par un espace aqueux représente un certain défi pour le cerveau. En effet, un signal électrique tel un potentiel d'action ne peut pas traverser cet espace. Comment alors un neurone peut-il contourner le problème et autoriser la transmission de son information vers son partenaire ? L'utilisation d'un messenger chimique, le neurotransmetteur, entre les cellules neuronales est la solution au problème, mais elle sous-entend également une concession. En effet, dans l'immense chaîne de communication entre neurones, la synapse est l'endroit où le message nerveux va perdre du temps.

De l'autre côté de la fente synaptique se trouvent des récepteurs. Ils sont formés de protéines fichées dans la membrane et jouxtant un canal ionique. Les neurotransmetteurs qui se fixent sur les récepteurs vont ainsi provoquer une cascade d'événements chimiques susceptible d'entraîner l'ouverture du canal ionique

adjacent.

La communication neuronale doit donc se comprendre en trois étapes : l'information est *électrique* jusqu'à la terminaison synaptique, elle devient *chimique* au travers des neurotransmetteurs et redevient à nouveau *électrique* avec l'ouverture du canal ionique sur la dendrite et la genèse d'un nouveau potentiel d'action vers le corps cellulaire du neurone récepteur.

Ce corps cellulaire intégrera l'information et provoquera éventuellement en suivant un signal nerveux dans l'axone. Le neurone récepteur pourra alors devenir un neurone émetteur, début d'une longue chaîne de transmission du signal nerveux.

Deux types de synapses existent : des synapses *excitatrices*, qui vont provoquer une réponse électrique du neurone récepteur, ou *inhibitrices*, qui vont au contraire inhiber la réponse du neurone récepteur. Selon l'effet sur le neurone récepteur, un neurotransmetteur est donc considéré comme *excitateur* (c'est le cas par exemple du glutamate) ou *inhibiteur* (c'est le cas du GABA) (voir encadré ci-dessous).

Comme évoqué précédemment, les synapses sont désormais considérées comme des entités tripartites puisque, en plus des deux neurones impliqués, un pied astrocytaire (prolongement d'un astrocyte) participe lui aussi à cette phase de communication entre les neurones. Il pourrait être facilitateur pour une communication plus efficiente entre les neurones. Cependant, son rôle exact ainsi que son étendue restent encore largement méconnus.

Zoom sur

Neurotransmetteur excitateur ou inhibiteur

Il est possible de constater les effets excitateurs ou inhibiteurs de certains neurotransmetteurs dans notre quotidien. En effet, le glutamate, neurotransmetteur excitateur, est également un condiment largement utilisé dans la cuisine asiatique sous forme de glutamate monosodique. Absorbé par des individus présentant une porosité de leur barrière hémato-encéphalique, il peut être responsable du syndrome

dit du restaurant chinois. Par ce syndrome, la personne peut notamment présenter un malaise du fait de l'activation soudaine et non désirée de plusieurs synapses glutamatergiques en même temps.

Concernant le GABA, neurotransmetteur inhibiteur, il est à noter que certaines molécules exogènes sont susceptibles de potentialiser/faciliter son action au niveau cérébral. C'est notamment le cas des *benzodiazépines* qui sont des molécules entrant dans la composition de certains somnifères et anxiolytiques. Nous comprenons alors tout à fait que, lors de la prise de ces médicaments, le cerveau va être fortement contraint dans son activité puisque les synapses inhibitrices seront plus fortement sollicitées. Du fait de cette action des benzodiazépines sur l'activité cérébrale, il est crucial de n'en utiliser que dans le cadre strict d'une prescription médicale. Tout acteur chimique exogène (médicaments, drogues, etc.) n'est jamais anodin à l'échelle de l'organisme et encore moins à l'échelle cérébrale. Un cerveau reste une machinerie chimique d'une très grande précision à protéger fortement au quotidien.

Le cerveau, un glouton en énergie

Ainsi que nous venons de le voir, plusieurs types d'activités existent au niveau du cerveau :

- une activité *électrique* résultant de la capacité des neurones à créer des signaux nerveux (potentiels d'action) ;
- une activité *chimique* résultant des mécanismes de transmission de neurotransmetteurs entre deux neurones au niveau des synapses.

À ces deux activités, il faut rajouter une activité *métabolique*, résultant de la consommation en énergie de l'organe. Celle-ci, comme précédemment présenté, est notamment liée à l'utilisation d'ATP qui permet au neurone de revenir à son état de déséquilibre électrique et chimique, précurseur d'un nouveau signal nerveux. Ce haut niveau de consommation énergétique fait du cerveau l'organe le plus énergivore du corps humain (dix fois plus que sa taille ne le laisserait supposer).

En s'intéressant à ce métabolisme cérébral, nous constatons que 60 % de celui-ci est utilisé pour autoriser la *fonction* de l'organe, notamment ses capacités d'électrogénèse (capacité à produire un potentiel d'action). Les autres 40 % de la consommation énergétique permettent au cerveau de maintenir son *intégrité*

cellulaire et tissulaire. À ce niveau, nous pouvons constater qu'un peu moins de la moitié de la consommation énergétique d'un cerveau humain est utilisée non pas pour le faire fonctionner mais *pour être en mesure de le faire*. Ainsi, maintenir une architecture cérébrale en état de fonctionnement représente pour le cerveau un coût énergétique faramineux.

Bien oxygéner son cerveau

La consommation énergétique d'un cerveau est colossale et se produit en flux tendu. Pour l'approvisionner à chaque seconde, un réseau imposant d'artères et de veines parcourt l'ensemble de l'organe. Cette irrigation permanente produit un débit sanguin cérébral moyen d'environ 50 ml pour 100 g de tissu par minute (ce débit peut grandement varier entre les différentes régions cérébrales). Chez l'enfant, ce débit sanguin cérébral est en moyenne *deux fois plus élevé*.

Du fait de son incapacité à survivre sans être approvisionné en oxygène, le cerveau reste très vulnérable face à sa privation partielle (hypoxie) ou totale (anoxie). Sans un approvisionnement optimal en oxygène (et donc en sang), les neurones sont susceptibles de dysfonctionner, de s'altérer, voire de mourir.

Une bonne oxygénation sanguine est donc essentielle pour conserver son cerveau en bonne santé. Ceci explique les bienfaits sur le cerveau d'une activité physique régulière, notamment chez l'enfant.

Pour s'oxygéner convenablement, il est important d'avoir un minimum de 30 à 45 minutes d'exercice physique par jour, en extérieur plus favorablement ou *a minima* dans un endroit spacieux et/ou bien ventilé. Comme certaines séances de sport n'ont pas forcément vocation à être quotidiennes, ne pas négliger des activités simples comme la marche ou bien encore le jardinage qui, en plus d'oxygéner le cerveau au grand air, participent à développer ses capacités de planification.

Le cerveau humain est non seulement énergivore mais il fonctionne également en *flux tendu*. C'est-à-dire qu'il dépend totalement de l'approvisionnement, en temps réel, en oxygène et en glucose (briques élémentaires de la production énergétique (ATP)) par les vaisseaux sanguins cérébraux. En effet, le cerveau ne possède *aucune ressource ni aucune réserve énergétique en propre*. S'il n'est pas vascularisé convenablement à chaque seconde, il n'est plus capable de maintenir, non seulement, sa fonction mais également son intégrité (voir encadré « Bien oxygéner son cerveau », p. [«>>, page 56](#)).

POUR ALLER PLUS LOIN

Les accidents vasculaires cérébraux

La connaissance de l'architecture croisée des commandes motrices (l'hémisphère gauche contrôlant l'hémicorps droit) et celle des régions impliquées dans les fonctions langagières sont notamment le fruit d'études lésionnelles comme l'étude des conséquences des accidents vasculaires cérébraux (AVC). Les AVC correspondent à une rupture d'approvisionnement en sang d'une ou de plusieurs régions cérébrales. Le sang n'apportant plus l'oxygène nécessaire aux neurones pour fonctionner, ceux-ci sont alors susceptibles de mourir rapidement et leurs fonctions de s'altérer plus ou moins gravement.

Comme nous pouvons le comprendre, l'AVC est une *urgence thérapeutique* à prendre en charge le plus rapidement possible pour en limiter les effets structurels et fonctionnels.

Afin de pouvoir lancer l'appel aux secours et d'accélérer la prise en charge, il est important d'accorder une vigilance particulière aux symptômes évocateurs d'un AVC tels que des difficultés *subites* à parler/s'exprimer, bouger un membre ou une partie du visage.

Comme on peut le comprendre, le cerveau est contraint dans son activation en cela qu'il doit obligatoirement *s'adapter en permanence à ses besoins métaboliques*.

Le fonctionnement cérébral suit alors une règle aisément compréhensible : la recherche permanente du coût énergétique *minimal* (voir encadré ci-dessous).

Neuromythe

Nous n'utilisons que 10 % de notre cerveau

FAUX. Même si le cerveau n'est jamais utilisé à 100 % à un instant donné, bien plus de 10 % des réseaux neuronaux sont activés en permanence.

Si le cerveau n'activait en permanence que 10 % de ses réseaux, cela signifierait que sa structure est surdimensionnée de 90 % pour réaliser les actions/traitements demandés. Dans ce cas de figure, la stratégie cérébrale d'économie énergétique aurait tôt fait d'y faire le ménage (élagage synaptique notamment). Le coût énergétique nécessaire au maintien de l'intégrité du tissu et de son fonctionnement est bien trop important pour pouvoir l'autoriser.

Même si toutes les régions peuvent être activées à un moment ou à un autre, elles ne le sont, par contre, jamais toutes ensemble. Ceci est aisément compréhensible si nous prenons comme exemple les régions cérébrales motrices commandant le biceps et celles commandant le triceps (biceps et triceps sont des muscles antagonistes du bras, fléchisseur et extenseur respectivement). Si 100 % de notre cerveau s'activait en permanence, le biceps et le triceps se contracteraient donc toujours **en même temps et en permanence**, interdisant tout mouvement du bras !

Comme on peut le comprendre, le cerveau n'est jamais à 100 % de son utilisation possible, ce qui lui autorise des mises en jeu de ses réseaux neuronaux très flexibles et adaptables aux différents traitements et actions à réaliser.

Mais gardons à l'esprit que ce neuromythe cache en lui une vérité : un cerveau est *toujours optimisable* ! C'est dans la flexibilité subtile de ses réseaux cérébraux que se cachent ses capacités, sans cesse renouvelées, d'adaptation et d'apprentissage tout au long de la vie.

Si le cerveau peut faire la même action, avec le même niveau de performance, mais avec moins d'énergie consommée, il le fera. Nous allons en détailler les conséquences dans le prochain chapitre sur la plasticité cérébrale, car cette règle conditionne à la fois les stratégies fonctionnelles mais également structurelles de l'organe. La plasticité cérébrale n'est que l'expression de la recherche d'un fonctionnement optimisé à moindre coût.

Faire mieux avec moins, être capable d'être optimisé tout en gardant une marge de manœuvre pour faire face à une augmentation éventuelle de ses besoins, faire du cerveau un écosystème subtil oscillant en permanence entre ce qu'il doit faire, ce qu'il peut et ce qu'il pourrait : le résultat de cette équation dépendra exclusivement de la capacité de l'organe à coordonner et à maîtriser, à chaque seconde, l'ensemble de ses coûts énergétiques structurels et de fonctionnement.

Si la logique énergétique conditionne les choix cérébraux, il peut être intéressant de se poser la question suivante : jusqu'où un cerveau pourra et voudra s'impliquer énergétiquement ? Dans cette question prend racine l'importance de la motivation cérébrale, cette volonté de l'organe à attribuer une plus grande quantité de ressources énergétiques à une fonction définie.

3 NOTIONS À RETENIR

- Le langage cérébral est une combinaison d'informations électriques et chimiques.
- Le cerveau consomme une quantité d'énergie démesurée par rapport à son propre poids.
- Le cerveau fonctionne en flux tendu, il n'a aucune ressource énergétique en propre, il doit adapter son fonctionnement en permanence.

Comment le cerveau apprend

1 - La plasticité cérébrale : une puissance dynamique

Nous avons exploré la structure de l'organe, de ses cellules à ses régions. Nous avons compris les bases électriques, chimiques et énergétiques de la communication cérébrale. Désormais, un nouveau voyage commence, celui de la compréhension de la dynamique fonctionnelle cérébrale.

Tout le charme du cerveau, notamment ses exceptionnelles capacités d'adaptation, repose sur le fascinant phénomène de plasticité cérébrale. Mais qu'est-ce que la plasticité cérébrale ?

La plasticité cérébrale regroupe tous les changements que peut réaliser le cerveau à tous ses niveaux fonctionnels et structurels pour tendre vers un fonctionnement optimisé : des changements dans le nombre de ses unités de traitement (*neurogénèse*, capacité à produire de nouveaux neurones exclusivement observée dans l'hippocampe), dans le nombre de ses synapses, de ses dendrites, de ses canaux ioniques, de ses vésicules, de ses seuils d'excitabilité ou dans l'activation de ses réseaux cérébraux.

Toutes ces adaptations et modifications sont à la base de l'ensemble de nos apprentissages, mémoires, procédures et comportements. C'est l'assemblage subtil de toutes ces modifications à tous les niveaux fonctionnels qui conditionnent le caractère unique de chaque cerveau.

Les synapses de Hebb : une madeleine de Proust

En tant que neuroscientifique, lorsque nous cherchons à définir la plasticité cérébrale, le premier exemple qui nous vient à l'esprit est la madeleine de Proust. Pour la petite histoire, Marcel Proust, lorsqu'il était enfant, avait une nounou (sa tante) avec qui il passait d'agréables moments aux saveurs parfumées des madeleines qu'ils dégustaient ensemble. Des années plus tard, Proust entrant dans une boulangerie huma avec délectation les fragrances de ces mets d'autrefois et eut tout

à coup une réminiscence vivace de tous ses souvenirs d'enfance associés. La récupération de ses souvenirs – visuels, gustatifs, physiques et émotionnels tout à la fois – s'était opérée par une seule entrée sensorielle (l'olfaction). Quelques décennies plus tard, les neuroscientifiques s'emparèrent de cette madeleine, car elle collait étrangement bien avec une théorie : les *synapses de Hebb*.

Donald Hebb était un théoricien qui formula au milieu du xx^e siècle l'hypothèse suivante : deux neurones en activité au même moment créent ou renforcent leur connexion de sorte que l'activation de l'un par l'autre sera plus facile à l'avenir. *Autrement dit, l'efficacité du neurone A à activer le neurone B augmente si par le passé le neurone A a activé B de manière persistante et répétée.*

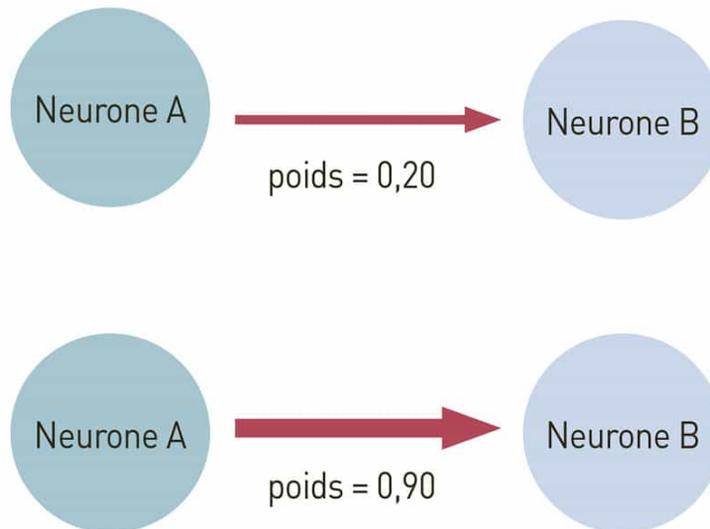


Figure 19 : Les pondérations neuronales (Source : M. Bonnet)

Dans la figure 19 ci-dessus, le neurone A active B. Sa probabilité d'activation (aussi appelée *poids* et cotée de 0 à 1) peut être, par exemple, de 0,20. Ce qui signifie que lorsque A est activé il y a 20 % de chance qu'il active B. Plus le neurone A (par exemple, la madeleine) va être associé de manière persistante et répétée à l'activation de B (par exemple, la nounou), plus le poids de A sur B va augmenter. Il peut, par exemple, ainsi passer à 0,90. Ce qui signifie que lorsque A s'active, B a 90 % de chance de s'activer à sa suite. Effectivement, lorsque Proust sent la madeleine, il pense d'un coup à sa nounou et tous ses souvenirs

d'enfant lui reviennent (voir encadré page suivante).

Neuromythe

Un neurone = une information

FAUX. Il est important de comprendre un point capital : l'information n'est jamais portée par un neurone seul. Croire que chaque neurone porte en lui une information dédiée a été appelé la *théorie du neurone grand-mère*. Raisonçons par l'absurde : si un seul neurone portait toutes nos connaissances, nos souvenirs, nos émotions associés à notre grand-mère, il suffirait que ce neurone meure pour que nous perdions d'un coup non seulement ces savoirs mais également la connaissance de l'existence même de notre grand-mère ! Par cette démonstration (assez dramatique), nous comprenons qu'un seul neurone ne peut pas porter une information quelle qu'elle soit. Tout savoir, toute connaissance, même la plus petite, même le comportement le plus simple n'est jamais le fruit de l'activation d'un seul neurone. L'information est portée et contenue par un *réseau entier*. Pour aller plus loin, l'information est le réseau. C'est l'activation du réseau neuronal plus ou moins vaste qui représente en réalité l'information. Le tout dans le cerveau, au niveau fonctionnel et structurel, vaut toujours plus que les parties. Pour comprendre le cerveau et ses capacités, il faut toujours s'obliger à raisonner à l'échelle macroscopique.

Ainsi, dans l'exemple présenté « Neurone A = madeleine » et « Neurone B = nounou », la vulgarisation est choisie à dessein : comprendre à l'échelle de l'unité pour entrevoir toute la complexité du véritable réseau qui se cache derrière...

Comprenez, cependant, que le réseau neuronal associé à la madeleine et à la nounou est bien plus vaste que les neurones A et B. Il englobe également des souvenirs émotionnels, visuels, somesthésiques, auditifs, etc.

Il est important à ce stade de retenir que chaque neurone est intimement lié en termes de poids à plusieurs milliers d'autres. On estime à environ 20 000 le nombre de contacts synaptiques de chaque neurone. Ce qui correspond à 20 000 pondérations différentes par neurone ! Multipliées par les 100 milliards de neurones du cerveau, on aboutit à un nombre astronomique de poids associés... Nous abordons dès lors tout à la fois la complexité infinie du cerveau humain, tout autant que son incroyable dynamique potentielle.

Prenons un autre exemple : le sportif de haut niveau. Imaginons l'ensemble des programmes moteurs nécessaires à un perchiste. Ces programmes moteurs peuvent être définis en une suite de commandes et d'exécutions motrices telles que (et ceci est non exhaustif) : partir du bon pied, prendre son élan, courir en tenant à bout de bras la perche en équilibre, accélérer l'allure, pivoter progressivement la perche pour venir

la planter dans le réceptacle au bas du tapis, se propulser par les jambes puis progressivement par les bras pour s'élever dans les airs, gérer son centre de gravité pour se tordre, se contorsionner afin d'enrouler son corps autour de la perche, passer les jambes, puis le tronc, rejeter la perche du bout de la main en profitant d'un dernier appui et gagner ainsi encore quelques millimètres supplémentaires de hauteur, pivoter enfin au-dessus de la barre transversale pour retomber de l'autre côté et en toute sécurité sur le tapis.

Combien d'heures d'entraînement, de travail, d'erreurs pour enfin aboutir à la séquence parfaite, celle qui fera monter le perchiste sur la première marche du podium ? Combien de pondérations synaptiques ajustées, contrôlées, ajoutées, affinées avant d'atteindre ce résultat parfait ? Est-il d'ailleurs parfait ou reste-il encore optimisable ? Est-il pérenne ? Le perchiste est-il susceptible de le perdre ? Serait-ce ces fameuses « sensations perdues » que désignent les athlètes blessés, éloignés temporairement de leur terrain d'entraînement ?

Deux informations sont à tirer de cet exemple :

- Un cerveau ne crée pas ses réseaux et ne trouve pas les bonnes pondérations pour les milliards de neurones impliqués dans la fonction (ici le saut à la perche) en un seul jour. Il lui faut beaucoup de travail. Et même si cela paraît efficace, tout réseau cérébral, de celui qui porte la séquence motrice du perchiste jusqu'à celui de l'enfant qui résout un problème de mathématiques, est *optimisable*.
- Un cerveau qui ne répète pas, qui ne s'entraîne pas, perd ses pondérations si durement acquises ; il « se rouille ».

Comment le savons-nous ?

Nous avons parlé plus tôt des synapses et plus particulièrement des récepteurs aux neurotransmetteurs placés sur le neurone récepteur (le neurone B dans notre exemple). Des études ont été faites sur des neurones *in vitro* au cours desquelles on force un neurone A connecté à un neurone B à décharger (voir encadré page suivante).

POUR ALLER PLUS LOIN

Les neurones sur écoute

Les études au niveau des neurones eux-mêmes nous apporte un autre regard sur les signaux nerveux. Certaines ont pour objectif de faire décharger artificiellement un neurone, c'est-à-dire que le neurone est isolé et qu'il ne reçoit, par conséquence, aucune afférence axonale d'un autre neurone. Pour réaliser ce type d'expérimentation sont apposées sur le neurone esseulé deux électrodes : une électrode de stimulation (avec laquelle l'expérimentateur envoie un courant ionique au travers de la membrane) et une électrode d'enregistrement (qui permet à l'expérimentateur de récupérer la réponse neuronale, c'est-à-dire l'éventuel influx nerveux/potentiel d'action généré).

Il est ainsi possible, en faisant varier les intensités de courant injecté dans la membrane, d'observer les réponses différentielles du neurone testé.

Dans ce type d'expérimentations, pour lesquelles on contraint le neurone A à décharger, il est possible d'observer la genèse d'un phénomène particulier dans le neurone B : dans sa membrane, des récepteurs spécifiques du neurotransmetteur libéré par le neurone A se mettent à *migrer* en direction de la synapse ultra-excitée par ce neurone A.

Qu'est-ce que cela signifie ?

Plus le neurone A active le neurone B au niveau de la synapse qui les relie, plus on assiste dans le neurone B à une migration de protéines réceptrices provenant des quatre coins du neurone B vers cette synapse : en amenant plus de récepteurs sur site, le neurone B devient plus sensible aux neurotransmetteurs libérés par le neurone A. Le neurone B « tend l'oreille » pour écouter ce que le neurone A veut lui dire... Ce faisant, le poids de A sur B augmente et Hebb avait raison... Mais attention, si A arrête de contacter B, au bout d'un certain temps les récepteurs qui avaient migré vers la synapse repartent en sens inverse dans cette même membrane du neurone B à la recherche potentielle d'une autre synapse à mieux écouter. Le poids d'un neurone sur un autre dépend donc de la capacité du neurone récepteur (B) à augmenter ses possibilités d'écoute du neurone émetteur (A) apparemment très loquace. Ainsi, le poids de A sur B augmente. Mais attention, si ce poids peut augmenter, il peut aussi diminuer si le neurone A devient peu à peu mutique.

Ce phénomène à l'échelle du neurone explique ce qui est observé à l'échelle de l'individu. Plus on s'entraîne, plus on associe des informations les unes avec les autres, plus le réseau sera puissant et stable. Mais l'inverse est aussi vrai... Tous nos apprentissages, nos

savoirs et souvenirs sont le résultat de la création de réseaux cérébraux aux pondérations très fines mais ajustables. Certains réseaux fortement consolidés par la répétition ou par le contexte émotionnel dureront toute notre vie, d'autres réseaux qui n'ont pas été assez souvent sollicités et travaillés se perdront dans les couloirs du temps. Nous souvenons-nous tous de l'énoncé exact du théorème de Thalès ? Peut-être pas et pourtant un réseau cérébral avait été créé spécialement pour lui...

Grâce à la plasticité cérébrale, un cerveau peut coder au sein de ses réseaux de nombreux savoirs et comportements. Seulement celle-ci a les défauts de ses qualités : une dynamique susceptible de s'inverser. Pourquoi ? Parce que, rappelons-le, nous ne sommes pas face à une machine figée structurellement avec un nombre fixe de microprocesseurs ou une architecture physique de connexion immuable et stable. Le cerveau est vivant, sa structure, faite de chair et de sang et fortement énergivore, raisonne toujours à moindre coût. Nous avons vu que le maintien de l'intégrité cellulaire représentait à lui seul près de la moitié des besoins énergétiques d'un cerveau. Le cerveau, organe énergivore fonctionnant à flux tendu, peut-il se permettre de maintenir une structure, une fonction, un réseau neuronal qui ne sert pas ? La réponse est non. Si ce n'est pas utilisé, cela régressera. Cela ne disparaîtra pas forcément. En effet, si l'on nous redonne l'énoncé exact du théorème de Thalès beaucoup d'entre nous diront : « Ah oui, c'est vrai. » Mais de nous-mêmes, nous ne nous en serions pas rappelés. Nous nous serions *rouillés*.

Tous les apprentissages, particulièrement chez l'enfant, doivent se comprendre ainsi : sans répétition, point de salut.

Neuromythe

Être doué ou non en maths, c'est de famille

FAUX. Notre génétique explique pour partie notre architecture cérébrale mais elle n'explique pas pour autant à quelles fonctions nous allons la dédier. Un cerveau s'enrichit de son expérience d'activation. Un lien puissant et *bilatéral* existe entre l'architecture cérébrale et les fonctions que celle-ci porte.

En effet, un cerveau peut être représenté sous la forme d'un *contenant* et d'un *contenu*. Dans cette représentation, le *contenant* correspond à la *structure cérébrale*. Le *contenu* correspond aux actions, comportements, fonctions, idées, etc.

Si l'on comprend aisément que toute altération du contenant (par exemple un choc

traumatique à la tête avec altération de la structure cérébrale) soit susceptible d'entraîner des modifications du contenu (troubles fonctionnels particuliers), alors il est tout aussi possible de comprendre qu'une modification du contenu soit susceptible de modifier le contenant. C'est le principe même de plasticité cérébrale.

De la même façon que les médaillés Fields de mathématiques (équivalent du prix Nobel mais pour les mathématiques) n'ont pas forcément des enfants médaillés Fields de mathématiques, des parents allergiques à tout ce qui ressemble à une équation peuvent avoir des enfants brillants en mathématiques...

Il ne faut pas hésiter, en conséquence, à encourager les enfants à se tourner vers les mathématiques (ou les sciences) même si on n'est pas soi-même un adepte de ces disciplines et surtout effacer la peur de mal faire ou de mal conseiller.

Gardons également toujours à l'esprit que, pour être doué, il faut aimer. C'est la spirale bien connue du cercle vertueux (plus on aime, plus on est doué et, plus on est doué, plus on aime), car un cerveau apprécie tout particulièrement de réussir ce qu'il entreprend (système de la récompense).

De l'optimisation par l'élagage

Passer d'un réseau neuronal qui ne sait pas à un réseau neuronal qui sait, c'est-à-dire capable de porter une connaissance ou une fonction, de manière fiable et optimisée, comment est-ce possible ?

Ainsi que nous l'avons déjà précisé, pour comprendre le cerveau, il faut comprendre l'énergie. Activer un réseau neuronal – ou même seulement le maintenir intègre – a déjà un coût énergétique considérable. Le cerveau suivra donc, quoi qu'il arrive, sa stratégie privilégiée : celle de fonctionner à coût énergétique minimal. Cela est d'autant plus vrai chez l'enfant et l'adolescent, pris dans les affres du développement du corps et des besoins énergétiques associés. Ils exprimeront une tendance forte à la stratégie du moindre effort... En témoigne la célérité (toute relative) d'un adolescent dans son trajet de la chambre à la cuisine... (!)

Ainsi que nous venons de le voir, lorsque des neurones s'inscrivent dans une activité mutuelle et répétée, il peut y avoir création de connexions plus robustes : un réseau neuronal émerge pour porter un souvenir, un savoir, un comportement ou une fonction.

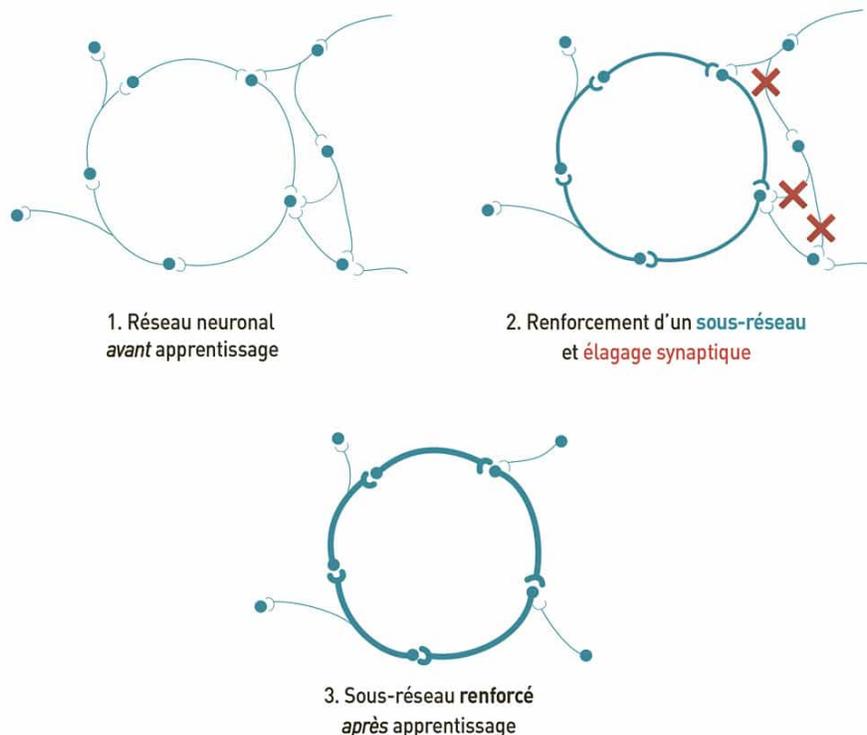


Figure 20 : Renforcement des réseaux et élagages synaptiques (Source : M. Bonnet)

Plus cette connaissance va être prise en charge par le réseau (par exemple : la connaissance « Paris est la capitale de la France »), plus le réseau se fortifie et/ou s'affine en termes de pondérations. Tant et si bien qu'il peut arriver un moment où le réseau neuronal initialement recruté soit surnuméraire dans les unités qui le composent par rapport à l'information qu'il doit porter. Est-il besoin d'avoir 100 neurones pour porter cette connaissance, quand 70 d'entre eux, optimisés dans leurs pondérations, suffiraient ? Dans un souci de limitation des coûts énergétiques, le cerveau opère un phénomène nommé *élagage synaptique* (*pruning*, en anglais). L'élagage synaptique permet notamment de limiter les synapses redondantes et/ou inutiles dans le réseau neuronal (voir fig. 20).

Plus le réseau est efficace, efficient et entraîné et plus le nombre d'unités qui le composent se réduira. Attention cependant, les neurones non utilisés ne meurent pas, ils restent mobilisables et sont souvent déjà mobilisés pour d'autres fonctions dans d'autres réseaux. En effet, l'appartenance d'un neurone à un réseau neuronal n'est pas exclusive.

Les neurones peuvent participer à plusieurs réseaux neuronaux en même temps. Cette prouesse, comme on peut le comprendre, tend tout de même vers une certaine limite. À savoir : plus les neurones seront intégrés dans des réseaux du fait de l'accumulation des apprentissages associés, plus ils seront difficilement mobilisables pour intégrer d'autres réseaux. Ce point explique, en partie, que les jeunes enfants aient plus de facilité à coder de nouveaux apprentissages que les adultes : les adultes ont déjà fortement engagé leurs neurones dans de nombreux réseaux supportant déjà nombre d'acquis.

Comme nous pouvons aisément le comprendre, les processus de renforcement de réseaux et d'élagage de synapses sont à la base *de toute mémoire et donc de tout apprentissage*.

Zoom sur L'optimisation de la lecture

Les conséquences de la recherche d'optimisation énergétique par le cerveau au travers des renforcements de réseaux neuronaux et de l'élagage synaptique sont compréhensibles. Prenons l'exemple de l'activité de lecture que l'on comparerait entre un adulte et un enfant. L'activité de lecture étant sur-apprise chez l'adulte, le coût énergétique associé sera toujours plus faible que chez un enfant qui ne maîtrise pas encore toutes les stratégies nécessaires. Les réseaux neuronaux de l'enfant ne sont pas encore optimisés. Ainsi, lorsque l'adulte aura fini de lire le texte et de le comprendre, l'enfant en sera encore à buter sur des mots qu'il rencontre pour la première fois et qui ne sont pas encore encodés dans des réseaux neuronaux dédiés.

L'élagage synaptique peut être représenté comme un processus darwinien de sélection synaptique et neuronale. La survie de la synapse ou du neurone ne vaut que si, à l'échelle du réseau, la synapse ou le neurone porte la fonction de la manière la plus efficace et la plus économe possible.

Ce processus d'élagage explique qu'une lésion au niveau cérébral sera toujours plus grave chez un adulte que chez un enfant. En effet, un adulte a déjà élagué de manière continue, régulière et efficace l'ensemble de ses réseaux neuronaux. Ne restent que les synapses les plus efficaces et non redondantes. Altérer ces réseaux neuronaux ultraspecialisés et non redondants aura donc des conséquences potentiellement majeures.

Plus nous avançons en âge et plus notre cerveau est efficace et optimisé. En revanche, plus nous avançons en âge et plus nos capacités d'adaptation et de plasticité diminuent. Pour le dire autrement, dans un cerveau, il est impossible d'avoir à la fois le beurre et l'argent du beurre...

Le langage dans la peau ou la cognition incarnée

Reprenons ici l'exemple du langage abordé précédemment. Nous avons vu que les réseaux cérébraux du langage associent (notamment) l'activation de l'aire de Broca et de l'aire de Wernicke. Ainsi, le réseau cérébral associé à la lecture d'un mot, quel qu'il soit, activera *a minima* l'aire de Broca et l'aire de Wernicke. Mais ces régions sont-elles les seules à s'activer ? Une recherche s'est intéressée à l'activation du cerveau lorsque l'on donnait à lire aux sujets des verbes d'action. Ces verbes d'action pouvaient être associés aux jambes, aux bras ou au visage (voir fig. 21).

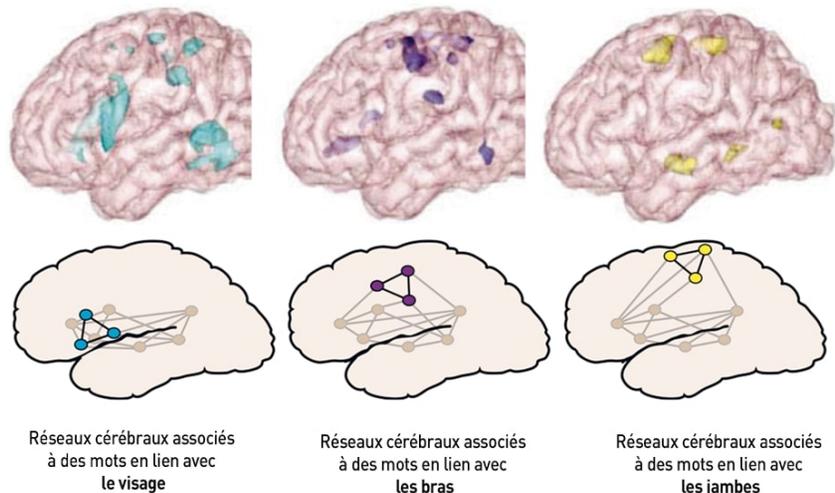


Figure 21 : Réseaux langagiers associés à des verbes d'action (d'après Garagnani et al., 2016)

Qu'en est-il ressorti ? Lorsque l'on vous dit, par exemple, le mot *courir* (verbe d'action associé aux jambes), à l'écoute du mot votre cerveau activera Broca, Wernicke et la région cérébrale motrice associée à vos *jambes* ! Si l'on vous dit par exemple *faire des pompes*, vous allez activer Broca, Wernicke et la région motrice cérébrale associées à vos bras ! Si l'on vous dit, *faire la bise*, vous activerez Broca, Wernicke et la région motrice cérébrale associée à votre visage !

Que devons-nous en comprendre ?

Cette étude est exceptionnelle en cela qu'elle nous autorise à lever un voile sur une partie fascinante du fonctionnement cérébral concernant nos capacités langagières. En effet, un langage n'est pas une simple suite de mots. Un langage est *corporalisé*. Cette corporalisation est nommée *cognition incarnée* (*embodied cognition* en anglais). Nous sommes notre langage, nous le vivons corporellement.

Mais attention, car si cela est vrai pour notre langue maternelle, cela ne l'est plus forcément pour une langue étrangère. Si l'on vous dit « *to run* » (qui signifie « courir » en anglais), à moins que vous ne soyez bilingue de naissance, vous n'activerez normalement pas vos régions cérébrales motrices associées à vos jambes... Cette langue étrangère n'est pas corporalisée. Ce qui signifie que les réseaux neuronaux qui la portent sont *différents* de ceux de votre langue maternelle.

Un point important : un mot est porté par un réseau cérébral qui est bien plus vaste que Broca, Wernicke ou des régions motrices. Il peut associer des composantes émotionnelles, mnésiques, conceptuelles, etc. C'est l'exemple d'un mot comme « enfant » ou « maman ». Ce qu'il est important de comprendre, c'est que notre langage implique un passé d'informations motrices, sensorielles, mnésiques, émotionnelles, etc. D'une façon ou d'une autre, *nous avons vécu et nous vivons notre langage*.

Neuromythe

Il existe un âge limite pour apprendre à parler

FAUX. L'acquisition du langage est fortement compromise après l'âge de 7 ou 8 ans. Cependant, il n'existe pas à proprement parler d'âge limite, car le développement cérébral suit un continuum. C'est pour cela que l'on parle plutôt de *période critique*.

En s'attachant à suivre la forte corporalisation du langage en termes moteurs par exemple, nous pouvons comprendre aisément deux choses :

- Une des spécificités de la langue maternelle repose sur le fait qu'elle est vécue corporellement depuis le plus jeune âge. Cette période infantile durant laquelle expérimenter sa fonction

motrice des membres inférieurs sera concomitante de l'apprentissage de leur dénomination (le mot « courir » intégrera dans le réseau neuronal les régions cérébrales motrices associées aux jambes). Ces deux types d'apprentissage (langagier et moteur) doivent s'opérer dans la même temporalité pour que cette corporalisation puisse se faire. On peut ainsi comprendre que, s'il est sollicité précocement, un même réseau cérébral pourra ainsi porter une, à plusieurs langues en même temps et les correspondances, traductions, de l'une à l'autre pourront se faire plus facilement et à moindre coût énergétique.

- Plus on dépasse l'âge de la corporalisation du langage, plus le cerveau devra créer de nouveaux réseaux cérébraux (différents de ceux de sa langue maternelle) pour porter la langue étrangère. Cette création de nouveaux réseaux a un fort coût énergétique. Cela explique les grandes difficultés que nous pouvons ressentir lorsque nous devons apprendre des langues étrangères à l'âge adulte (ou même dès le collège...). Plus nous vieillissons, plus l'effort cérébral augmentera pour apprendre une nouvelle langue, et la fatigue occasionnée sera proportionnelle à l'effort engagé.

L'apprentissage d'une langue étrangère

Afin d'être prise en charge par le cerveau avec un moindre coût énergétique et en se basant sur les mêmes réseaux cérébraux qui supportent la langue maternelle, une langue étrangère doit être apprise le plus tôt possible, idéalement dans une temporalité proche de l'acquisition de la langue maternelle. Ainsi l'apprentissage d'une première langue étrangère devrait avoir lieu *bien avant* le collège.

Un jeune cerveau, lorsqu'il apprend à parler, est particulièrement focalisé sur la musicalité de la langue qu'il entend. Cette musicalité, également nommée *prosodie*, est de moins en moins repérée au fur et à mesure que le cerveau mature. Ceci explique que plus on attend pour apprendre une langue étrangère, plus on la parlera avec un fort accent.

Cependant, un enfant déjà bilingue à son entrée au collège aura énormément de facilité à apprendre une troisième, voire une quatrième langue étrangère, car son cerveau aura conservé une grande capacité à repérer les différences subtiles de musicalité entre les langues, socle de l'apprentissage de tout langage parlé.

Pour s'intégrer durablement et utiliser les mêmes réseaux cérébraux que la langue maternelle en diminuant le coût énergétique, il est donc

nécessaire d'apprendre une langue étrangère le plus tôt possible. Plus le temps passe, plus l'effort pour le cerveau augmentera. Le cerveau d'un adulte, qui souhaite apprendre coûte que coûte l'anglais ou le grec pour sa satisfaction personnelle, sera prêt à faire cet effort énergétique. Quid du collégien ?...

Neuromythe

Les garçons sont meilleurs que les filles pour les mathématiques et les sciences

FAUX. Rassurons-nous tout de suite, et ce constat préservera la paix des ménages (!) : cognitivement parlant les hommes et les femmes ont des performances identiques. Même si le développement de la structure cérébrale est en moyenne plus rapide de deux ans chez la femme (ce qui corrobore la précocité observée chez les filles par rapport aux garçons durant l'adolescence), il n'existe pas d'aptitude cognitive manquante ni chez l'un, ni chez l'autre. Pour résumer, tout le monde est équipé pour faire et comprendre les sciences. Cela étant dit, il reste une difficulté sociétale à surmonter, et pour s'en rendre compte, voici deux exemples.

Le premier est une expérience réalisée auprès de jeunes élèves. Le principe était de proposer à deux groupes de classes différents le *même exercice* mais avec un *intitulé différent*. Dans certaines classes, il s'appelait *exercice de géométrie* et, dans les autres, *exercice de dessin*. Lorsque l'exercice s'appelle *dessin*, les filles performant de manière équivalente aux garçons. Quand l'exercice se nomme *géométrie*, les performances des filles deviennent significativement inférieures ! Ainsi, les filles sont tellement (inconsciemment) persuadées que les sciences ne sont pas faites pour elles qu'elles en arrivent à contre-performer... L'auto-inhibition cérébrale est une réalité. Un cerveau peut se persuader lui-même qu'il n'est pas doué pour réaliser une tâche particulière. Et, à force d'entretenir ce schéma, il deviendra effectivement moins doué pour cette tâche (exemple : cela ne sert à rien que j'essaie, je suis nul en maths).

Le deuxième exemple est celui de Margaret Hamilton. Personnage majeur du programme spatial Apollo, elle devra cependant attendre près de cinquante ans pour que son travail soit reconnu. Pour la petite histoire, Margaret Hamilton, mathématicienne et programmeuse, était en charge du programme informatique de la mission Apollo qui allait permettre à un homme de poser le pied sur la Lune. Pour ce faire, elle inventa, notamment, la notion de priorisation des tâches dans un ordinateur. Au moment de l'alunissage, l'ordinateur, saturé par toutes les informations à traiter, bascula automatiquement dans ce système et priorisa l'alunissage devant tout le reste. Si un homme s'est posé sur la Lune ce jour de 1969 (et donc ne s'est pas crashé...), c'est parce qu'une femme l'y a aidé. Qui connaît cette histoire ? Qui la connaissait à l'époque ?

Combien de Margaret Hamilton et de Rosalind Franklin (co-découvreuse de la structure en double-hélice de l'ADN mais nobélisée *post mortem*) ont été injustement oubliées de nos livres d'histoire et n'ont donc pas pu servir de modèles aux nouvelles générations, conduisant à un biais sociétal majeur sur la place des femmes dans les sciences ? Nos sociétés incitent-elles de la même façon les garçons et les filles à faire des sciences ? N'est-il pas pourtant émouvant de penser que ce sont peut-être nos propres jeunes filles qui, dans quelques années, pourraient avoir élaboré le programme informatique permettant à l'humanité de poser pour la première fois le pied sur Mars ?

La plasticité cérébrale à l'œuvre

Des souris, des hommes et la perception du corps

Avant de nous intéresser au modèle humain, faisons une brève incursion chez l'animal pour aborder un exemple illustratif des capacités de plasticité cérébrale. Cet exemple prend pour objet les territoires cérébraux somesthésiques, c'est-à-dire ceux qui permettent la perception du corps. À l'instar des autres sens comme la vision ou l'ouïe, la somesthésie constitue une des voies d'entrées sensorielles nécessaires à l'animal pour son interaction avec son environnement.

Comme l'humain, la souris perçoit son corps dans l'espace grâce aux différents nerfs sensitifs qui la parcourent, au niveau de la peau, des muscles, des tendons, des os, des ligaments, etc. Elle perçoit également ce type d'informations sensorielles par l'intermédiaire de ses *vibrisses*, c'est-à-dire les longs poils présents sur le museau des souris – mais aussi sur celui des chats. À noter : il est fortement déconseillé de les leur couper car, que ce soit chez le chat ou la souris, ces vibrisses sont des organes sensoriels à part entière, d'une grande sensibilité, permettant à l'animal d'avoir des informations précises de l'évolution de son corps dans l'espace. Elles participent donc à la capacité de l'animal à se repérer, se déplacer et à interagir avec son environnement.

Au travers des nerfs sensoriels les reliant au cerveau, les vibrisses communiquent leurs informations aux régions somesthésiques primaires. Au niveau de ces régions cérébrales, il est possible d'observer une *somatotopie* parfaite, c'est-à-dire un respect exact, point par point, de la disposition des vibrisses sur le museau. Cette disposition est représentée topographiquement à l'identique dans le tissu cérébral. Chaque vibrisse a donc un territoire cérébral dédié dans les aires somesthésiques primaires. La représentation de ces territoires suit exactement leur topographie sur le museau de la souris.

Les territoires cérébraux associés à chacune des vibrisses ont pour rôle de récupérer les données sensorielles en provenance de celles-ci et d'en extraire un contenu informatif exploitable par le cerveau.

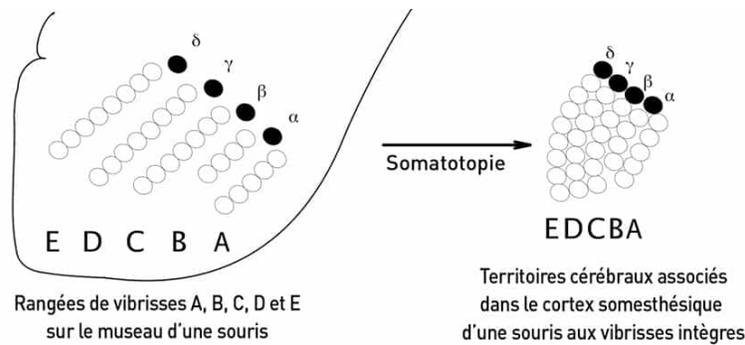


Figure 22 : Somatotopie des vibrisses d'une souris (Source M. Bonnet d'après Prochiantz et d'après Woolsey)

Sur le schéma, nous pouvons observer à gauche les territoires sensoriels de chaque vibrisse au niveau du museau et, à droite, les territoires cérébraux associés pour leur codage individuel. Est représentée schématiquement la somatotopie effective chez une souris adulte.

Chez une souris adulte, cinq rangées de vibrisses sont donc présentes sur le museau et sont nommées A, B, C, D et E. Les territoires cérébraux codant pour ces vibrisses apparaissent également sous forme de rangées.

Partant de cette connaissance de base, intéressons-nous désormais aux deux expériences qui ont été menées sur la rangée C de vibrisses de deux groupes de souris différents.

Dans l'expérience 1, les vibrisses du rang C des souris ont été coupées *à la naissance*.

Dans l'expérience 2, les vibrisses du rang C des souris ont été coupées *une semaine après la naissance*.

Qu'observons-nous alors ? (fig. 23)

Dans le premier groupe, les territoires cérébraux codant pour les informations sensorielles en provenance des vibrisses du rang C ne sont pas présents. Par contre les territoires cérébraux codant pour les rangs de vibrisses B et D sont plus grands que ceux observés chez une souris adulte aux vibrisses intègres, mais aussi plus grands que les territoires cérébraux des vibrisses des rangs A et E.

Dans le deuxième groupe, les territoires cérébraux sont en tous points identiques à ceux d'une souris adulte aux vibrisses intègres. Le territoire correspondant au rang C est également présent au niveau cérébral.

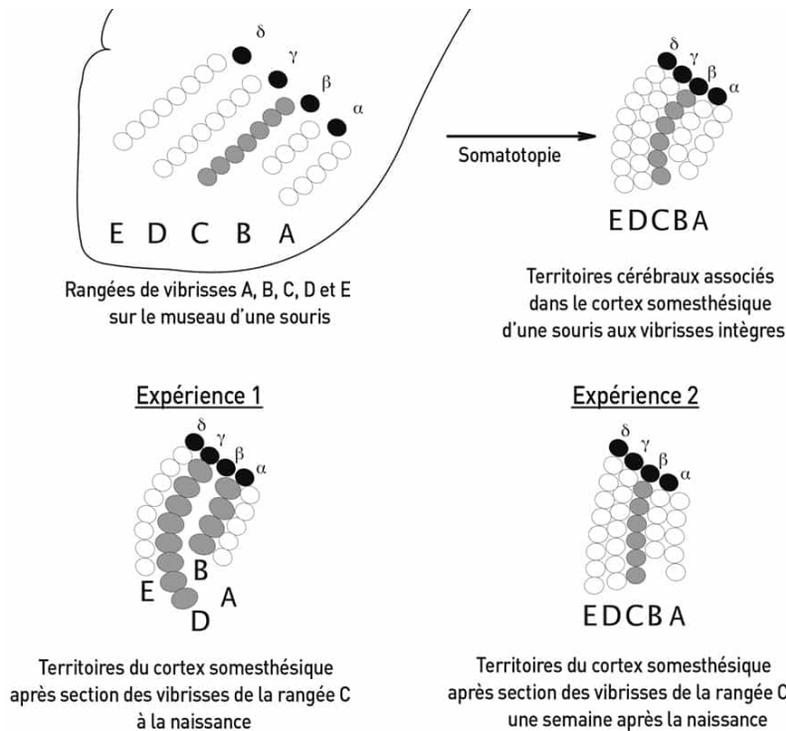


Figure 23 : Expériences de suppressions des vibrisses sur la plasticité corticale (Source M. Bonnet d'après Prochiantz et d'après Woolsey)

Que devons-nous en comprendre ?

Chez les souris qui ont perdu leurs vibrisses dès la naissance, il n'y a eu *aucune* information sensorielle qui soit parvenue depuis les vibrisses du rang C jusqu'aux territoires cérébraux associés. Du fait de l'absence-d'interaction entre ces vibrisses et le cerveau, celui-ci n'a donc pas alloué d'unités de traitement (neurones) pour coder les informations sensorielles en provenance des vibrisses du rang C.

Une première règle cérébrale émerge : si aucune information sensorielle ne parvient au cerveau, celui-ci n'alloue pas de territoire cérébral pour coder l'organe/la fonction.

Cependant, ces régions cérébrales ne sont pas abandonnées pour autant. En effet, on peut noter une augmentation importante des territoires cérébraux des rangs B et D adjacents au territoire

originellement dévolu pour le traitement des informations sensorielles en provenance des vibrisses du rang C. Ces territoires codant pour les vibrisses des rangs B et D recouvrent les territoires cérébraux normalement dévolus au codage du rang C. Ce constat démontre que les territoires du rang C ont été *captés* pour le codage des informations sensorielles en provenance des rangées B et D.

Une deuxième règle émerge : rien ne se perd, tout se transforme. Bien que les informations sensorielles en provenance du rang C soient manquantes, le territoire cérébral n'est pas perdu pour autant. Ces sont les vibrisses des rangs B et D qui en profitent. Ayant plus de territoires alloués pour coder leurs informations sensorielles, ces vibrisses deviennent donc plus *sensibles*... Même si, quantitativement, moins d'informations sensorielles parviennent au cerveau (rappelons-le les vibrisses du rang C sont coupées donc elles ne transmettent rien), qualitativement l'information sensorielle gagne sur certaines de ses dimensions (les vibrisses des rangs B et D ont une plus grande sensibilité).

Attention cependant à cette deuxième règle. Elle est d'autant moins vraie que le sujet vieillit (c'est en effet l'exemple de l'expérience 2 pour laquelle les vibrisses ont été sectionnées alors que l'animal était plus âgé et qu'il avait donc eu le temps de se servir de ces vibrisses et de leur allouer un territoire somesthésique dédié). Plus le cerveau sera impliqué dans différents apprentissages et dans divers types de codages, plus il lui sera difficile de réorienter ses territoires pour coder de nouvelles modalités (sensorielles par exemple) (voir encadré page suivante et encadré « La compensation : la plasticité cérébrale en pathologie », p. 72).

Zoom sur Les cécités et les membres fantômes

L'expérience présentée chez les souris nous permet de comprendre certains phénomènes présents chez les aveugles de naissance. Il est à noter que la vision est le sens le plus développé chez l'humain, le territoire cérébral codant les informations visuelles est le plus vaste de tous les territoires cérébraux sensoriels.

Chez l'aveugle de naissance, pour qui les rétines ne transmettent aucune information sensorielle, ce territoire cérébral peut être sollicité pour une partie du codage d'autres modalités sensorielles.

Comment le savons-nous ? Lorsque nous observons les aires cérébrales de sujets aveugles de naissance lors d'une tâche de lecture du braille avec leurs doigts, nous constatons que leurs *aires visuelles* s'activent... Quand un aveugle de naissance lit du braille, il *voit* du braille.

Cependant, de la même façon que dans notre exemple sur l'expérience 2 sur les vibrisses, ceci n'est plus le cas chez les aveugles qui ont perdu la vue tardivement. Une fois que le territoire a servi pour une fonction, son empreinte y reste. Il sera plus difficile pour le cerveau de le mobiliser pour une autre fonction/sensorialité.

Cela explique aussi la problématique des membres fantômes. Antérieurement à l'amputation, le membre avait déjà été codé en termes somesthésiques. Sa représentation en territoires cérébraux est effective. Lorsque l'amputation survient, le territoire cérébral représentant le membre, lui, ne disparaît pas. Le cerveau entre en conflit : ses autres entrées sensorielles (la vision par exemple) ne repèrent plus le membre alors qu'il continue d'exister et d'être encarté en termes somesthésiques dans le tissu cérébral. Ce conflit, dont on ne comprend pas encore tous les aspects cérébraux, peut se traduire chez certains patients par des douleurs extrêmement vives, parfois difficilement supportables.

Le cerveau est profondément adaptable aux informations qui lui parviennent. Il alloue du territoire pour coder ces informations en accord avec la densité/quantité de celles-ci. Rappelons que nous raisonnons dans cet exemple sur des territoires somesthésiques. Ces territoires cérébraux ont une cartographie robuste et sont en partie précâblés à la naissance. Il est ainsi plus facile de les suivre et de les étudier pour constater leur évolution éventuelle. Cependant, ce type d'expérimentations sera plus difficile à mettre en œuvre pour suivre l'évolution de réseaux cérébraux portant des fonctions plus distribuées et intégratives, par exemple les réseaux cérébraux supportant les fonctions cognitives. Mais, ainsi que nous le verrons dans d'autres exemples, ce n'est pas impossible.

POUR ALLER PLUS LOIN

La compensation : la plasticité cérébrale en pathologie

Si dans un contexte physiologique, les mécanismes d'adaptation et d'optimisation du cerveau prennent le nom de plasticité cérébrale, dans un contexte pathologique (maladies neurologiques par exemple), ces mécanismes sont nommés *phénomènes de compensation*.

Le phénomène de compensation représente l'adaptation fonctionnelle du cerveau dans le but de limiter, voire d'abolir, l'impact de l'atteinte d'une région cérébrale dans l'exécution de ses fonctions.

Les phénomènes de compensation, comme le recrutement de nouvelles régions cérébrales, représentent autant de stratégies mises en place par un cerveau lésé pour récupérer son niveau de performance prélésionnel.

Bien que pouvant nécessiter des aides thérapeutiques appropriées pour fortifier ses phénomènes de compensation (ergothérapie, par exemple), un cerveau lésé ne reste ainsi *jamais*, de lui-même, passif face à l'altération de sa structure.

Cet investissement majoré de l'organe cérébral pour la récupération de ses fonctions est, comme on peut le comprendre, extrêmement énergivore. En témoigne la fatigue parfaitement légitime et fréquemment exprimée par les patients.

Tout pour la musique

Observations chez l'adulte

Parlons désormais un peu de musique et plus particulièrement de pratique musicale. Nous allons suivre des violonistes et observer ce que la pratique du violon nous apprend de la plasticité de leur cerveau.

Une étude s'est attachée à suivre les activations cérébrales *somesthésiques* de deux groupes de violonistes. Les groupes distinguaient les individus selon la précocité de leur apprentissage du violon.

En s'intéressant plus particulièrement aux activations cérébrales en lien avec la perception (somesthésie) des doigts de la main gauche, les auteurs ont observé que les violonistes qui avaient appris à jouer du violon précocement (à gauche sur l'image) présentaient des territoires cérébraux codant pour le pouce et l'auriculaire gauches plus importants que les violonistes ayant appris plus tardivement (à droite sur l'image). Cette différence était particulièrement marquée concernant le territoire cérébral associé à l'auriculaire. En effet, il est à noter que, lorsque nous jouons du violon, le petit doigt de la main gauche est très sollicité et une sensibilité fine à son endroit est nécessaire pour exécuter nombre de morceaux.

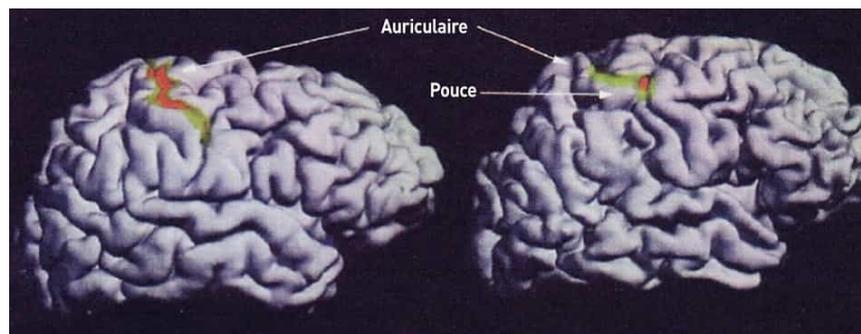


Figure 24 : Aires somesthésiques primaires différentielles selon la précocité de la pratique du violon (d'après T. Elbert, B. Rockstroh, 1996)

Qu'est-ce que cela signifie ?

Une pratique précoce de l'instrument de musique est responsable d'une

allocation de ressources cérébrales pour le codage des sensations somesthésiques associées à l'instrument. En d'autres termes, plus on apprend tôt le violon, plus le cerveau va allouer du territoire cérébral pour coder les interactions sensorielles avec l'instrument. Le fait le plus marquant est le territoire conséquent associé à l'auriculaire gauche. D'ordinaire, l'auriculaire est le doigt de la main présentant le territoire cérébral le plus restreint. Au contraire, chez les violonistes précoces, l'étendue de ce territoire devient démesurée jusqu'à devenir comparable à celle du territoire cérébral associé au pouce. Par ce territoire cérébral augmenté, le cerveau met à disposition plus d'unités de traitement pour coder l'instrument et sa pratique en termes sensoriels.

Faisant suite à ce que nous avons observé dans le cadre du langage, la pratique musicale est, elle-aussi, *corporalisable*.

Ainsi, l'interaction avec l'instrument trouve sa place au niveau du cerveau. L'organe cérébral devient différent consécutivement à sa pratique musicale. Rappelons-nous que dans cette expérience étaient étudiés des sujets adultes. Ces modifications cérébrales survenant chez l'enfant ou chez l'adolescent sont donc durables et observables chez l'enfant devenu adulte.

Compter sur ses doigts

Il a pu être mis en évidence que plus les enfants avaient appris à compter sur leurs doigts quand ils étaient jeunes, plus ils activaient, à l'âge adulte, les régions motrices de leurs mains lorsqu'ils faisaient des calculs mentaux. Et plus leurs performances mathématiques étaient élevées...

Apprendre à compter sur ses doigts lorsque l'on est jeune participe à la corporalisation de la numération et pourrait ainsi permettre de faciliter l'apprentissage ultérieur de concepts mathématiques plus complexes.

De façon très intéressante, l'étude montre que les différences cérébrales entre les sujets violonistes s'estompent lorsque l'âge du début de la pratique du violon se situe vers 13 ans. Cette information est particulièrement pertinente lorsque l'on sait que la maturation de l'architecture neuronale se finalise vers cet âge pour laisser progressivement la place à la myélinisation des fibres de connexion qui, elle, se terminera vers l'âge de 25-30 ans.

Cette observation d'une augmentation de territoires cérébraux codant pour des informations somesthésiques n'est pas sans rappeler ce qui a été observé pour les rangées de vibrisses B et D des souris. Les territoires cérébraux s'étalent d'autant plus qu'ils sont sollicités et qu'ils sont très jeunes. À tous points de vue, nos expériences *s'inscrivent* dans notre structure cérébrale. La fonction fait l'organe.

L'outil numérique, un prolongement de soi

À l'image du violon, plus le téléphone, la tablette ou tout autre outil numérique sera proposé tôt à l'enfant, plus il sera possible pour son cerveau de le coder en termes moteurs et sensoriels. Comme un instrument de musique, un outil numérique est donc également corporalisable.

Attention alors, car cette corporalisation possible de l'objet numérique rendra plus difficile le sevrage (amputation ?...) dudit objet, car celui-ci conservera une empreinte forte dans le paysage cérébral.

Observations chez l'enfant

Restons dans la musique et intéressons-nous désormais à une expérience réalisée chez des enfants. L'expérience en question souhaitait observer les effets de la pratique du piano sur leur cerveau.

L'étude se déclinait en deux protocoles différents :

- soit l'enfant suivait des leçons privées de piano une fois par semaine pendant plusieurs mois ;
- soit l'enfant intégrait un groupe d'autres enfants qui suivaient tous ensemble quarante minutes de classe de musique chaque semaine.

Au bout de plusieurs mois, une imagerie cérébrale a été proposée pour rechercher d'éventuelles différences associées à la pratique différentielle du piano. Il a ainsi pu être observé des modifications structurelles dans plusieurs régions cérébrales chez les enfants ayant suivi une pratique intensive du piano (premier groupe) mais pas chez les élèves avec une pratique musicale plus limitée (deuxième groupe). Les régions concernées étaient les aires motrices, le corps calleux et le cortex auditif primaire. Indépendamment de cette étude, ces régions cérébrales sont communément retrouvées fortement associées à la pratique musicale.

Ce qu'il est intéressant de comprendre ici c'est que plus la pratique d'un instrument est réalisée par un cerveau et plus des modifications structurelles *pérennes* s'observent dans les régions cérébrales associées à cette pratique. Pour prendre une analogie, la pratique musicale crée un « chemin » dans le cerveau qui est d'autant plus marqué que ce chemin a été emprunté. L'apprentissage de la pratique musicale crée une empreinte cérébrale. Un ou plusieurs réseaux cérébraux deviennent ainsi les supports de cet apprentissage. Au sein de ces réseaux, le cerveau a intégré de manière durable son interaction avec l'instrument et avec toutes ses composantes associées.

Tout apprentissage, quel qu'il soit, prendra la forme d'un tel chemin (un réseau renforcé). Plus celui-ci sera créé précocement, plus il sera individualisable de tous les autres, car il aura été *plus fréquemment* emprunté.

Le cerveau d'un musicien sera différent du cerveau d'un athlète lui-même différent du cerveau d'un mathématicien. Chaque cerveau est unique de son expérience d'apprentissage. La fréquence de passage sur chacun des chemins créés sera seule garante de la performance et de la pérennité de ceux-ci. Nous comprenons alors toute l'importance d'avoir commencé jeune certains des apprentissages qui vont nécessiter le plus de temps pour être intégrés et maîtrisés, tels que la pratique musicale ou la pratique sportive. La corporalisation présentée plus tôt est un de ces nombreux chemins mis en place, supports puissants de ces pratiques.

Zoom sur L'équation temporelle du prodige

Le talentueux humoriste Raymond Devos présenta ainsi le concept de prodige au détour de l'un de ses sketches :

« Savez-vous qu'un jeune prodige au piano, Mesdames et Messieurs, dès l'âge de 4 ans, il vous joue des choses superbes ! Moi, quand j'ai commencé à apprendre le piano, j'avais 65 ans. J'en ai 75, eh bien, Mesdames et Messieurs, avec dix ans de piano derrière moi, j'arrive à jouer comme un enfant de 4 ans... »

Dans cette citation, tout est remarquablement dit (et avec humour !). En premier lieu, que nous sommes tous capables d'apprendre tout au long de notre vie et même tardivement.

Cependant, un constat nous saute aux yeux à y regarder de plus près : les prodiges ou virtuoses ont cette particularité commune d'avoir tous commencé la pratique de leur instrument, ou de leur art, extrêmement jeunes. Que ce soient Wolfgang Amadeus Mozart, Anne-Sophie Mutter ou Steffi Graf, tous ont débuté vers l'âge de 4 ou 5 ans. Il est à noter que

c'est précisément à cet âge que l'enfant a le plus de possibilités de « corporaliser » ses apprentissages. Pour ces musiciens ou athlètes, cet âge correspond à une fenêtre temporelle privilégiée pendant laquelle leur cerveau a eu le plus de possibilités d'allouer du territoire cérébral pour coder non seulement l'instrument mais également son interaction avec lui. Jusqu'à en devenir une part d'eux-mêmes.

Attention néanmoins, pour devenir un prodige, il n'est pas seulement nécessaire de commencer jeune, il faut aussi aimer...

Et pour ceux qui commenceraient tard, à l'image de Raymond Devos et de ses soixante-cinq printemps, tout n'est pas perdu ! Pas de concerts au Carnegie Hall peut-être, mais après tout, était-ce le but ?...

La notion de fréquence doit raisonner dans notre esprit en écho avec la notion de répétitions. Répéter une information ou répéter une procédure, c'est engager le réseau neuronal dans une stabilisation et une optimisation de celui-ci : le chemin gagne en ampleur. Ainsi, *pour tout apprentissage*, la clé première est, et sera toujours, la *répétition*.

On peut apprendre à tout âge

La démonstration est faite que les apprentissages qui s'ancrent le plus dans la structure cérébrale seront ceux qui auront été vécus les plus précocement par l'organe. Est-ce pour autant perdu lorsque nous dépassons l'âge de la corporalisation ou l'âge de la maturation finale de notre cerveau, c'est-à-dire après la myélinisation de toutes les régions cérébrales ? Pouvons-nous encore démontrer que le cerveau est capable de modifier sa structure à l'âge adulte ? En d'autres termes, est-ce qu'un cerveau est encore capable d'évoluer même tardivement ?

Rassurons-nous de suite : la réponse est un oui ferme et massif (!).

Mais comment le savons-nous ?

Nous le savons, notamment, par le biais d'une expérience qui a fait grand bruit dans le monde des neurosciences, bouleversant nos certitudes, toujours avec l'apport fondamental de la technique d'imagerie cérébrale.

L'étude en question a suivi les capacités d'orientation spatiale de chauffeurs de taxi londoniens. À noter : ces travaux ont été réalisés dans une période antérieure à celle des GPS embarqués dans nos véhicules. En ce temps-là, aller du point A au point B reposait exclusivement sur notre GPS cérébral personnel : l'hippocampe, qui gère nos capacités

mnésiques mais aussi nos capacités de *localisation spatiale*.

Pourquoi étudier les chauffeurs de taxi londoniens ? La ville de Londres est, en termes de réseau routier, d'une complexité subtile ; seuls les chauffeurs de taxi étaient capables, sans GPS, de vous amener avec efficacité à votre destination.

Cette étude a pu mettre en évidence que plus les années de pratique en tant que chauffeur de taxi étaient importantes et plus il était observé des modifications structurelles majeures dans *l'hippocampe* des sujets. Notamment, une partie de l'hippocampe présentait une augmentation de son volume directement corrélée avec l'expérience du sujet en tant que chauffeur de taxi.

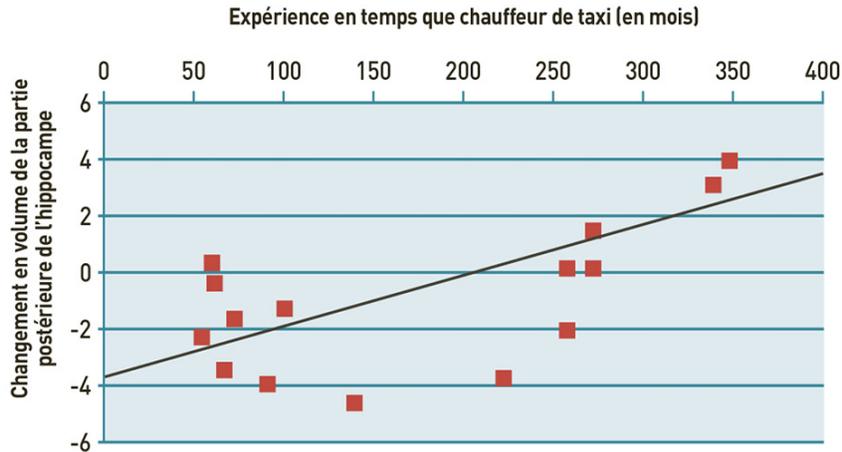


Figure 25 : Augmentation du volume hippocampique proportionnellement à l'expérience du sujet en tant que chauffeur de taxi. (d'après Maguire et al., 2000)

Neuromythe

Un cerveau n'évolue plus à l'âge adulte

FAUX. Une seule règle à retenir : un cerveau ne s'use que si on ne s'en sert pas. Donc, un cerveau s'enrichit automatiquement de son expérience d'activation quel que soit son âge. Un cerveau peut acquérir en permanence et durant toute sa vie de nouveaux savoirs. Si ces nouveaux savoirs peuvent être rapprochés de ceux déjà acquis par le cerveau, l'acquisition de ceux-ci en sera facilitée (exemple d'une troisième, d'une quatrième ou d'une dixième langue étrangère). Si ces nouveaux savoirs sont différents de ceux déjà acquis, leur apprentissage mettra d'autant plus de temps que le cerveau est âgé. En règle générale et en l'absence de toute pathologie, la seule limite restera l'effort que le cerveau choisira de concéder pour réaliser ce nouvel apprentissage.

Que devons-nous en comprendre ?

Plus la pratique de la localisation spatiale était fréquente, et donc répétée, et plus la structure hippocampique s'était développée en termes de volume.

Mais ce n'est pas tout. Nous sommes face à des sujets ayant appris le schéma urbain de la ville de Londres à *l'âge adulte*. Bien qu'exercée exclusivement à cet âge, la pratique intensive de la capacité de localisation spatiale a pu modifier profondément leur *structure cérébrale*.

Même si le cerveau possède des capacités de plasticité cérébrale particulièrement disponibles et puissantes pendant sa phase de développement, c'est-à-dire lorsqu'il est jeune, la fonction continue de faire l'organe à *tous les âges*.

Capable de changer, de s'adapter et de s'améliorer tout au long de sa vie, le cerveau est tout entier une puissance dynamique. Pierre angulaire de ses capacités, la plasticité cérébrale représente le support fondamental de tous les apprentissages.

Riche de son vécu, de ses interactions et de ses acquis, chaque cerveau devient progressivement un organe unique de son expérience de fonctionnement.

3 NOTIONS À RETENIR

- L'information, au niveau cérébral, n'est pas conservée dans un seul neurone mais dans un réseau entier.
- La fonction fait l'organe.
- La plasticité cérébrale représente la capacité du cerveau à s'adapter en permanence pour stocker des informations, développer des procédures, mettre en place des fonctions et acquérir des apprentissages.

2 - La mémoire : entre émotions et répétitions

Pourquoi ne mettons-nous pas notre main sur une flamme ? Pourquoi n'hésitons-nous pas quand on nous demande de nommer la capitale de la France ? Pourquoi nous rappelons-nous si précisément ce que nous faisons le 11 septembre 2001 mais pas le

10 septembre 2001 ?

La mémoire des savoirs, la mémoire des savoir-faire ou la mémoire autobiographique : quelle réalité ont-elles dans notre cerveau ? Comment les créons-nous ? Comment les récupérons-nous ?

Au début était l'émotion

Essayer de comprendre la mémoire humaine, c'est d'abord s'intéresser aux structures qui la portent. Les régions fortement associées à la mémoire sont en premier lieu les régions hippocampiques. L'hippocampe est une structure bilatérale que l'on retrouve nichée au creux des lobes temporaux médians (gauche et droit) du cerveau. L'hippocampe fait partie du système limbique.

L'amygdale (voir fig. 2, p. 17) est située juste en avant des hippocampes et fait également partie du système limbique (attention : l'amygdale cérébrale n'est pas celle que l'on trouve au fond de la gorge...). L'amygdale est, comme son nom l'indique étymologiquement, « en forme d'amande ». Structure bilatérale comme l'hippocampe, l'amygdale est la plaque tournante du circuit cérébral des émotions.

Remarquons à ce niveau une information essentielle : la région cérébrale codant pour la mémoire et celle codant pour les émotions sont immédiatement adjacentes dans le cerveau...

Voici notre première explication à nos souvenirs autobiographiques précis de la journée du 11 septembre 2001. Par cette proximité cérébrale, l'émotion facilite l'encodage des souvenirs. L'émotion permet la genèse *passive* d'un passé.

Attention au stress !

Si, à l'échelle cérébrale, un peu de stress est hypermnésiant (c'est-à-dire qu'il peut faciliter la mémoire), trop de stress devient, au contraire, amnésiant. En effet, lors d'événements émotionnellement choquants (traumatismes émotionnels), les sujets peuvent entrer en état dit de *sidération* au cours duquel l'encodage mnésique par les hippocampes est contrarié par l'emballement des structures émotionnelles adjacentes. Les sujets peuvent alors souffrir d'une amnésie associée à l'événement.

Même sans atteindre le choc émotionnel, un stress important et/ou chronique peut déjà suffire à réduire les capacités mnésiques.

Aussi, il conviendrait d'essayer de limiter la survenue chronique et/ou importante de facteurs stressants pendant les apprentissages.

Qu'est-ce qu'un passé ? Avoir un passé, c'est tout d'abord avoir eu des expériences, bonnes ou mauvaises, qui vont pouvoir conditionner des réponses dans notre présent à des situations qui présenteraient des similitudes avec celles que nous aurions déjà rencontrées.

L'avantage évolutif d'avoir un passé se situe précisément à ce niveau : se souvenir, pour ne surtout pas refaire les mêmes erreurs.

Zoom sur Une génétique du souvenir traumatique ?

Une étude a été menée chez des souris mâles. Les chercheurs ont présenté une odeur particulière aux souris. À chaque fois que cette odeur leur était présentée, celles-ci recevaient un choc électrique. C'est la base d'un conditionnement de peur apprise. Au bout d'un certain temps, le cerveau associe (corrèle) l'odeur avec le choc électrique (très déplaisant) et génère à la simple olfaction un comportement de *freezing* (attitude comportementale typique de peur chez le rongeur durant laquelle il ne bouge plus à l'exception de ses muscles respiratoires). Un souvenir de cette association entre les deux événements (odeur et choc électrique) se forme dans son cerveau et, à chaque fois que la souris sentira à nouveau cette odeur, elle fera un *freezing*. Quand ce comportement est acté et reproductible, le chercheur peut alors certifier que la souris a bien acquis ce souvenir traumatique.

Intéressons-nous désormais à la progéniture de ces souris mâles... Que se passe-t-il si on leur fait sentir cette odeur typique ? Les bébés souris font un *freezing* ! Aucun doute possible, le souvenir a été codé génétiquement, les gamètes (ici les spermatozoïdes) ont été modifiés à l'âge adulte, transmis aux descendants qui, sans jamais avoir été mis en contact ni avec cette odeur, ni avec les chocs électriques (et encore moins aux deux à la fois), ont généré une réponse comportementale de peur.

Ce qui a menacé la survie d'un organisme adulte doit être évité par son descendant, c'est compréhensible et c'est finalement la base de la théorie de l'évolution. Mais sous quelle forme l'odeur a-t-elle été codée dans l'ADN et comment peut-elle générer une réponse comportementale ? Ce tour de force est d'autant plus impressionnant que, à l'échelle du traitement olfactif, il n'y a pas un neurone pour une odeur mais une constellation d'activations neuronales pour chaque odeur (et des parties de ces constellations d'activation neuronale sont même communes à d'autres odeurs). Cette étude nous prouve que notre code génétique peut évoluer et devenir de notre vivant un vecteur puissant de nos mémoires émotionnelles à destination de nos descendants.

Répéter et agir pour se souvenir

S'il suffit parfois d'avoir des émotions pour avoir des souvenirs, ce

n'est, cependant, pas toujours le cas. Une grande partie de nos souvenirs est dissociée de nos émotions. Nous souvenons-nous de notre contexte émotionnel le jour où nous avons appris que Paris était la capitale de la France ? Non... Car si les émotions permettent la genèse passive d'un passé, la *répétition active* permet souvent seule la conservation en mémoire des savoirs et des savoir-faire.

Il est possible de distinguer deux grands groupes de mémoires indépendantes de nos émotions : la mémoire *verbale* (dite déclarative) et la mémoire *non verbale* (sensorielle et procédurale).

La mémoire verbale

La mémoire verbale ou déclarative concerne, comme son nom l'indique, des souvenirs que l'on peut formaliser avec des mots. Il existe deux types de mémoire déclarative : la mémoire *sémantique* et la mémoire *épisodique*.

La mémoire *sémantique* représente typiquement la *mémoire de nos savoirs*, comme savoir que « Paris est la capitale de la France ». Pour stocker ces savoirs sur le long terme, la mémoire sémantique a besoin de *plusieurs répétitions actives*.

La mémoire *épisodique* correspond à la mémoire des *épisodes* de notre vie, par exemple ce que nous avons fait ce matin ou le week-end dernier. À noter que la mémoire épisodique concerne des événements successifs de notre vie qui n'ont donc, par définition, été *vécus qu'une seule fois*. La mémoire épisodique est donc beaucoup plus *fragile* que la mémoire sémantique. Ceci explique parfois la dissonance entre les témoignages de différentes personnes lors d'une déposition à la police. Les souvenirs vécus une seule fois ne sont pas aussi solides que des savoirs répétés plusieurs fois.

La mémoire non verbale

Il existe trois types de mémoire non verbale : procédurale, sensorielle et perceptive.

La mémoire procédurale est associée à des procédures (c'est-à-dire des *savoir-faire*), par exemple savoir faire du vélo ou bien savoir

lacer ses chaussures. Contrairement à la mémoire déclarative, elle ne peut pas se formaliser avec des mots. En effet, tentez l'expérience d'expliquer à un enfant comment lacer ses chaussures en utilisant seulement des mots et aucun geste... La mémoire procédurale est très robuste au niveau cérébral. Cela s'explique par la *répétition intense et régulière de l'action motrice et des retours sensoriels associés*.

La mémoire sensorielle représente une mémoire à très court terme, inconsciente et d'une grande labilité². Elle concerne les informations en provenance des organes des sens. Elle permet de conserver en mémoire, pendant quelques dizaines de millisecondes à quelques secondes, des signaux visuels, auditifs, olfactifs, gustatifs et somesthésiques. Elle est en partie support de nos capacités de mémoire de travail.

La mémoire perceptive est différente de la mémoire sensorielle en cela qu'elle conserve sur un temps très long (parfois toute la vie) des informations sensorielles sous une forme plus « conceptuelle » : par exemple l'odeur typique d'une madeleine.

La mémoire de travail

À toutes ces mémoires, rajoutons-en une centrale par laquelle tous nos savoirs vont transiter : *la mémoire de travail*.

La mémoire de travail est, comme son nom l'indique, un petit espace de travail créé par le cerveau pour lui donner la possibilité de traiter et de manipuler des informations les unes avec les autres. Prenons un exemple : vous présentez une leçon à vos élèves ou à votre enfant. Vous devez garder en mémoire : ce que vous avez dit, ce que vous voulez dire, ce que vous vouliez dire, la question que vient juste de vous poser l'enfant et à laquelle vous répondrez un peu plus tard, le but de la leçon, les pièges éventuels à lui signaler... Toutes ces informations doivent être présentes ensemble dans votre esprit, *au même moment*. Si tel n'était pas le cas, vous perdriez rapidement le fil de votre discussion ainsi que l'attention de l'élève... Rappelez-vous à ce stade que le cerveau de l'élève doit suivre la même contrainte, à savoir conserver lui aussi toutes ces informations en mémoire, avec un risque encore plus accru de

saturation.

En effet, comme on peut le comprendre aisément, la mémoire de travail est saturable. Il est estimé que nous pouvons conserver en mémoire de travail en moyenne 7 items (+/- 2). Pour vous convaincre que la mémoire de travail est saturable, essayez de retenir non pas un mais deux numéros de téléphone différents en même temps, sans les noter... La mémoire de travail concerne une conservation en mémoire sur du très court terme, quand, à l'inverse, la mémoire sémantique, par exemple, concerne une conservation en mémoire sur du long terme : dans cinquante ans, vous vous souviendrez toujours que Paris est la capitale de la France, mais vous souviendrez-vous encore de ces deux numéros de téléphone ?

Catégoriser pour se rappeler

Vous remarquerez qu'un numéro de téléphone ne se retient pas en énonçant chaque chiffre indépendamment : 0 3 1 4 1 5 9 2 6 5. Mais en créant des groupes de deux pour faire des nombres : 03 14 15 92 65.

En effet, si chaque chiffre devait être retenu indépendamment, notre mémoire de travail aurait à retenir 10 items en même temps, ce qui dépasse ses capacités. La meilleure stratégie est donc de rassembler les items de manière pertinente (en faisant des nombres) afin de les réduire. En les groupant ainsi, le nombre d'items à retenir passe de 10 à 5, ce qui évite la saturation de notre mémoire de travail.

La stratégie pour améliorer nos capacités de mémoire de travail (et par extension, nos capacités d'encodage et de rappel) est donc de toujours réduire le nombre d'items à manipuler en essayant de les associer de manière pertinente par groupe et/ou par catégorie.

Catégoriser, c'est donner un sens commun à des informations qui paraissent indépendantes.

À noter : dans l'exemple présenté, les plus mathématiciens d'entre nous auront trouvé une stratégie potentiellement encore plus efficace : ils se seront rendus compte que le numéro de téléphone en question était le nombre ρ ... (!)

Il est important de savoir que la mémoire de travail est très *labile*. Si une personne vous interpelle alors que vous essayez vainement de retenir ces numéros de téléphone sans les noter, vous les oublierez immédiatement. Retenons également que la mémoire de travail est une fonction fortement portée par les régions préfrontales, notamment par une partie du réseau cérébral impliqué dans les procédures attentionnelles...

La mémoire de travail constitue notre « espace mnésique de travail ». Un espace à la fois coûteux et saturable. De cet espace sera conservé ce qui est pertinent et sera perdu ce qui ne l'est pas. La mémoire de travail représente notre passerelle privilégiée vers la genèse *active* de nos souvenirs.

Lutter contre l'oubli

La mémoire sémantique, mémoire des savoirs, et la mémoire procédurale, mémoire des savoir-faire, ont une composante en commun : la *répétition*. Tout savoir qui se fixe au niveau cérébral doit avoir été plusieurs fois répété, car le cerveau a une capacité innée majeure contre laquelle tout apprenant doit lutter : sa capacité à oublier...

Pour un cerveau, se souvenir correspond à la mise en place de réseaux de neurones qui vont fonctionner ensemble et conserver, par leur activation concertée, l'information jugée pertinente (voir « La plasticité cérébrale : une puissance dynamique », p. 87). De ce qui a été abordé sur l'activation neuronale (voir « Le signal nerveux : un langage à part », p. 69), nous comprendrons aisément que conserver des informations en mémoire a un fort coût énergétique.

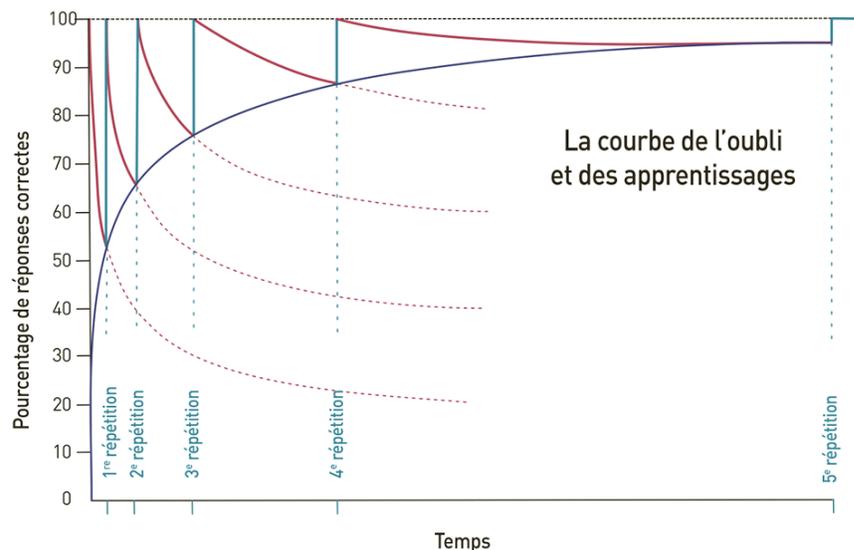


Figure 26 : La courbe de l'oubli (Source : M. Bonnet d'après H. Ebbinghaus, 1885)

Pour que le cerveau consente à faire ce choix énergétique, il est

nécessaire que l'information soit jugée pertinente à conserver. Pour qu'une information soit jugée pertinente à conserver, il est nécessaire qu'elle revienne plusieurs fois afin d'activer à plusieurs reprises le même réseau cérébral. D'où la répétition (voir fig. 26). Toute mémorisation est un combat contre l'oubli. Ce combat se gagne par la répétition de l'information. Ebbinghaus a ainsi proposé, au travers de sa courbe de l'oubli, que toute information soit répétée au moins cinq fois de manière de plus en plus espacée dans le temps avant d'avoir une probabilité de rappel de cette information qui dépasse les 90 %. Ceci signifie :

- qu'il faut répéter toute information plusieurs fois afin de consolider le réseau cérébral qui la porte ;
- qu'il est contre-productif de grouper cinq répétitions sur un temps très court. L'augmentation du nombre de répétitions doit être associée à l'augmentation de l'espacement temporel entre celles-ci afin de réactiver régulièrement et sur le long terme le réseau qui porte cette information.

Mais l'oubli n'est pas une composante délétère du système : l'oubli a des effets protecteurs au niveau cérébral, notamment dans la gestion des expériences émotionnelles négatives. L'oubli peut également permettre de faire le tri entre les informations utiles et celles qui ne le sont pas : ces numéros de téléphone, même si répétés un grand nombre de fois, vous sont-ils vraiment utiles... ?

Pour comprendre la mémoire, il est nécessaire de comprendre que le cerveau génère des souvenirs en les vivant, en les élaguant et en les réorganisant. Oscillant toujours entre rappel et oubli, la réorganisation des traces mnésiques (les réseaux neuronaux) conduit à un passé dynamique où les informations les plus solides et les plus pérennes seront celles qui auront été les plus répétées ou celles ayant la plus forte connotation émotionnelle. Notre cerveau est le fruit de son propre passé.

L'hippocampe à la source des souvenirs

L'hippocampe est la région centrale nécessaire à toute mémorisation. En plus de *l'encodage*, l'hippocampe est également nécessaire à la *récupération* de nos souvenirs. Son rôle dans cette

récupération est, cependant, conditionné à l'ancienneté du souvenir encodé.

Tout souvenir qui se crée est d'abord inféodé à l'hippocampe. En effet, si vous essayez de vous souvenir de vos dernières vacances au ski, par exemple, vous allez vous rappeler d'éléments visuels (l'image de la montagne se découpant sur un ciel bleu), auditifs (le bruit des touristes), émotionnels (votre plaisir d'être là), somesthésiques (le froid mordant), etc. Chaque partie de ce souvenir a d'abord été traitée et intégrée par les différentes régions cérébrales associées (occipitales, temporales, limbiques et somesthésiques respectivement). Mais pour récupérer ce souvenir associant tout ou partie de ses composantes, la mobilisation de l'hippocampe est obligatoire. Pour prendre une analogie technologique, l'hippocampe est un système qui connaît le répertoire téléphonique de toutes les régions cérébrales impliquées au moment de l'événement. Il est une sorte de centrale d'appel qui, lorsque le sujet tente de récupérer le souvenir de l'événement, va contacter les régions impliquées à ce moment précis. Le souvenir peut alors émerger.

C'est ainsi que fonctionne la mémoire humaine mais seulement dans les huit à dix ans après la formation du souvenir. Après cette période, l'hippocampe n'est plus nécessaire à la récupération du souvenir. Les régions cérébrales ont, en effet, formé par elles-mêmes des voies de communication entre elles. Le souvenir s'est libéré de l'hippocampe. Si l'hippocampe est lésé, le souvenir reste donc récupérable. Par contre il est perdu, en partie ou en totalité, si cette lésion s'effectue dans la période critique des huit à dix ans après la formation du souvenir. C'est ce que l'on observe chez les patients Alzheimer chez qui l'hippocampe est altéré très précocement dans le décours de la maladie. Ce sont alors les plus vieux souvenirs des patients (ceux de leur enfance, par exemple) qui resteront préservés le plus longtemps, donc les souvenirs qui ne dépendent plus de l'hippocampe.

**Zoom sur
La mémoire du futur**

La « mémoire du futur » est une expression qui peut paraître antinomique mais qui a paradoxalement du sens. En effet, il a été découvert que, lorsque l'on demandait à un sujet de se rappeler de son propre passé (mémoire autobiographique) ou bien de se projeter dans un futur possible, il activait quasiment les mêmes régions cérébrales (hippocampe, cortex préfrontal, cortex cingulaire postérieur et précunéus) !

La question se pose donc : la mémoire serait-elle notre véhicule personnel pour voyager dans notre passé mais également dans tous nos futurs possibles ?

Cela ferait sens car, pour s'imaginer dans le futur et toutes les situations qu'il peut comporter, il peut être utile d'avoir déjà vécu des situations comparables dans notre passé. Se projeter, c'est non seulement avoir déjà vécu mais aussi se souvenir d'avoir vécu...

Tout le pouvoir de notre mémoire est là : au travers de notre passé, nous aider à envisager le meilleur des futurs possibles...

L'hippocampe est la plaque tournante de nos capacités mnésiques. Seule structure cérébrale possédant une forte capacité de neurogénèse (capacité à fabriquer de nouveaux neurones), l'hippocampe est nécessaire pour notre mémoire à court terme, pour l'encodage et pour la récupération de nos souvenirs.

Cependant, l'hippocampe n'est pas la seule structure dont dépendent nos capacités mnésiques. Les régions corticales impliquées au moment de la formation du souvenir ou bien le cortex préfrontal sont des régions cérébrales également fortement associées à l'encodage de nos vécus et de nos acquis. Citons par ailleurs les noyaux gris centraux, régions cérébrales responsables de nos capacités de mémoire procédurale.

Avoir pris l'exemple de vos dernières vacances permet d'aborder le concept de souvenir de manière « macroscopique ». En effet, il est nécessaire de raisonner à l'échelle « au-dessus ». Le souvenir, ou tout simplement toute connaissance, peut se représenter comme une image d'activation d'un réseau cérébral, plus que comme une modification à l'échelle du neurone lui-même. Dans cette vision, le neurone seul n'est rien, c'est le tout qui prime. Comme si le neurone était une note. Le neurone est bien responsable du son, mais il n'est finalement pas responsable de la musique du morceau. Ainsi, toutes nos connaissances ou tous nos souvenirs stockés en mémoire deviennent des partitions interprétables à tout moment par le cerveau qui les porte.

À noter que ces partitions peuvent évoluer dans le temps. En effet, les savoirs portés par un cerveau évoluent en accord avec l'organe lui-même. Ceci peut conduire à des pertes d'informations sur le long terme, voire à l'émergence de *faux souvenirs*. Le cerveau n'est pas un ordinateur, c'est une structure vivante potentiellement faillible dans ses rappels mais profondément dynamique dans ses apprentissages.

La mémoire prend de l'âge

Du fait de l'immaturation de ses hippocampes dans les premières années de vie et de ses capacités langagières et conceptuelles limitées, l'être humain présente une *amnésie infantile*, c'est-à-dire une difficulté à récupérer ses souvenirs d'avant l'âge de 3 ans.

De même, au cours du vieillissement normal, si la mémoire procédurale et la mémoire de travail sont toujours bien préservées, des altérations mineures peuvent malgré tout venir affecter la mémoire sémantique et la mémoire épisodique. Cependant, la mémoire sémantique est généralement totalement récupérable lorsqu'elle est aidée en rappel (« Mais si rappelle-toi, c'est une ville dont le nom commence par B »). La mémoire épisodique est celle dont se plaignent le plus les sujets âgés (« Je ne me rappelle plus du nom de famille des voisins de mon fils »). Ceci s'explique, ainsi que précédemment écrit, par la fragilité constitutive de la mémoire épisodique.

Avoir une plainte mnésique au-delà de 60 ans n'est donc pas forcément le reflet d'une problématique pathologique mais le plus souvent l'expression de l'optimisation du système mnésique : un élagage continu et sur le long terme des informations stockées en mémoire.

La mémoire se travaille, car les réseaux de neurones doivent entretenir leurs activités pour préserver l'information qui y transite. Pour conserver nos connaissances, il est donc impératif de les répéter.

En allant plus loin, il est également important de prendre la pleine mesure du déclaratif dans la stabilisation de nos savoirs : mettre des mots (nos mots) sur des souvenirs ou des

connaissances permet de les ancrer plus efficacement dans notre mémoire (ce qui fait profondément défaut aux enfants de moins de 3 ans et explique donc, en partie, leur période d'amnésie infantile).

Ne pas sous-estimer par ailleurs le lien entre la compréhension et la capacité de rappel : c'est parce que nous avons compris ce qu'était une « capitale » que nous pouvons plus facilement nous souvenir que « Paris est la capitale de la France ».

Une mémoire se vit. Vivre nos apprentissages au travers de nos différentes modalités sensorielles, motrices et de verbalisation est la clé vers une optimisation de leur stabilisation et de leur récupération.

3 NOTIONS À RETENIR

- L'hippocampe est le support d'une grande partie de nos capacités mnésiques.
- Mémoriser, c'est lutter contre l'oubli grâce à la répétition.
- Nos capacités mnésiques reposent profondément sur nos capacités de plasticité cérébrale.

3 - Le sommeil : qui dort apprend

Nous passons un tiers de notre vie à dormir. À 75 ans, nous aurons ainsi passé 25 ans endormis...

Cependant, dormir est aussi important que se nourrir ou respirer. En effet, la privation de sommeil peut avoir des conséquences dramatiques sur l'équilibre physiologique de l'organisme. Certaines espèces animales (au contraire de l'être humain) peuvent même mourir de ne pas pouvoir dormir.

En plus de son importance majeure à l'échelle du corps entier, le sommeil constitue également la *dernière étape fondamentale de tout apprentissage*.

Dormir n'est donc pas du temps perdu. Pendant notre sommeil notre cerveau travaille encore, dans notre intérêt.

Le train du sommeil

Au sein de la population générale, même si une nuit de sommeil

dure en moyenne huit heures, chaque individu est unique quant à son besoin effectif de sommeil. Cependant, que l'on soit petit ou gros dormeur, un seul critère de durée de sommeil idéale prévaut : se sentir en forme dans la journée.

Pendant la nuit, différentes phases vont se succéder, formant des *cycles* qui durent environ une heure trente chacun. Ceux-ci peuvent être représentés sous la forme d'un train : le *train du sommeil* (voir fig. 27).

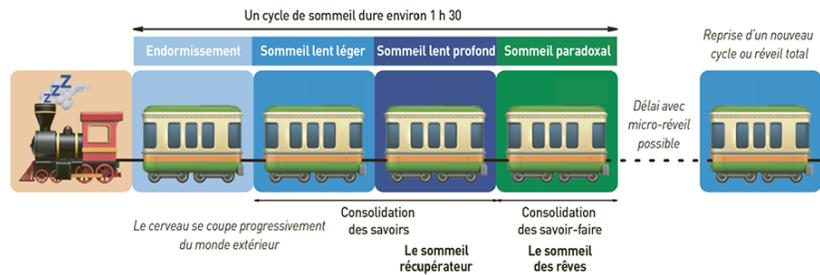


Figure 27 : Le train du sommeil (Source : M. Bonnet)

Durant un cycle, les différentes phases qui se succèdent sont l'endormissement, le sommeil léger, le sommeil profond et le sommeil paradoxal. Examinons-les plus en détail.

La première phase est *l'endormissement*. Elle dure quelques minutes, puis est rapidement suivie par la phase de *sommeil lent léger*. Pendant la phase de sommeil lent léger, les sons entendus deviennent ininterprétables. Les conversations ne peuvent plus être comprises (voir encadré Neuromythe, p. <AU>).

Au fur et à mesure que le temps passe, le cerveau s'enfonce progressivement vers un état où il se coupe totalement du monde extérieur. C'est la phase de *sommeil lent profond*. Aussi appelé *sommeil récupérateur*, le sommeil lent profond est plus fréquent en début de nuit. Lorsqu'une personne a atteint cette phase de sommeil, il est particulièrement difficile de la réveiller, contrairement à la phase de sommeil lent léger.

Faisant suite au sommeil lent profond advient la phase de *sommeil paradoxal*, où les rêves sont majoritairement exprimés. Cette phase

de sommeil devient de plus en plus fréquente au fur et à mesure que la nuit avance, jusqu'à en représenter la plus grande partie juste avant le réveil.

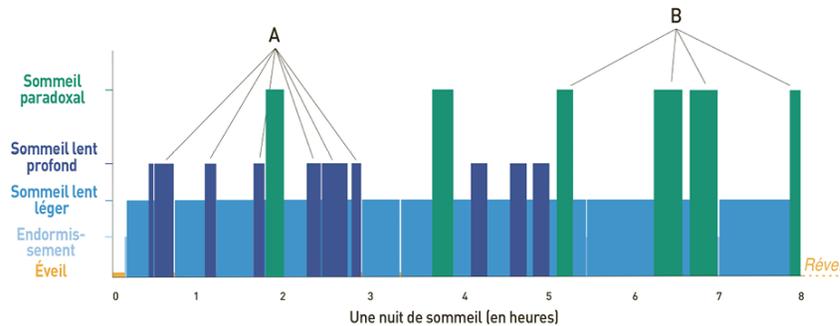


Figure 28 : Exemple d'une nuit de sommeil chez un adulte (Source : M. Bonnet)

A : Les phases de sommeil lent profond (= sommeil récupérateur) sont plus fréquentes en début de nuit.

B : Les phases de sommeil paradoxal sont plus fréquentes en fin de nuit.

Neuromythe

Écouter une leçon pendant son sommeil permet de l'apprendre

FAUX. Lorsqu'il est dit que le cerveau apprend en dormant, cela signifie que, pendant ses différentes phases de sommeil, il répète ses apprentissages (savoirs ou savoir-faire). Il répète donc pendant la nuit ses acquis réalisés pendant la journée. Ce faisant il consolide les réseaux neuronaux qui portent ces nouveaux acquis. Mais le cerveau ne fait pas de miracle : si aucun acquis n'a été réalisé de jour, le cerveau ne répétera rien de nuit...

Donc, si un élève pense qu'il est profitable d'écouter pendant son sommeil sa leçon non apprise de jour, il est possible de l'en dissuader pour deux raisons :

- le sommeil ne génère pas de nouveaux réseaux neuronaux porteurs de connaissances, il renforce ceux qui ont été nouvellement créés de jour pour porter ces nouvelles connaissances. Ces réseaux étant encore très fragiles, le but du sommeil sera de les consolider ;
- au bout de seulement une dizaine de minutes de sommeil, le cerveau entre dans sa phase de sommeil lent léger pendant laquelle il ne comprend plus ce qu'il entend. Incapable de décrypter la sémantique du contenu entendu, il ne pourra donc rien en retenir.

Tout apprentissage se fait de jour. La consolidation de ces apprentissages se fait de nuit. Sans MP3...

Après la phase de sommeil paradoxal, le cerveau peut

éventuellement marquer une pause (micro-éveil ou réveil total) ou prendre un nouveau train de sommeil, c'est-à-dire débiter un nouveau cycle.

En moyenne, une nuit est ainsi constituée de 4 à 6 cycles de sommeil (voir encadré page suivante).

De combien d'heures de sommeil un enfant a-t-il besoin ?

Bien que les besoins en sommeil puissent varier d'un adulte à un autre, ces besoins sont généralement plus uniformes chez les enfants et les adolescents. En effet, l'enfant est en perpétuel apprentissage, son sommeil est donc nécessaire pour consolider toutes les nouvelles connaissances qu'il acquiert chaque jour.

Ainsi, il est recommandé jusqu'à 9 ans de dormir au moins douze heures par nuit.

De 9 à 13 ans, la durée recommandée est d'au moins dix heures par nuit (pour un lever à 7 h, l'heure du coucher devra donc être à 21 h).

Chez l'adolescent entre 14 et 18 ans, il faudra compter entre huit et neuf heures de sommeil (pour un lever à 6 h 30, l'heure du coucher devra donc être à 22 h ou 22 h 30 maximum).

Attention cependant, lorsque l'on parle de huit heures de sommeil, il est entendu *huit heures endormi* et pas *huit heures passé au lit*. La différence peut être importante.

Par ailleurs, c'est pendant la nuit que l'hormone de croissance est secrétée et que le système immunitaire se renforce. C'est donc le sommeil qui permet à un corps de grandir et d'avoir plus de défenses immunitaires.

Le sommeil permet à l'organisme entier de se reposer même si, comme nous allons le voir, ce n'est pas tout à fait le cas pour le cerveau.

Le sommeil paradoxal pour consolider nos savoir-faire

L'activité électrique du cerveau pendant le sommeil paradoxal ressemble fortement à celle d'un cerveau éveillé. En effet, les ondes cérébrales enregistrées par un électroencéphalogramme y sont rapides et irrégulières. Cependant, comparativement à l'état d'éveil, le sommeil paradoxal présente une différence de taille : le corps est paralysé sous l'action de certaines structures primitives du système nerveux qui provoquent une perte du tonus musculaire. « Un cerveau vivant dans un corps mort » : c'est ce paradoxe qui est à

l'origine du nom donné à cette phase du sommeil.

Pendant le sommeil paradoxal, et contrairement à l'état de veille, il est à noter une irrégularité importante et physiologique du rythme cardiaque. Pour l'organisme aussi, dormir n'est pas forcément de tout repos.

Dans cette phase de sommeil, le cerveau répète ses procédures motrices, c'est-à-dire ses savoir-faire, par exemple son service au tennis appris pendant la journée. La paralysie associée au sommeil paradoxal présente ici un certain intérêt : éviter de répéter réellement son service au tennis dans son lit... Le cerveau peut ainsi répéter ses apprentissages moteurs sans engendrer de conséquences motrices effectives.

À noter : c'est également pendant la phase de sommeil paradoxal que nous gérons nos expériences émotionnelles de la journée. Le cerveau, organe d'une extrême sensibilité, a besoin de dormir pour pouvoir gérer les situations émotionnellement difficiles et y apporter des solutions. C'est le fameux adage : « La nuit porte conseil. »

Le sommeil lent (léger et profond) pour consolider nos savoirs

Pendant le sommeil lent, le corps n'est pas paralysé, mais l'activité électrique du cerveau s'éloigne drastiquement de celle d'un cerveau éveillé. « Un cerveau mort dans un corps vivant », telle est la description qui pourrait en être faite.

Les ondes cérébrales enregistrées pendant cette phase de sommeil sont très amples et très lentes, d'où le nom de cette phase. Par ces ondes lentes, les régions cérébrales se synchronisent. Certaines régions augmentent en activité comme le thalamus (considéré comme un *pacemaker* du sommeil lent) ainsi que les régions associées à la mémorisation (régions hippocampiques, parahippocampiques et le cortex préfrontal médian). Le sommeil lent permettrait ainsi des transferts d'informations, apprises dans la journée, depuis l'hippocampe vers les structures corticales pour leur stockage à long terme.

Pendant le sommeil lent, le rythme cardiaque devient lent et régulier. Comme le cerveau, c'est à ce stade que l'organisme se repose le plus.

Au cours du sommeil lent profond, le cerveau atteint progressivement son plus bas niveau énergétique. Pendant cette phase, le cerveau se débarrasse également de ses déchets de fonctionnement. Du fait du coût de fonctionnement minimal du cerveau pendant cette phase, le sommeil lent profond est aussi nommé *sommeil récupérateur* (voir encadré ci-dessous).

Pas de nuit hachée

Interrompre le stade du sommeil lent profond (par la réception d'un sms ou d'une notification...) oblige le cerveau à repasser par les stades qui le précèdent (environ trois ou quatre heures) avant de l'atteindre de nouveau.

Des bouts de nuit ne font pas une nuit. Un cycle, ou un train doit être pris en entier, les wagons ne sont pas interchangeables.

Il est important pour un cerveau, notamment celui d'un enfant en plein développement, d'avoir des nuits les plus continues possibles. La consolidation de nos apprentissages a un prix, celui d'une nuit pleine et entière, *sans coupures*.

Il est également à noter qu'il ne suffit pas de dormir plus longtemps le week-end pour compenser le manque de sommeil de la semaine. En effet, le sommeil sert à consolider les acquis de la journée. Tenter de récupérer du sommeil en retard le week-end ne sera donc jamais autant profitable pour les apprentissages qu'un bon sommeil la nuit suivant ceux-ci.

Une cohérence temporelle doit exister pour optimiser la consolidation de tout apprentissage.

24 heures chrono

Toutes les fonctions biologiques de l'organisme suivent un rythme très précis d'environ 24 heures. Ce rythme qui correspond à une journée est ainsi appelé *rythme circadien* (de *circa* : « proche », et *diem* : « jour »).

Le rythme circadien est géré par des sous-structures de l'hypothalamus : les noyaux suprachiasmatiques. Parce qu'il est celui qui génère le rythme circadien, l'hypothalamus est notamment considéré comme l'horloge interne de l'organisme.

Au cours des 24 heures qui constituent ce rythme circadien, le

sommeil vient logiquement s'y insérer. En effet, dès la fin de la journée, une hormone, la *mélatonine*, est sécrétée au niveau cérébral et permet le passage progressif de la veille vers le sommeil.

Le sommeil face aux écrans

La luminosité ambiante et plus particulièrement la lumière bleue (celle des écrans d'ordinateur ou de téléphone) est capable de retarder la sécrétion de mélatonine au niveau cérébral et donc d'entraîner un retard à l'endormissement. Aussi, il conviendrait d'éviter de visionner des écrans d'ordinateur et de téléphone au moins une heure avant d'aller se coucher.

Le rythme circadien est endogène à l'organisme, c'est-à-dire qu'il est généré par celui-ci. Cependant, certains facteurs exogènes (c'est-à-dire extérieurs à l'organisme) peuvent venir le perturber, notamment sur sa composante associée au sommeil (voir encadré ci-dessus).

Quand le sommeil vient à manquer

Le sommeil a plusieurs fonctions majeures, c'est pourquoi sa privation peut avoir de grandes conséquences sur l'organisme.

En premier lieu, le sommeil est l'étape finale de la consolidation de tout apprentissage. Altérer cette étape, c'est altérer l'apprentissage lui-même. Un cerveau qui n'a pas bien dormi apprendra plus difficilement. Il sera aussi plus fatigué, sa vigilance, ses capacités d'attention et de mémorisation diminueront, il ne consentira pas à faire un nouvel effort énergétique, il deviendra plus irritable. C'est le début de grandes difficultés à la fois pédagogiques et éventuellement familiales.

Il est particulièrement important d'être attentif aux carences en sommeil. Un cerveau qui n'a pas assez dormi n'est pas prêt pour de nouveaux apprentissages, il cumule une dette de plus en plus grande. Plus un cerveau a une dette de sommeil, plus il prend du retard dans la consolidation de ses acquis, plus ceux-ci seront friables et plus il faudra les recommencer. Or, un apprentissage a un coût énergétique. Un coût énergétique qu'un cerveau fatigué ne consentira pas à faire.

Une dette en sommeil s'exprime notamment par des somnolences fréquentes et inhabituelles en journée. La présence de ces somnolences est à surveiller de très près chez le jeune, car elles doivent alerter sur un déficit plus ou moins chronique en sommeil.

Le manque de sommeil peut avoir beaucoup d'autres effets. Certains processus attendent le moment du sommeil, du repos intégral, du moindre coût énergétique, pour pouvoir s'exprimer. C'est en particulier le cas du système immunitaire mais également de la sécrétion de l'hormone de croissance. Avoir un bon sommeil permet donc notamment au système immunitaire de se renforcer.

Penchons-nous maintenant sur les troubles métaboliques. Il est à savoir que pendant une grande partie de la nuit le corps utilise, pour fonctionner, ses réserves de *glycogène*. Le glycogène est un glucide qui associe plusieurs molécules de glucose. Principalement stocké dans le foie et dans les muscles, le glycogène constitue ainsi un stock d'énergie rapidement mobilisable.

Alimentation, activité physique et sommeil

Un enfant et un adolescent sont en plein développement et leurs besoins énergétiques sont proportionnels. Cependant, si l'alimentation doit répondre à un besoin, elle doit également être la plus raisonnée possible. Par exemple, sachant qu'un organisme stocke plus facilement ses ressources énergétiques en fin de journée, le dîner a tout à gagner à être un peu plus léger que le petit déjeuner ou le déjeuner.

Rappelons-nous en outre les bienfaits des exercices physiques sur le métabolisme général. Cependant, ces exercices sont à réaliser préférentiellement à distance de l'heure du coucher pour éviter tout éternement, agitation et/ou retards à l'endormissement.

Cependant, après plusieurs heures de sommeil, l'organisme commence à prélever de l'énergie dans une autre source : les acides gras. Stockés dans les cellules graisseuses, ils représentent des ressources à très haut niveau énergétique. Cela signifie que c'est en approchant du matin que le corps commence à maigrir. Il peut alors être aisé de comprendre que plus le sommeil sera raccourci (ou des consommations de nourriture, tardives, par exemple, juste avant d'aller se coucher ou pendant la nuit), moins l'organisme consommera ses acides gras et moins il maigrira. Avoir

un sommeil plein permet à l'organisme de réguler ses stocks métaboliques. Ainsi, avoir un sommeil plein et continu – même s'il ne prévient pas du risque d'obésité (car celui-ci est multifactoriel) – peut cependant avoir un certain pouvoir protecteur.

Le sommeil est une part essentielle de notre vie. Il nous permet de nous reposer, mais pas seulement. C'est une période critique au niveau cérébral où le temps devient utilisable pour répéter, consolider et sélectionner les informations apprises dans la journée.

Nous vivons nos apprentissages de jour, mais nous revivons et consolidons ces apprentissages de nuit. Ce processus est d'autant plus vrai pour un cerveau jeune et en développement qui passe ses journées à apprendre.

3 NOTIONS À RETENIR

- Le sommeil est l'étape finale et indispensable à tous nos apprentissages.
- Le train du sommeil doit se prendre en entier (sans coupures) pour que toutes les phases puissent jouer leur rôle.
- Pendant le sommeil, le cerveau répète et consolide ses savoirs et ses savoir-faire.

4 - Qu'est-ce que l'attention ?

La définition de l'attention reste délicate, car les phénomènes impliqués sont multiples et parfois antagonistes.

Citons la définition de l'attention proposée à la fin du XIX^e siècle par William James³, psychologue et philosophe américain :

« Tout le monde sait ce qu'est l'attention. C'est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vivante, d'un objet ou d'un train de pensée parmi plusieurs possibles. Son essence est la focalisation, la concentration de la conscience. Elle implique le retrait de certaines choses pour mieux traiter d'autres choses. »

Dans cette définition, particulièrement détaillée, nous entrevoyons toute la complexité du mécanisme attentionnel. En effet, un concept qui nécessite cinq lignes de texte pour être défini nous démontre la difficulté de le cerner dans son essence. Franchissons-nous le pas vers l'hypothèse que cette définition englobe des fonctions bien plus

larges que l'attention elle-même ? L'attention n'est-elle qu'un raccourci cognitif pour se représenter un ensemble de systèmes et de fonctions intimement entrelacés que nous ne savons ni nommer ni isoler efficacement du reste du paysage cérébral ?

Notre difficulté à définir l'attention était déjà effective en 1890, année de la citation présentée, elle l'est encore actuellement. L'attention reste une anguille conceptuelle que personne n'arrive à saisir totalement. L'avons-nous réellement bien isolée, dans ses composantes, dans sa description, dans son terme ?

Une chose est sûre, cependant : l'intégrité de la fonction attentionnelle est un *prérequis* à tout processus cognitif complexe, notamment à *toutes les formes d'apprentissage*. Si l'attention devient défaillante, à tous ses niveaux fonctionnels, les conséquences observées peuvent aller du trouble de l'apprentissage au ralentissement pur et simple de toute activité cognitive (diminution de la vitesse de traitement de l'information).

L'attention : le tout dirigé vers un but

Beaucoup de théories ont été proposées sur l'attention depuis des décennies. La question majeure au centre de toutes ces théories était de savoir si le cerveau était en capacité de traiter, dans la même temporalité et de façon équivalente, toutes les informations qui lui parvenaient.

Un cerveau traite une quantité astronomique de contenus informatifs à chaque seconde. Pour la grande majorité d'entre eux, nous n'en avons pas un aperçu conscient. En effet, connaissons-nous à cet instant précis notre volume sanguin, l'activité de nos glandes surrénales ou la bonne oxygénation de nos neurones ? Certainement pas. L'ensemble de ces informations émergent éventuellement (et indirectement) dans notre sphère consciente à condition que leurs valeurs s'éloignent significativement de la fourchette des valeurs physiologiques, nous obligeant alors à la mise en place d'éventuels comportements correcteurs. Par exemple, si notre volume sanguin diminue, un circuit réflexe impliquant l'hypothalamus et les reins, notamment, permettra de développer, consécutivement à une cascade de réactions, une sensation de soif.

Celle-ci, que nous pourrions consciemment ressentir, s'allouera nos ressources attentionnelles pour diriger notre regard et/ou nos comportements vers une source d'eau dans notre environnement direct. L'entrée hydrique (le verre d'eau que nous aurons bu) permettra alors au volume sanguin de retrouver sa valeur physiologique de référence.

Ce qui est intéressant à comprendre, c'est qu'une grande partie des informations arrivant au cerveau ne nécessite pas de focus attentionnel particulier pour être prises en charge. Cependant, elles *pourraient* le nécessiter.

Prenons un autre exemple, celui de la perception de notre corps. L'ensemble des informations somesthésiques en provenance de votre pied droit – son inclinaison, sa pression éventuelle sur le sol (ou son absence de pression) et sa torsion – parvient en continu à votre cerveau. Cependant, ces informations ne vous ont sans doute pas effleuré une seule seconde pendant la lecture de cet ouvrage. Par contre, s'il vous était demandé de vous concentrer sur votre pied droit, vous seriez capable de le faire immédiatement. Votre focus attentionnel peut s'exercer *à la demande* et *sur n'importe quelle cible*, qu'elle soit *interne* ou *externe*. De même, si jamais vous ne ressentiez plus votre pied droit (par exemple parce que vous vous êtes pincé un nerf), voilà que votre attention bascule automatiquement vers l'organe mutique afin de comprendre pourquoi plus aucune information n'est reçue. On remarque que, dans cet exemple, *l'absence d'information* représente elle aussi une information à part entière susceptible de capturer le focus attentionnel.

Mais, alors que vous vous concentriez sur votre pied droit, avez-vous pu vous concentrer de manière équivalente et en même temps sur votre avant-bras gauche ?... Probablement pas. Et toute la difficulté de la compréhension de l'attention réside dans cet exemple : l'attention semble *dirigeable à l'infini* mais *limitée dans son essence*. L'attention est comme un *projecteur* qui n'éclaire *qu'une cible à la fois*.

.....
Neuromythe
.....

Nous pouvons être attentif à plusieurs choses à la fois

FAUX. Nous pouvons parfois avoir l'impression que le cerveau traite en parallèle l'ensemble des informations qui lui parviennent et qu'il lui est donc possible d'être attentif à plusieurs choses à la fois. C'est l'illusion de l'attention *partagée*. Cette sensation ne se vérifie que dans une seule condition : lorsqu'au moins une des deux tâches réalisées au même moment par le cerveau est *automatisée* (par exemple : conduire et discuter ; marcher et écrire un texto).

Dans le cas d'une absence d'automatisation, le système attentionnel devra basculer régulièrement, et plus ou moins rapidement, d'une tâche à l'autre.

En effet, le système attentionnel doit se comprendre comme un système exclusif. Seul ce qui est sous le projecteur pourra être traité par le cerveau dans sa globalité. Lorsque le projecteur n'est pas dirigé, le traitement attentionnel sera lacunaire (exemple : « écouter d'une oreille distraite »).

Par contre, *automatiser* une tâche autorise le système attentionnel à n'être qu'un simple *superviseur* de la bonne exécution de celle-ci en ne positionnant le projecteur qu'à des moments clés de la tâche (exemple du jongleur professionnel qui ne regarde les balles qu'à certains moments de son jonglage). L'automatisation permet de diminuer la fréquence de bascule attentionnelle entre la tâche à haut niveau de demande attentionnelle et la tâche automatisée. Cependant, elle ne l'annule pas... Le système reste en série, jamais en parallèle.

De plus, l'effet de l'automatisation peut être limité. Dans l'exemple du conducteur qui entretient une conversation avec son passager, si un événement inattendu survient sur la route (accident par exemple), il s'arrêtera de converser, car son système attentionnel sera alors totalement mobilisé par des demandes attentionnelles supplémentaires allouées à la tâche de conduite. La conversation passera à la trappe...

Un enfant n'étant encore automatisé sur aucune tâche, son système attentionnel ne lui permettra de traiter correctement qu'une seule chose à la fois, au choix : écouter le professeur, lire l'énoncé de l'exercice ou discuter avec son camarade...

Pour parfaire notre vision de la composante attentionnelle, un troisième exemple. Devant votre table de travail, vous êtes fortement concentré sur une tâche à réaliser. Vous êtes pleinement dirigé sur ce que vous avez à faire. Vous vous êtes créé une sphère mentale de travail qui semble vous entourer. Vous êtes, comme on dit, *dedans*. Ce n'est d'ailleurs pas tant que vous vous *sentez* concentré ou attentif, mais que vous le *soyez* effectivement. En effet, l'état attentionnel se vit plus qu'il ne se constate. C'est ce moment précis que choisit l'un de vos collègues pour vous solliciter afin d'obtenir le numéro de téléphone d'un tiers. Vous marquez un temps. Qu'a-t-il dit ? Le numéro de téléphone de qui ? Progressivement, vous sortez de votre état de concentration, vous trouvez le numéro en question que vous communiquez à votre

collègue et revenez à votre tâche. En fait, il est plus juste de dire que vous essayez d'y revenir. Car quelque chose s'est brisé dans le processus, une sorte de fil rouge qui vous connectait à la tâche. Un laps de temps plus ou moins long sera alors nécessaire pour récupérer cet état dans lequel vous vous trouviez et dont vous avez pris conscience *a posteriori*, après en être sorti.

Cet exemple parmi tant d'autres pour mettre en lumière que l'attention n'est pas simplement un *projecteur sur*, elle est également un *état dirigé vers*.

Cet état « *dirigé vers* » porte en lui une notion de *but*. Or, quand un cerveau est dirigé vers un but à atteindre, il se rassemble à l'échelle de toutes ses fonctions pour tenter de le réaliser. La notion de but implique donc une notion de *tout*. La fatigue que l'on peut ressentir après s'être fortement concentré sur un objet ou un train de pensée démontre indirectement que cet état attentionnel est non seulement l'expression d'un tout cérébral mais que celui-ci est prodigieusement gourmand en ressources. Ceci nous interpelle sur le nombre potentiellement important de régions cérébrales impliquées simultanément pour le porter.

De ces différents exemples, nous comprenons que le cerveau traite perpétuellement de nombreux événements et contenus informatifs qui lui arrivent au travers de toutes ses composantes sensorielles. Pour nombre d'entre eux, cette prise en charge ne nécessite pas l'émergence de comportements complexes, elle est gérable à l'échelle moléculaire ou cellulaire. Lorsque ces comportements nécessitent des réponses stratégiques et coordonnées à l'échelle de l'individu, *un seul but* émerge alors. Est-ce celui de se servir un verre d'eau, d'aller chercher une couverture pour se réchauffer, d'écouter les derniers résultats d'un championnat sportif ou de comprendre un exercice de mathématiques ? À différents degrés et selon le but identifié, le comportement nécessitera une mise en jeu variable des ressources attentionnelles.

Présenter la *notion de but* dans une procédure attentionnelle doit d'ores et déjà nous mettre la puce à l'oreille : une partie du réseau attentionnel implique effectivement et de façon majeure les régions

préfrontales... Nous y reviendrons plus loin.

Si un seul but émerge, cela signifie qu'une sélection s'est opérée. Quels mécanismes régissent l'allocation des ressources attentionnelles ? Comme l'a très justement énoncé William James, l'essence de l'attention est sa focalisation. Sur plusieurs objets ou trains de pensée possibles, le focus attentionnel en mettra un en valeur au détriment de tous les autres. L'attention est donc par définition un *choix cognitif*.

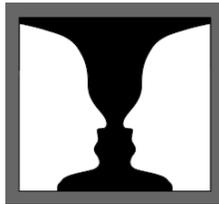


Figure 29 : Que voyez-vous ? Un vase ou deux visages ? Assurément pas les deux à la fois, le système attentionnel en est incapable.

L'attention, un choix coûteux

Pour comprendre les phénomènes attentionnels à l'échelle cérébrale, nombre d'études de recherche se sont proposées de suivre la performance attentionnelle d'individus pendant un examen de neuro-imagerie fonctionnelle.

Il a ainsi été découvert qu'une tâche attentionnelle impliquait une constellation d'aires cérébrales telles que les lobes frontaux et préfrontaux (particulièrement le cortex préfrontal dorso-latéral), le cortex pariétal postérieur, le cingulum antérieur et le cervelet.

Si l'on se réfère à l'anatomie cérébrale, on peut ainsi constater que l'attention recrute de nombreuses régions du cerveau en antérieur, en postérieur, en cortical et en sous-cortical. Au travers d'une imagerie cérébrale fonctionnelle, observer un cerveau qui s'active pendant une tâche attentionnelle, c'est toucher du doigt le concept du tout cérébral. L'état attentionnel est porté par un réseau cérébral puissant et robuste. Un réseau puissant, robuste et donc coûteux énergétiquement...

L'ordre des priorités pour un enfant

La mise en jeu des règles de priorisation requiert des capacités de planification, fonctions exécutives largement portées par les régions préfrontales. Celles-ci sont encore largement immatures chez l'enfant. C'est ce qui explique que celui-ci a de grandes difficultés à créer des ordres de priorité entre différentes tâches à réaliser.

Cette difficulté à envisager l'ordre des priorités est responsable d'une problématique typique : le conflit dans l'allocation des ressources attentionnelles. Sachant qu'il est impossible (particulièrement pour un enfant) d'être attentif à deux choses à la fois, sur quelle partie de l'information/tâche/étape présentée, l'élève doit-il d'abord se focaliser ? Quel doit être l'ordre de ses priorités attentionnelles ?

Pour l'aider dans la gestion des priorités, il peut être pédagogiquement avantageux de prendre du temps pour dissocier les différentes étapes soumises au focus attentionnel sériel de l'enfant : d'abord présenter au tableau, puis lire ensemble l'énoncé, puis vérifier le matériel dans la trousse, etc. En ménageant des plages spécifiques pour chacun des contenus informatifs concurrents, la cible du focus attentionnel s'individualise. La priorité attentionnelle de l'enfant suit alors l'ordre de priorités donné par l'enseignant.

Il est à noter qu'en accompagnant l'enfant dans le développement de ses capacités d'automatisation de procédures (lecture, calcul mental, etc.), il sera alors progressivement possible d'envisager de donner à l'enfant les rênes du choix de ses priorités attentionnelles mais également d'augmenter la charge cognitive de la tâche demandée.

Pour comprendre la problématique attentionnelle, il faut pouvoir garder à l'esprit que le cerveau, compte tenu de sa construction, de ses différents besoins et surtout de sa logique d'économie énergétique, n'est pas en mesure de diriger ce puissant et coûteux outil attentionnel vers plusieurs cibles en même temps.

De plus, l'état attentionnel étant un tout cérébral, la cible du focus attentionnel ne se rehausse que parce qu'elle est traitée à l'échelle globale. Par exemple, lorsque nous regardons l'image de la figure 29 (vase et visages), nous voyons soit deux visages, soit un seul vase. Mais attention, c'est soit l'un, soit l'autre. On peut avoir l'impression que les deux existent mentalement et se dire « *je vois les deux visages et en même temps je vois le vase* ». C'est pourtant impossible. Pourquoi ? Parce que ce n'est pas simplement l'image de deux visages ou l'image d'un vase, c'est *tout le sens que nous leur donnons*. Qui nous a prouvé que l'on regardait un vase ou deux visages ? À y regarder de plus près, ce ne sont pourtant que des contrastes de couleurs blancs et noirs. Mais le cerveau développe ses propres interprétations, car il essaie de donner du sens à absolument tout ce qu'il voit (même à la forme des nuages dans le

ciel !).

Pour cette image, c'est quand le sens est acquis que les problèmes commencent, car le sens est double. En effet, les deux sens que ces deux conceptions renferment sont profondément différents, que ce soit au niveau sémantique, au niveau des références mnésiques ou culturelles. Ces deux conceptions (visages ou vase) sont donc traitées de manière différente à l'échelle globale du cerveau. Lorsque l'on décide de voir les visages par exemple, le cerveau est déjà dans une optique de traitement de cette information à l'échelle du tout cérébral. Il s'attend à voir les visages et à les traiter comme tel avec tout ce que cela implique (Ressemblent-ils à des personnes que je connais ? Sont-ils tristes ou joyeux ? etc.). *Le sens* devient ici *la cible attendue* et *conditionne donc le choix visuel*. L'attention est un phénomène global à l'échelle cérébrale qui ne se concentre que sur une cible identifiée. Dans ce cas précis, le sens généré est capable de définir la cible et de l'isoler pour permettre son traitement attentionnel. C'est la volonté du cerveau dans le sens *attendu* qui provoque la sélection exclusive d'une représentation sur l'autre. Ainsi, soit on voit les deux visages, soit on voit le vase, mais jamais les deux à la fois.

Zoom sur Le choix des sens

L'action de voir n'implique pas qu'une perception sensorielle. Voir, c'est avoir vécu, se souvenir, catégoriser, se représenter, savoir nommer, anticiper... Pour comprendre ce que l'on voit, il faut avoir appris à discriminer. Voir, c'est choisir.

À l'échelle cognitive, le cerveau est dans l'obligation de faire des choix en permanence. Comme on peut le comprendre, ces choix se feront par rapport aux entrées mais également par rapport aux *attendus* (d'où la notion de but). Le système attentionnel doit sélectionner les informations à traiter en priorité, et ce, d'autant plus que les informations parvenant en permanence au cerveau sont très nombreuses ; si elles ne sont pas sélectionnées, elles risquent de surcharger le système.

Zoom sur

Attention et intelligence : même combat

Le concept d'intelligence continue d'être profondément débattu dans nos sociétés. Avons-nous les bonnes mesures ? Qu'est-ce que cela signifie *être intelligent* ? Beaucoup de tests de QI existent et sont fréquemment utilisés pour révéler, notamment, des enfants à *haut potentiel*. Ces tests de QI restent néanmoins des mesures imprécises, car ils ne révèlent qu'une partie de la capacité d'intelligence. À l'image de l'attention, la définition de l'intelligence est complexe. D'autant plus que, comme l'attention, l'intelligence se conçoit plus comme un état (*être intelligent, être attentif*) que comme une fonction. Une conception bien différente de la fonction mnésique, par exemple, pour laquelle nous pouvons effectivement dire que *nous mémorisons*. Intelligence et attention sont donc des concepts profondément englobants à l'échelle de la structure cérébrale.

La capacité d'intelligence pourrait être définie comme une capacité de mise en jeu subtile du tout cérébral pour tendre vers un seul but, celui de la *résolution d'un problème*. À l'image de l'attention, l'intelligence n'est pas circonscrite à une fonction spécifique, mais s'organise autour d'une association de fonctions coordonnées et stratégiquement dirigées vers un objectif précis.

La dimension de l'intelligence prend de l'ampleur lorsque l'on considère l'éventail des problèmes qu'un cerveau est amené à résoudre quotidiennement. Relationnels, mathématiques, existentiels, la variété est grande et les stratégies à appliquer tout aussi nombreuses. Du fait de la variété de contextes dans lesquels la capacité d'intelligence s'inscrit, devons-nous plus valoriser, par exemple, l'intelligence des nombres que « l'intelligence du cœur » (aptitude à résoudre d'éventuelles problématiques relationnelles) ? Être intelligent ne prend tout son sens que dans son adéquation avec le problème à résoudre. Pour preuve, l'amélioration progressive, au travers des décennies, des contextes dans lesquels sont réalisées les expérimentations animales ont mis en évidence une amélioration significative des performances cognitives des animaux testés (rongeurs notamment). Pas que les animaux soient devenus subitement plus intelligents (ils l'étaient déjà), mais parce qu'on leur pose mieux les questions qui permettent de le révéler.

Il est du rôle de l'attention de mettre en valeur la priorité du moment (par exemple, pour l'enfant, l'écoute du professeur sur celle de son camarade de classe).

Les limites intrinsèques du système attentionnel obligent le cerveau à sélectionner les informations les plus pertinentes afin de réduire la quantité de traitement à réaliser.

Comment ce choix est-il fait ?

La réduction des informations à traiter par le système peut être réalisée en les sélectionnant selon deux modes différents :

- en fonction du *stimulus*. Nous parlons d'attention *sélective* ;

- ou en fonction du *temps*. Nous parlons d'attention *soutenue*.

L'attention sélective : focalisation et inhibition

Pour sélectionner des informations dans son environnement, il faut pouvoir en même temps les rehausser mais également occulter celles considérées comme non pertinentes (les distracteurs). Ainsi, l'attention sélective doit se comprendre comme un phénomène *double*. Être attentif, c'est non seulement savoir *se focaliser sur* mais aussi savoir *inhiber* ce qui est en dehors de la zone de focalisation. Nous comprendrons ainsi que raisonner sur les capacités attentionnelles, c'est raisonner de manière conjointe sur les capacités d'*inhibition*. William James l'avait d'ailleurs parfaitement souligné dans son texte : « *L'attention implique le retrait de certaines choses pour mieux traiter d'autres choses.* »

La neuro-imagerie s'est également intéressée aux *capacités d'inhibition*. Sans surprise, le réseau cérébral de ces capacités recouvre largement les régions du réseau attentionnel. Ainsi, lobes frontaux, préfrontaux et surtout régions cingulaires antérieures sont fortement activés. Cette information nous permet de constater qu'attention et inhibition sont les deux faces d'un même problème. Il est donc *contre-productif* de raisonner sur l'une en excluant l'autre.

Les capacités d'attention et d'inhibition se travaillent

Quel que soit le stimulus extérieur qui entrera en compétition avec la cible actuelle du focus attentionnel, tout cerveau peut être en capacité de l'inhiber. Il est cependant à noter que l'inhibition (comme l'attention) étant profondément portée par les régions préfrontales qui sont encore immatures chez le jeune, l'enfant aura donc besoin d'être accompagné dans la mise en place et l'utilisation efficace de ces fonctions.

L'attention et l'inhibition sont des capacités en plein développement qui doivent se travailler. Savoir être attentif et savoir inhiber les distracteurs sont des capacités en devenir chez l'enfant. La maturation de ses régions préfrontales autorisera progressivement, et de plus en plus, de nouvelles performances qu'il conviendra de stimuler et d'entretenir activement.

Les déclencheurs de l'attention sélective

Deux formes d'attention sélective existent à l'échelle cérébrale : l'attention sélective *endogène* et l'attention sélective *exogène*.

L'attention sélective endogène

Elle représente la sélection des informations par *l'individu lui-même* (par exemple, l'élève choisit d'être attentif à la démonstration du professeur). C'est donc une attention *volontaire*.

Dans le cas d'une attention *sélective endogène*, le focus attentionnel peut se porter indifféremment :

- sur un *lieu* (être attentif à une partie de la pièce, au tableau, à la fenêtre) ;
- sur une *modalité sensorielle* (être plus attentif à ce que l'on entend qu'à ce que l'on voit ou inversement (exemple de l'enfant plus attentif aux commentaires de son camarade qu'à la démonstration du professeur au tableau) ;
- sur un *objet d'intérêt* (objet ou personne). L'attention peut même se porter sur un objet d'intérêt qui peut être absent du champ sensoriel (visuel ou auditif) (exemple du téléphone dans le cartable qui n'est pas visible mais sur lequel l'élève peut déjà diriger son attention, parce qu'il attend un message ou un appel).

L'attention sélective exogène

Dans le cas d'une attention sélective exogène, un stimulus *extérieur* conditionne la mise en jeu du système attentionnel de l'individu. Par exemple : une personne crie « Au feu ! », l'attention se porte alors vers elle automatiquement. Dans cette exemple, l'attention est particulièrement capturée par l'événement, car notre survie est potentiellement en jeu. L'attention sélective exogène est donc *involontaire*.

D'autres exemples de stimuli extérieurs redirecteurs du focus attentionnel peuvent être présentés comme : une règle qui tombe de la table, un oiseau qui vient se poser au bord de la fenêtre, le discours d'un camarade de classe ou encore la sonnerie qui marque la fin du cours. Dans ce dernier exemple, comme le cerveau est capable de connaître relativement précisément l'heure qu'il est – ne vous réveillez-vous pas certaines fois quelques minutes avant que votre réveil ne sonne ? –, il est donc possible pour l'élève d'anticiper inconsciemment la survenue du stimulus extérieur que représente la

sonnerie. Cette anticipation est susceptible d'altérer la capacité attentionnelle de l'enfant dans les quelques minutes qui précèdent ce signal. Pendant cet intervalle de temps, son esprit/attention n'est déjà plus là...

Le temps d'un cours

De l'entrée dans la classe jusqu'au moment de la sortie, pendant combien de temps l'attention de l'enfant est-elle effectivement présente et dirigée vers le pédagogue ? Même s'il est très difficile de répondre à cette question, car la réponse peut être très variable, reconnaissons que les moments charnières de début et de fin de cours participent à le réduire. En effet, l'amorce attentionnelle de l'enfant qui sort d'un cours de mathématiques pour rentrer dans un cours de français va prendre un certain temps. Il en est de même avec l'élève qui anticipe la fin du cours et donc sa libération (comme un adulte lors d'une réunion de travail). Ces moments charnières sont susceptibles de rogner de manière significative l'« *heure* » de cours. Aussi, il peut être pédagogiquement avantageux d'allonger le temps de cours à une heure trente. Ce faisant, le temps attentionnel effectif en continu sera plus long, entraînant le cerveau de l'enfant à se concentrer et à éviter les « papillonnages » attentionnels intempestifs.

Comme nous pouvons le voir, l'attention sélective d'un individu peut se projeter soit volontairement soit involontairement. Cependant, elle est sensible à trois paramètres majeurs : le *contexte*, la *nouveauté* et les *préférences* personnelles.

Zoom sur Le cocktail party effect

Dans sa démarche de sélection/choix des informations à traiter, le cerveau s'autorise à ne pas tout traiter de manière équivalente. Ce choix de traitement sériel explique pourquoi lors de deux conversations entendues en même temps, il nous est impossible de comprendre les deux à la fois.

Mais ceci se vérifie jusqu'à un certain point...

Prenons l'exemple d'une soirée entre amis. Lors de cette soirée, vous discutez avec une personne. Particulièrement concentré, vous inhibez ce qu'il y a autour de vous, notamment le bruit ambiant. Cependant, à un moment donné, dans ce brouhaha informe, quelqu'un prononce votre prénom. Instantanément et automatiquement, votre attention se détourne de votre interlocuteur pour partir en quête de la personne ou du groupe de personnes qui parle de vous. C'est ce que l'on nomme le *cocktail party effect*.

Ce constat révèle que, alors même que vous étiez investi et concentré dans une conversation, votre cerveau a pu analyser, en parallèle, une autre information cognitive (le traitement de votre prénom nécessite effectivement un traitement sémantique). Sommes-nous face à un paradoxe ? Un cerveau peut-il ou ne peut-il pas traiter deux informations cognitives en même temps ?

Réfléchissons-bien : ce prénom ne vous a-t-il pas été maintes et maintes fois répété ? Son traitement sémantique nécessite-t-il autant de ressources de traitement sémantique qu'un autre prénom ? Devons-nous, en plus, exclure de l'équation le fort contenu émotionnel associé ? (C'est quand même de vous que l'on parle.)

Cette démonstration ne va pas contre la notion de traitement exclusif lors d'un processus attentionnel. Cela nous démontre que notre prénom, de la même manière qu'une alarme, possède une grande valence informative fortement reconnaissable avec un traitement (et des ressources allouées) profondément réduit. Pour résumer, à l'échelle cérébrale, nous sommes tous automatisés sur l'écoute de notre prénom et son coût énergétique, en termes de traitement attentionnel, est devenu dérisoire.

Une attention sous conditions

La sensibilité au *contexte* sous-tend que certaines informations seront jugées plus pertinentes dans un contexte donné que dans un autre. Ainsi, leur valeur/pertinence à l'échelle du système attentionnel est susceptible de varier. Par exemple, le *devoir* sera priorisé dans la *salle de classe devant le professeur* mais ne le sera plus forcément *chez soi devant la télévision*. Le contexte peut ainsi conditionner certains choix attentionnels.

La *nouveauté* constitue un critère robuste concernant les choix cognitifs opérés par le système attentionnel. On observe déjà la pertinence de ce critère chez le nourrisson. En effet, à la présentation répétée d'un même objet, il est possible d'observer qu'un nourrisson va progressivement s'en désintéresser. Si, en revanche, il lui est visuellement proposé un *nouvel* objet (ou le même mais d'une couleur différente), le regard du bébé va alors se poser sur ce nouvel objet avec plus d'insistance.

Cela nous démontre non seulement que le cerveau d'un nourrisson est doué de *mémoire* (il a comparé les premières présentations, appris que c'était le même objet et s'en souvient), mais surtout qu'il est attiré par la nouveauté. En effet, cérébralement parlant, le fait qu'un stimulus soit nouveau augmente les chances d'acquérir un nouveau contenu informatif. Le cerveau compile, compare et corrèle des données, et il est toujours friand de nouveaux contenus informatifs. Plus ces contenus sont différents et nombreux, plus il est possible au cerveau d'en avoir une vision macroscopique. Dans sa volonté de comprendre son monde extérieur, le cerveau recherchera donc toujours de nouvelles informations à traiter.

Le système attentionnel est également très sensible aux *préférences* personnelles. Le choix attentionnel, en accord avec ces préférences, se constate facilement tous les jours. Un exemple parmi tant d'autres : vous êtes à une soirée et, dans la multiplication des interactions sociales entre les individus, vous pouvez vous retrouver au centre de deux discussions différentes. Entre ces deux discours proposés, vous constaterez que vous pouvez faire des choix attentionnels au regard de vos appétences *personnelles* (culture, sport, politique, individus, etc.).

La cible de notre focus attentionnel n'étant pas toujours clairement visible pour un spectateur extérieur, il est alors relativement aisé pour un cerveau de mimer une pseudo-attention vers une cible considérée comme rébarbative... Pouvoir masquer ses cibles attentionnelles constitue, en effet, un des privilèges embarqués de la fonction attentionnelle, et ce privilège est largement utilisé en société. Ce même privilège, parfois un peu moins bien maîtrisé, existe aussi chez l'enfant : un élève qui vous regarde peut-il, en fait, être attentif au seul discours de son camarade ? Assurément...

Comme nous pouvons le voir, la sélection attentionnelle dépend de facteurs propres à l'individu mais également de facteurs extérieurs. Tout ne pouvant être traité à l'échelle du cerveau, un choix cognitif émergera qui sera fortement dépendant de nombreuses variables à la fois endogènes et exogènes. Lorsque choisie, la cible de l'attention peut alors être plus ou moins rehaussée dans le temps. Ce rehaussement sur la durée est nommé *attention soutenue*.

L'attention soutenue : un effort sur la durée

L'attention soutenue est souvent associée à des terminologies telles que la *vigilance* ou le *maintien attentionnel*. En effet, elle correspond à la capacité à maintenir l'effort attentionnel sur une longue période.

Si l'attention est déjà un état cérébral fortement énergivore, nous pouvons alors aisément comprendre que le maintien de cet état augmentera la demande en ressources énergétiques proportionnellement à sa durée. Être attentif sur une longue période de temps sera donc susceptible de provoquer des phénomènes de fatigue plus ou moins exacerbés en lien direct avec l'effort concédé

(voir encadré page suivante).

L'attention : une puissance à préserver et à orienter

Une journée de cours correspond à une mise en jeu régulière et plus ou moins intense des capacités attentionnelles de l'élève. Cette accumulation de périodes énergivores est susceptible de provoquer des difficultés à mobiliser ses capacités attentionnelles en fin de journée. Cela se traduit notamment par des baisses de vigilance, mais également par une distractibilité accrue. En effet, rappelons-nous que l'attention ne se conçoit que de manière conjointe avec les capacités d'inhibition. Plus un cerveau fatigué, plus il lui sera difficile d'inhiber les stimuli distrayeurs.

À ces problèmes de fatigue peuvent s'associer des problèmes d'irritabilité. En effet, un cerveau fatigué sera plus prompt à se protéger en refusant de concéder un nouvel effort énergétique qui le mettrait en défaut.

Aussi, il peut être pertinent d'alterner, durant les heures de cours, des périodes d'activités à demandes attentionnelles variables afin de laisser le temps au cerveau de reposer ses unités de traitement et d'abaisser sa consommation énergétique.

Il peut également être pertinent de proposer des moments où l'élève sera acteur de ses apprentissages (manipulation d'objets, construction d'outils pédagogiques, etc.). Cette attention fortement aut centrée est plus facile à mettre en place, car l'enfant, dans ce type d'activités manuelles, devient sa propre cible attentionnelle. Or, son intérêt personnel entraîne *de facto* sa volonté attentionnelle.

Pour l'enseignant, savoir manier la nouveauté, les contextes et les préférences peut constituer une approche efficace. Cependant, l'attention la plus puissante est celle générée de manière endogène, c'est-à-dire par l'élève lui-même. Cela semble plus qu'évident, mais il reste important de rappeler que la pédagogie la plus optimisée est celle qui saura obtenir le concours de l'élève pour qu'il génère de lui-même sa volonté attentionnelle.

L'outil attentionnel se guide et est donc, par nature, flexible et adaptable. Il constitue, au-delà d'un choix cognitif, un effort consenti par le cerveau pour identifier et rehausser une cible attentionnelle plutôt qu'une autre. Une question peut être posée : le cerveau, organe en perpétuelle recherche d'optimisation énergétique, est-il capable de réduire le coût de sa fonction attentionnelle ?

L'automatisation : optimiser et économiser

La capacité attentionnelle est limitée dans son essence. Incapable de traiter simultanément deux contenus informatifs à la fois, le cerveau devra gérer et coordonner en permanence les cibles de son focus attentionnel.

Profondément dynamique, cette coordination nécessite des

capacités de planification et de flexibilité, dimensions fortement portées par le cortex préfrontal. Afin de délester les régions à haut niveau de ressources (régions préfrontales notamment), le cerveau est-il capable de déléguer une partie de sa fonction attentionnelle à d'autres régions cérébrales ?

Ainsi qu'il a déjà été évoqué, un des privilèges de la construction cérébrale est d'associer des régions aux spécialisations différentielles. Dans cette mosaïque de spécialisations, une structure s'individualise : le *cervelet*. Celui-ci prend en charge un nombre important de fonctions dont les capacités d'automatisation des procédures motrices. Cependant, le cervelet est aussi impliqué dans l'automatisation de certaines procédures cognitives, notamment attentionnelles (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur L'importance du cervelet

Le cervelet, étymologiquement « petit cerveau », est une structure fascinante à plus d'un titre. Elle s'est développée progressivement et de concert avec les autres régions cérébrales. Ainsi, il est possible d'individualiser trois parties, de la plus ancienne à la plus récente : l'archéocervelet, le paléocervelet et le néocervelet.

Pour prendre une analogie numérique, le cervelet est en « copie carbone » de tous les influx nerveux en provenance des aires cérébrales motrices à destination des muscles, mais également des retours sensoriels de ces muscles vers le cerveau. Le cervelet a donc une position centrale à la croisée des chemins entre les initiatives motrices et leur résultat corporel. Cette position privilégiée lui permet d'apprendre de ces interactions, puis d'intervenir en ajustant et en coordonnant finement l'ensemble des commandes motrices. Le cervelet est ainsi responsable de la précision et de l'harmonie d'exécution de nos mouvements. Par exemple, sans cervelet, pas de joueur de piano. En effet, si l'archéocervelet permet au pianiste le maintien de son équilibre de posture face à l'instrument, le paléocervelet quant à lui autorise une motricité ajustée de ses membres supérieurs et le néocervelet, quant à lui, permet d'exécuter avec précision son morceau de musique.

Mais le cervelet est également capable d'une autre prouesse : celle de l'automatisation des procédures motrices. Les capacités d'automatisation du cervelet permettent d'alléger le travail des régions corticales. Par l'automatisation, le cerveau poursuit sa stratégie d'économie énergétique en permettant aux régions corticales à haut niveau de ressources de déléguer leurs fonctions vers des régions moins coûteuses. Typiquement et pour reprendre un exemple musical, un violoniste qui apprend un nouveau morceau activera dans un premier temps majoritairement ses régions frontales. Mais à la maîtrise du morceau, le violoniste activera préférentiellement ses régions cérébelleuses⁴. Le cervelet, ayant été aux premières loges du processus d'apprentissage moteur du morceau, est capable de le prendre en charge par la suite, dans une certaine mesure. Tout se passe comme si le cerveau se délestait d'une partie de ses tâches lourdes. Ce

faisant les régions corticales deviennent disponibles pour de nouvelles tâches complexes. En plus de son implication dans les procédures motrices, la partie la plus récente du cervelet (le néocervelet) est également impliquée dans un nombre important de fonctions cognitives, dont l'attention.

En s'intéressant aux activités cérébrales de sujets réalisant une tâche d'attention, il a pu être mis en évidence lors d'une IRM fonctionnelle (voir encadré « Le principe de l'IRM fonctionnelle » page suivante) qu'une performance attentionnelle optimisée était associée à une activation plus importante du cervelet. Tandis qu'une performance attentionnelle qui était moins optimisée impliquait des activations essentiellement corticales.

POUR ALLER PLUS LOIN

Le principe de l'IRM fonctionnelle

L'IRM fonctionnelle (IRMf) est une technique récente permettant de visualiser en temps réel le fonctionnement unifié des aires cérébrales. Elle repose sur le principe d'une relation étroite existant entre le niveau d'activité des neurones, leur consommation d'énergie et l'évolution du débit sanguin à proximité.

En effet, toute activité neuronale crée un déficit énergétique dans le neurone. Pour recréer ses stocks d'énergie, le neurone prélève de l'oxygène dans le système circulant (le système vasculaire) – pour rappel, dans le sang, l'oxygène est transporté par les hématies grâce à l'hémoglobine. Le système circulant réagit en augmentant, sur site, le flux sanguin oxygéné. Cette augmentation d'oxygénation sanguine, également nommée *réponse hémodynamique*, se met en place plusieurs secondes après l'activation de la population neuronale. Elle est traçable en IRM grâce aux propriétés magnétiques différentielles entre l'hémoglobine oxygénée (qui porte de l'oxygène) et l'hémoglobine désoxygénée (qui n'en porte pas).

L'IRM fonctionnelle n'a pas la même précision structurelle que l'IRM morphologique. En effet, si la seconde repère la structure du tissu, la première ne révèle que des changements d'oxygénation sanguine. C'est pourquoi, lors d'études en neuro-imagerie fonctionnelle, deux IRM sont toujours réalisées, fonctionnelle et morphologique, de façon à pouvoir superposer les deux images et leurs contenus : l'activité cérébrale et sa localisation exacte dans le tissu.

Cette technique révolutionnaire présente de nombreux avantages : elle est non invasive, rapide et très précise. Elle autorise la mise en évidence du cerveau en action. Notre compréhension du fonctionnement cérébral a prodigieusement évolué depuis l'introduction de cette méthode.

Attention cependant : l'IRM fonctionnelle est avant tout un outil de recherche. Comme tout outil scientifique, il est soumis à la statistique, c'est-à-dire à la part du doute. Si l'IRMf peut apporter des éclairages sur le fonctionnement cérébral, elle se contente de proposer des théories sur ce fonctionnement, jamais des vérités absolues.

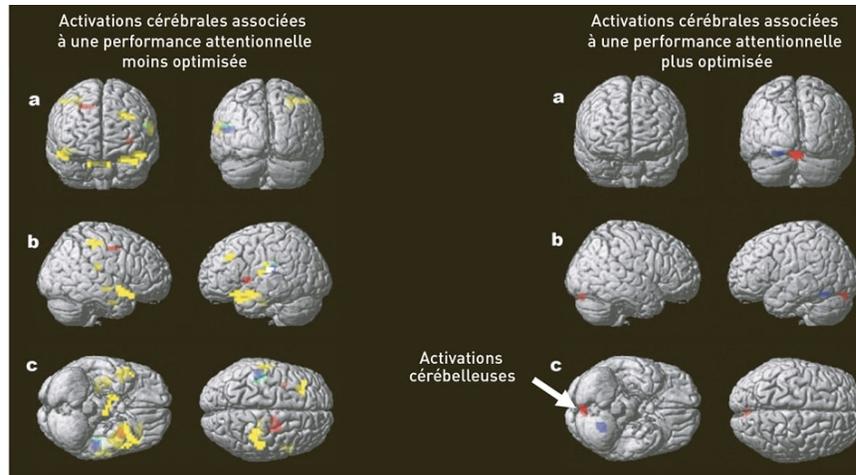


Figure 30 : Amélioration de la performance attentionnelle par la mobilisation du cervelet. Les couleurs représentent les activations cérébrales associées aux différentes tâches attentionnelles de complexité croissante utilisées dans ce test de Go/No-go (Source : M. Bonnet d'après Bonnet et al., 2009)

L'optimisation d'une performance attentionnelle dépend donc de la capacité du cerveau à permettre un « délestage » de l'activité des régions corticales vers le cervelet. En automatisant la tâche attentionnelle par l'activation du cervelet, le cerveau diminue ainsi son coût énergétique tout en optimisant sa performance.

Allons plus loin. De manière surprenante, un niveau éducatif élevé tend à faciliter le recrutement des régions cérébelleuses, tandis qu'un niveau d'études plus faible conduit à recruter exclusivement les régions corticales (notamment les régions préfrontales naturellement impliquées dans la fonction attentionnelle). Cet effet est d'autant plus marqué que la charge attentionnelle pour la tâche est élevée. Il est à noter que ces observations sont faites alors que les performances attentionnelles sont identiques quel que soit le niveau éducatif du sujet.

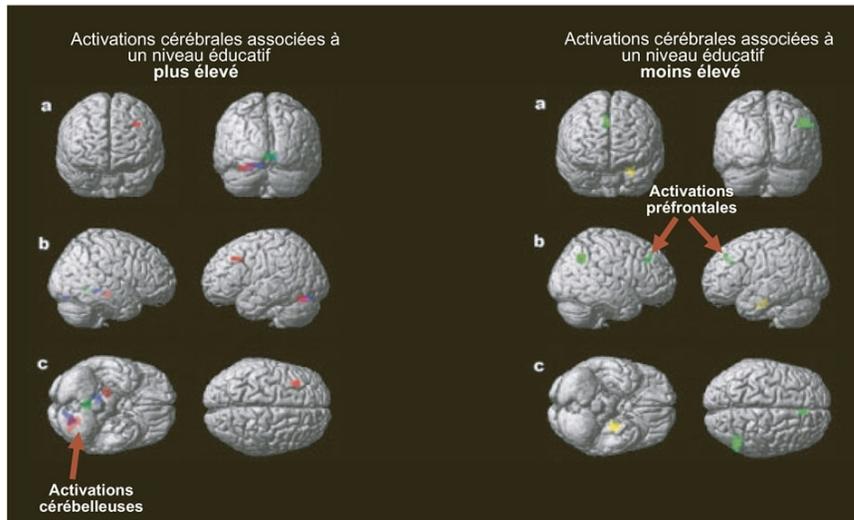


Figure 31 : Recrutement différentiel du cervelet associé au niveau d'études, lors d'une tâche attentionnelle (Source : M. Bonnet d'après Bonnet et al., 2009)

Que devons-nous comprendre ?

Le délestage d'activité des régions corticales vers les régions cérébelleuses est facilité par le niveau éducatif : plus le niveau d'études est élevé, plus l'optimisation de la procédure attentionnelle par l'implication du cervelet est importante.

Il peut être limitatif d'envisager le niveau d'études comme une variable explicative, résumant à elle seule un environnement cognitif sur plusieurs années. Cependant, sans être la variable qui explique tout, elle reflète un état fonctionnel. Un environnement cognitif plus ou moins dense est susceptible d'avoir des effets sur l'adaptation cérébrale à certaines situations, notamment attentionnelles.

Quelles stratégies cognitives seront favorisées dans les longs cursus éducatifs ? Certainement et majoritairement celles permettant une répétition forte et régulière des procédures attentionnelles. Ainsi, cette répétition pourra conduire progressivement à une automatisation de celles-ci. Comme on peut également le comprendre, l'automatisation par le cervelet pour les procédures attentionnelles est susceptible de *préserver* la mise à disposition des régions corticales à haut niveau de ressources lorsque la tâche attentionnelle se complexifiera, c'est-à-dire lorsque la *charge cognitive augmentera*.

Le pédagogue, passeur de stratégie cérébrale attentionnelle

Notons que les résultats dans l'étude présentée sont obtenus chez des sujets adultes. Cet état fonctionnel à l'âge adulte, dépendant du parcours éducatif reçu, est donc *pérenne*.

Entraîner l'élève (même celui passant par un parcours éducatif plus court) à être attentif, l'aider à répéter le plus régulièrement possible ses procédures attentionnelles, en faire varier les demandes : l'ensemble de ces actions peut inciter le cerveau de l'enfant à automatiser ses stratégies attentionnelles.

Nos états fonctionnels et nos stratégies d'activations cérébrales découlent de nos vécus, notamment pédagogiques. La place du pédagogue est ainsi capitale : par son enseignement, il peut être capable de façonner les stratégies cérébrales de son élève, stratégies qui seront toujours actives chez l'adulte que cet élève deviendra.

Ainsi, la stratégie d'automatisation des procédures attentionnelles représente un puissant outil adaptatif qui permet de répondre à des sollicitations attentionnelles variables en y adaptant finement le coût énergétique nécessaire.

Qu'est-ce que l'attention ? Le socle inhérent à tout apprentissage et le Graal de tout pédagogue. L'attention est une projection cérébrale, un état dirigé vers un but, un intérêt motivé de l'organe entier. Coûteux car énergivore, limité car exclusif, puissant car dirigé, l'état attentionnel témoigne de la motivation de l'organe à consacrer un effort énergétique pour un objet d'intérêt défini.

Fortement associé au développement de l'organe, l'état attentionnel prendra en ampleur et en capacité avec la maturation progressive du cerveau. Les stratégies cérébrales attentionnelles, acquises pendant l'enfance et l'adolescence, resteront pérennes à l'âge adulte. Ces stratégies étant fortement liées au niveau d'études, nous comprenons toute l'importance et la portée du travail du pédagogue chez l'enfant et l'adolescent.

Inciter le cerveau à produire régulièrement un effort attentionnel, c'est lui permettre de s'entraîner pour trouver progressivement, par lui-même, des stratégies d'automatisation autorisant de manière durable et sur la vie de l'individu des performances à moindre coût énergétique.

Une question reste en suspens : comment un organe cérébral

gène la motivation nécessaire pour concéder l'effort énergétique primordial à toutes ses volontés attentionnelles ? En d'autres termes, que représente la motivation et quels processus lui permettent de s'exprimer ?

3 NOTIONS À RETENIR

- L'attention est l'expression d'une volonté et d'un but définis à l'échelle du cerveau entier.
- L'attention est un processus cérébral gourmand en ressources énergétiques qui ne peut se concentrer que sur une seule cible à la fois.
- Augmenter ses capacités d'automatisation permet de mieux gérer une surcharge attentionnelle.

2. Caractère de ce qui est instable, fragile, inconstant.

3. William James, *The Principles of Psychology*, New York, Henry Holt, 1890, t. I, chap. XI, p. 402-404.

4. « Cérébelleux » signifie tout ce qui a trait au « cervelet ».

Le cerveau, un organe à protéger

1 - Le cerveau, ce grand sensible

Nous avons exploré plusieurs aspects du cerveau : sa structure, sa fonction, ses capacités de plasticité et une grande partie des processus qui conduisent à sa dynamique d'apprentissage. En mettant de côté les spécificités du vivant, certains de ces aspects d'apprentissage pourraient présenter de nombreuses similitudes avec ceux exprimés par un réseau de neurones *artificiel*. La question peut donc se poser : quelle est la différence majeure entre une machine artificielle et un cerveau vivant, fait de chair et de sang ?

Se poser cette question nous permet d'appréhender une caractéristique absolument unique de l'organe cérébral (et de lui seul) : sa *sensibilité*.

Que serait un cerveau sans sa sensibilité ? Serait-il capable d'exprimer toutes ses capacités ? En quoi lui est-ce utile d'être sensible ?

Sensibilité physique

Comprendre qu'un cerveau humain est un organe d'une extrême sensibilité nous permet de concevoir l'ensemble de son fonctionnement et de ses capacités sous un jour nouveau.

Nous avons pu aborder, au travers de l'étude du cortex somesthésique mais également de l'hypothalamus et de sa gestion du système nerveux autonome, l'importance du flux d'informations sensorielles qui parvient en permanence au cerveau depuis toutes les cellules de notre corps, organes viscéraux compris.

Le cerveau ne se contente pas de contrôler et de percevoir le corps, il *est* le corps. Il peut prendre à son compte tout ce qui peut le

toucher ou l'altérer. Il est ainsi particulièrement sensible à toutes les sensations corporelles, quelles qu'elles soient : agréables (caresses par exemple) ou désagréables, voire douloureuses (irritations, brûlures, fractures, etc.). En effet, dans l'arsenal de systèmes informationnels dont dispose le cerveau pour connaître, à tout moment, l'état du corps dont il a la charge se dégage également un système qui nous occasionne souvent bien des tourments : le système *nociceptif*.

Le système nociceptif est le système de la *douleur*. Il relaie en permanence au cerveau (cortex somesthésique, notamment) toute information en provenance des cellules en souffrance. Ce système nociceptif est fondamental, car l'information douloureuse constitue un marqueur de la mise en danger, par un comportement ou un contexte, d'une partie, voire de la totalité de l'organisme. La douleur ressentie par le cerveau l'informe qu'il doit urgemment trouver une contre-mesure comportementale pour diminuer la souffrance rencontrée par les cellules du corps. Comme on peut aisément le comprendre, ce système est capital et son altération peut avoir de graves conséquences (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur La douleur, alliée de notre survie

Certains individus peuvent présenter des altérations de leur système nociceptif rendant leur organisme mutique quant à sa souffrance. Non alerté, le cerveau ne met pas en place les contre-mesures comportementales nécessaires pour préserver le corps. Ces patients ont ainsi souvent des comportements qui leur sont dangereux, voire fatals. Afin de se protéger, ces patients doivent toujours conserver un haut niveau de vigilance sur tous leurs mouvements, procédures et comportements. Une attention de tous les instants qui cesse cependant lorsqu'ils sont endormis. Or, la nuit, nos membres peuvent souffrir naturellement du poids du corps sur certaines régions, de la diminution de la vascularisation associée, des fameuses crampes, etc. Tout système nociceptif compétent alertera le cerveau pendant le sommeil afin qu'il puisse ordonner des mouvements du corps qui en feront changer sa position et donc ses contraintes (c'est ce qui se passe lorsque nous nous retournons dans notre lit sans nous réveiller et sans nous en souvenir). Si le corps ne se meut pas régulièrement, comme c'est le cas chez ces patients, il peut alors être observé progressivement des atteintes corporelles (vasculaires et/ou squelettiques).

La douleur représente un message qui doit être écouté. En dehors de toute pathologie

chronique, la douleur reste une alerte qui n'a qu'une seule priorité : révéler les modifications, les contextes et les comportements qui nous sont profondément défavorables.

Il est à noter que le cerveau *ne ressent pas de douleur le concernant*. Il est ainsi possible de pratiquer des chirurgies cérébrales sur patients éveillés sans engendrer de souffrance. La souffrance physique de la structure cérébrale ne s'exprime pas. Elle n'est pas même codée.

Zoom sur La migraine : une douleur vasculaire

C'est principalement la vasodilatation des vaisseaux sanguins au niveau des méninges qui conduit à la sensation de douleur lors d'une migraine. Le cerveau ne souffre pas au niveau de ses cellules (neurones ou cellules gliales), il reçoit des informations associées à des modifications du système vasculaire qu'il interprétera comme douloureuses.

Par contre, un cerveau est capable de s'approprier l'atteinte d'une région du corps par un fort codage nerveux et cérébral associés, comme une fracture de la jambe. La souffrance qu'exprime le cerveau pour un membre endolori dépasse ainsi le cadre de sa souffrance propre. Le système nociceptif fait du cerveau un organe à l'empathie majorée pour son organisme, capable de souffrir pour toutes les autres cellules avant les siennes. En termes langagiers, il est d'ailleurs intéressant de constater que, lorsque l'organisme est en souffrance, par exemple lors d'une fracture de la jambe, le cerveau peut tout aussi bien verbaliser « j'ai mal à la jambe » que « je souffre »... Un cerveau *souffre* pour son corps.

Shakespeare lui-même disait qu'*aucun philosophe ne pouvait patiemment endurer une rage de dent*... Effectivement, l'empathie du cerveau pour son organisme est telle qu'elle est susceptible de dépasser tout autre processus cérébral, cognitif (et donc philosophique) compris.

Mais jusqu'où s'étend cette sensibilité cérébrale ?

Zoom sur La sensibilité des tout-petits

On a supposé pendant de nombreuses années que le système nerveux des nouveau-nés n'était pas assez mature pour porter les signaux de douleur. Aussi, il y a plusieurs décennies, des bébés ont subi des chirurgies invasives sans anesthésie... Il est désormais connu que les bébés et les tout jeunes enfants ont, au contraire, un système nociceptif, et plus largement un système somesthésique, particulièrement développé qui participe déjà activement à l'apprentissage des dangers présents dans le monde qui les entoure.

Il est donc nécessaire de protéger l'enfant, car sa sensibilité est déjà exacerbée. Cependant, c'est par son interaction physique sensible avec l'environnement extérieur qu'une grande partie de ses apprentissages pourront s'exprimer.

Sensibilité émotionnelle

Toute personne en souffrance peut devenir plus ou moins irritable, voire se mettre éventuellement en colère. Cet état comportemental, ainsi que plusieurs autres, peuvent découler de nombreuses situations de la vie.

La colère, la peur, la tristesse, la surprise, le dégoût, la joie, que représentent-ils au niveau cérébral et qu'ont-ils en commun ?

Nommés « *émotions* », ces états comportementaux sont universellement exprimés et reconnus aux quatre coins du globe. En effet, quel que soit le peuple, l'expression comportementale et physiologique associée à ces émotions sera toujours identique et reconnaissable par tous les individus. Les émotions sont même déjà observées chez les bébés. Qui n'a pas fait goûter un morceau de citron à un bébé passera à côté du spectacle évocateur (et touchant) de sa petite moue de dégoût.

Étymologiquement, « *émotion* » signifie « *mouvement vers l'extérieur* ». En effet, et ainsi que nous allons le constater, même si l'émotion est un état physiologique vécu intérieurement par un individu, il est associé à des modifications physiologiques et corporelles visibles par un observateur extérieur.

Qu'est-ce qu'une émotion ?

Pour pouvoir définir ce qu'est une émotion, prenons-en une en exemple : la colère.

Toute personne a pu exprimer un état de colère ou a pu le voir s'exprimer chez autrui. La colère est associée, notamment, à une augmentation du rythme cardiaque, une augmentation de la respiration et à une contraction typique des muscles de la face. La question débattue par des générations de neuroscientifiques a été de savoir si c'était l'état émotionnel qui était à *l'origine* de ces modifications physiologiques observées (modifications du pouls, de la respiration et des contractions musculaires) ou si cet état émotionnel n'était que la *conséquence* de ces modifications physiologiques... En d'autres termes, pouvons-nous affirmer que nous sommes toujours en colère si nous avons une respiration et un pouls réguliers et une absence de contraction des muscles de la face ? Pouvons-nous être en colère, triste, heureux sans que cela ne transparaisse au travers de nos constantes physiologiques ? Pouvons-nous être profondément triste sans pleurer à chaudes larmes ? Et inversement, pouvons-nous pleurer à chaudes larmes sans être profondément triste ?

Associer ces différentes questions nous permet d'entrevoir la réponse qui fut finalement apportée : l'état émotionnel est, de manière intéressante, à la fois une *cause et une conséquence* des modifications physiologiques et comportementales, marqueurs de cet état. Cette double caractéristique doit nous mettre la puce à l'oreille : un processus qui peut être à la fois une cause et une conséquence indique qu'il est cérébralement « bouclé » ; c'est-à-dire que les régions qui portent l'ensemble de ces processus doivent former une boucle à l'échelle du cerveau. Nous y reviendrons plus loin.

Ces premières constatations posent de grandes questions sur l'importance des émotions, leur utilité et surtout leur universalité dans l'espèce humaine et dans de nombreuses autres espèces animales. Chez l'humain, espèce animale capable de verbalisation, il est d'autant plus pertinent de s'y intéresser quand on s'aperçoit

qu'un cerveau triste, stressé ou malheureux peut utiliser, pour exprimer son état, le même vocabulaire que pour une fracture de la jambe : « je souffre »... Un cerveau qui souffre émotionnellement utilisera les mêmes mots que pour verbaliser une souffrance physique. Les souffrances physiques et émotionnelles se répercutent à l'identique au niveau de l'organe cérébral.

Il est à noter ici un point capital : les émotions ne sont pas que des états physiologiques vécus et exprimés corporellement. Elles peuvent entrer et être profondément traitées dans la sphère consciente. C'est le commencement du *sentiment*. Le cerveau peut se rendre compte qu'il souffre ou qu'il a peur et le verbaliser. À l'échelle humaine, notre palette de prise de conscience et de verbalisation de nos émotions est quasiment infinie comme peuvent en témoigner, notamment, nos riches œuvres poétiques.

Zoom sur Les animaux : émotifs anonymes

Chez l'humain, aux capacités d'introspection, de conscience et de verbalisation exacerbées, cette sensibilité cérébrale peut s'exprimer largement. Cependant, elle ne doit pas occulter le vécu émotionnel et la sensibilité exprimés par les autres espèces animales avec qui nous partageons les mêmes structures cérébrales.

Le circuit des émotions

Le cerveau est particulièrement bien équipé pour exprimer des émotions. Plusieurs structures sont impliquées dans la genèse de celles-ci, la plus centrale d'entre elles étant *l'amygdale*.

Plaques tournantes de nos émotions, les amygdales sont de petites structures bilatérales logées dans nos lobes temporaux médians, en avant des hippocampes (voir fig. 2, p. [«Figure 2 : Localisation des hippocampes dans un cerveau humain», page 17](#)) Pour rappel, les amygdales *cérébrales* ne sont pas celles que l'on trouve au fond de la gorge. Leur nom est identique, car leur forme est similaire. Étymologiquement en effet, *amygdale* signifie « en forme d'amande. »

La proximité *structurelle* entre les amygdales et les hippocampes est corrélée à leur proximité *fonctionnelle*. Ces structures fonctionnent et se coordonnent ensemble.

L'amygdale et les hippocampes font partie intégrante du *circuit des émotions* qui inclut aussi, notamment, le cortex cingulaire antérieur et l'hypothalamus. Longtemps dénommé *système limbique*, le circuit des émotions s'est progressivement affranchi de cette terminologie. En effet, et ainsi que nous allons le voir, les émotions, de leur expression à leur traitement, dépassent largement le cadre cloisonné d'un seul système.

À quoi servent les émotions ?

Mémoire et protection

Ainsi que nous avons précédemment pu le constater dans le chapitre sur la mémoire (voir p. [72](#)), par la proximité structurelle immédiate des amygdales avec les hippocampes, les émotions peuvent devenir des *vecteurs puissants pour la cristallisation de nos souvenirs*. L'un des premiers atouts de nos capacités émotionnelles est donc la *genèse passive d'un passé*.

Mais elles ne se réduisent pas qu'à cela.

- *Exemple de la peur*

Afin de comprendre la pertinence de nos émotions, il est nécessaire de s'intéresser à l'une des plus puissantes exprimées par l'organe cérébral : *la peur*.

Pour avancer dans notre démonstration, prenons un exemple : vous baladant gaiement dans les bois par un bel après-midi d'été, voici qu'au détour d'un chemin vous tombez nez à nez avec un serpent. Vous vous rendez compte alors, *a posteriori*, que vous avez fait un pas de côté avant même d'avoir compris pourquoi. Vous constatez également que votre pouls s'est accéléré et que vos mains sont moites.

Que s'est-il passé ?

Pour le comprendre, des expériences ont été réalisées reproduisant ladite situation. Il a ainsi été proposé à des sujets de visualiser des images présentées de manière *subliminale*. Comme le nom l'indique, *sub-liminale* signifie « en dessous du seuil ». Dans ce cadre précis, cela signifie en dessous du seuil de la *conscience*. C'est-à-dire que les images sont présentées si rapidement (quelques dizaines de millisecondes) que le temps manque pour que l'information parvienne aux régions cérébrales à haut niveau de traitement (frontales notamment), celles qui permettent au sujet de prendre conscience de ce qu'il a vu et donc de le verbaliser.

Il est à noter que la peur (comme l'anxiété ou le stress) se caractérise en termes physiologiques, notamment par une sudation involontaire et incontrôlable des paumes des mains. L'expérimentation se propose donc d'enregistrer la réponse électro-dermale des sujets.

POUR ALLER PLUS LOIN

Qu'est-ce qu'une réponse électro-dermale ?

Une réponse électro-dermale est obtenue par deux électrodes positionnées sur la paume de la main du sujet. Le principe est simple, si le sujet a peur, est anxieux ou stressé, une micro-sudation réflexe et involontaire apparaîtra au niveau de ses mains. L'eau générée par la sudation augmentera la conductivité entre les deux électrodes et provoquera alors la genèse d'un petit courant électrique. Ainsi, si le sujet a peur, une petite courbe apparaît sur l'écran de l'ordinateur relié aux électrodes.

Une première image est présentée de manière subliminale aux sujets : cette image représente schématiquement une forêt avec au premier plan un arbre et de l'herbe au pied du tronc. À la présentation de cette image, les sujets n'expriment aucune réaction. Ils ne savent même pas qu'ils ont vu quelque chose. Une deuxième image est présentée, toujours en subliminal, avec le même décor, mais un détail change : un serpent est présent au pied de l'arbre. À la présentation de cette image, une petite courbe apparaît sur l'ordinateur de l'expérimentateur : les sujets ont eu peur... L'expérimentateur les questionne sur le

pourquoi de cette réaction physiologique. Les sujets sont incapables de répondre. Consciemment, ils n'ont pas eu peur car, consciemment, ils n'ont rien vu. Cependant, leurs amygdales, les structures qui ont déclenché la cascade de réactions aboutissant à l'état de peur et donc à la sudation réflexe, ont, par contre, très bien perçu quelque chose. Ce quelque chose est un serpent, un animal susceptible d'être assez dangereux pour potentiellement compromettre la survie de l'organisme.

Le circuit cérébral impliqué dans la peur est très court. Dans l'exemple qui nous concerne, les informations issues des rétines aboutissent très rapidement aux amygdales. Celles-ci n'attendent pas que l'information atteigne les régions frontales, sièges de nos décisions conscientes. En effet, il serait potentiellement trop tard. Le danger que représente le serpent doit être évité au plus vite. *L'état de peur* est donc déclenché par les amygdales. Dans le cadre de l'expérience présentée, cet état de peur provoque, notamment au travers d'une cascade de réactions impliquant l'hypothalamus, une sudation réflexe au niveau de la paume des mains des sujets testés. Dans le cas de votre rencontre du troisième type avec un vrai serpent dans une vraie forêt, en plus de nombreuses autres réactions physiologiques (accélération du pouls, sueurs froides), cet état de peur a déclenché chez vous un circuit moteur réflexe qui a fait décaler votre corps dans la direction opposée au danger identifié. Votre entourage, éventuellement surpris par votre saut de côté peu académique (et vos éventuelles vocalises...), aura peut-être quelques moqueries à votre égard. Peu importe, vous venez d'être protégé.

Nos amygdales cérébrales constituent notre système d'alerte intégré. Par leur activation, les amygdales sont capables de court-circuiter l'ensemble du système cérébral pour placer la survie de l'organisme avant tout le reste. Peu importe que vous n'ayez pas pris conscience du danger, il y en avait bien un...

Plusieurs éléments sont à comprendre de ces différents exemples.

Premièrement, il est important de noter qu'une grande partie de nos processus cérébraux peuvent échapper à notre conscience. C'est le cas, notamment, de certains processus associés aux émotions.

Deuxièmement, la peur doit être comprise comme un signal exprimé par certaines régions du cerveau pour alerter toutes les autres sur un danger effectif ou imminent menaçant l'organisme. La peur est notre première garde, notre première ligne de défense, elle nous protège. Elle est tellement essentielle qu'elle peut passer avant tout le reste, avant même notre volonté consciente. L'état émotionnel de peur est notre sécurité primordiale. Il nous prépare à éviter et/ou à affronter un danger identifié.

Comme nous pouvons le voir, la peur correspond à un état physiologique et comportemental particulier capable de s'exprimer prioritairement et en un temps record. À l'image de la peur, chaque émotion conditionne un profil unique de modifications physiologiques et comportementales. Ces profils peuvent se mettre en place indépendamment de la prise de conscience de la situation qui les a engendrés. Preuve à la fois de leur robustesse et de leur importance. Ces profils physiologiques et comportementaux, déclenchés par chaque émotion, constituent autant d'*états préprogrammés* utilisables par le cerveau.

Mais si nous comprenons que la peur ou le dégoût sont des états préprogrammés pouvant éventuellement favoriser la survie de l'organisme, qu'en est-il, par exemple, de la surprise ou de la joie ? Émotions positives et émotions négatives, quelle est finalement leur pertinence au niveau cérébral ?

Un autre constat : lorsque le système émotionnel est trop

fortement sollicité, il peut devenir nocif. C'est le cas, ainsi que nous l'avons vu, de l'effet amnésiant d'un stress puissant. Comment alors le cerveau gère-t-il ses émotions ?

- *L'émotion sous contrôle*

Au niveau du cerveau, une région se singularise plus que les autres : le cortex *préfrontal*. En effet, les régions préfrontales font partie du club très fermé de régions qui reçoivent les informations en provenance de *tous* les autres territoires cérébraux. Le cortex préfrontal peut être assimilé à un gigantesque « hub » dans lequel aboutit l'ensemble des informations sensorielles, motrices, viscérales, mnésiques, cognitives, etc. Cependant, même si les régions préfrontales collectent toutes ces informations, elles ne constituent pas pour autant une impasse. De ces régions préfrontales repartent de puissantes efférences⁵ axonales vers les autres territoires cérébraux. Parmi ces efférences, on compte les fameuses *boucles de rétroaction*.

Prenons un nouvel exemple. Nous allons considérer que vous avez peur des chiens (pour celles et ceux qui seraient éventuellement en train de caresser la tête de leur labrador pendant la lecture de cet ouvrage, essayez de faire abstraction...).

Alors que vous vous promenez dans votre quartier, vous voyez à une intersection un pitbull menaçant faisant mine de déclencher une attaque dans votre direction. Vous marquez un temps d'arrêt. Vos amygdales ont lancé l'alerte, un état de peur se déclenche. Mais, très vite, tout s'arrête : vous venez de comprendre que le chien était solidement attaché à une laisse et que vous ne risquiez rien.

Que s'est-il passé ?

Dans cet exemple, vos amygdales ont fait leur travail. Vigilantes et protectrices, elles ont averti toutes les autres régions

cérébrales de l'imminence d'un danger, dont les régions préfrontales. Contrairement à l'expérimentation évoquée plus haut qui utilisait des images subliminales, vos régions préfrontales *ont eu le temps* de traiter toutes les informations qui leur parvenaient. Parmi celles-ci, le signal d'alerte en provenance des amygdales, mais également de précieuses informations en provenance du cortex visuel comme la présence d'une laisse sur le chien.

De ces différentes informations et des calculs qui en découlent (qui ont pris un peu de temps mais qui ont quand même été réalisés en moins d'une demi-seconde...), votre cortex préfrontal a évalué que le danger n'en était finalement pas un. Par la mise en jeu de leur *boucle de rétroaction*⁶, les régions préfrontales vont donc *inhiber* l'activation des amygdales pour qu'elles stoppent leur alerte : l'état émotionnel de peur est maîtrisé. L'émotion est sous *contrôle* (voir encadré ci-dessous).

Contrôler ses émotions

Tout cerveau jeune s'émeut facilement. Effrayé par une pièce mal éclairée ou par tout bruit suspect alors qu'il est seul dans une grande maison, le jeune cerveau exprime plus souvent de la peur que celui d'un adulte.

À noter : la structure amygdalienne décroît naturellement en volume à partir de l'âge de 20 ans. Il est alors intéressant de constater que ce rétrécissement en volume est concomitant du développement des régions préfrontales.

Plus le cerveau mûrit, plus il aura vécu d'expériences émotionnelles, et plus il aura appris à les contrôler.

L'immaturation préfrontale est particulièrement responsable chez le sujet jeune de l'absence de prise de contrôle de ses états émotionnels (crise de larmes, de colère, etc.).

Le jeune enfant et l'adolescent devront donc être accompagnés pour apprendre à gérer leurs émotions. Un des premiers pas vers cette gestion est la reconnaissance et la verbalisation de ces différents états émotionnels exprimés par le jeune, mais également par son entourage.

La prise de conscience, la compréhension et la verbalisation de ses propres états émotionnels représentent la condition *sine qua non* à leur gestion/contrôle.

La reconnaissance, la compréhension et la verbalisation des états émotionnels d'autrui représentent, quant à elles, les bases de l'empathie et des compétences

sociales (voir chapitre sur la théorie de l'esprit, p. [«La théorie de l'esprit : comprendre l'autre», page 124](#)).

Il n'en reste pas moins que le souvenir de cet événement désagréable peut éventuellement orienter un nouvel itinéraire pour votre prochain trajet. L'hippocampe, par sa proximité structurelle avec l'amygdale a, en effet, été aux premières loges de cette expérience émotionnelle et en cristallisera avec force le souvenir. De plus, détenteur des capacités de localisation spatiale, l'hippocampe se fera aussi fort de cocher avec précision le lieu géographique qu'il vaudrait mieux éviter. Une stratégie d'évitement pour un cerveau représente un moyen d'empêcher l'émergence d'états émotionnels non désirés, tels que la peur, dont les répercussions à la fois physiques et physiologiques sont considérées comme désagréables (voir encadré page suivante).

À cette étape, retenons une information essentielle : les états émotionnels sont associés à un état particulier du corps. La boule au ventre, le cœur qui se serre, des sueurs froides, ces exemples de vécus physiologiques représentent autant de marqueurs de l'état émotionnel au niveau corporel. Dans ce cas précis, ces marqueurs corporels sont jugés *désagréables*. Le cerveau essaiera d'y échapper. Au contraire, d'autres marqueurs corporels comme un relâchement musculaire, un sourire ou une sensation de bien-être, qui peuvent être exprimés et donc ressentis dans des émotions positives, telles que la joie, seront plus favorablement recherchés.

Le cerveau évite des états émotionnels aux marqueurs corporels désagréables et recherche des états émotionnels avec des marqueurs corporels agréables. Cela semble l'évidence même, mais cette logique a des répercussions fondamentales sur le fonctionnement d'un cerveau à différents niveaux.

Zoom sur La gestion des émotions par la compréhension

L'évitement n'est pas la seule alternative du cerveau pour s'empêcher de revivre une situation émotionnellement désagréable. Dans l'exemple de votre rencontre avec un pitbull, votre cerveau peut également considérer que vous pourrez repasser par le même itinéraire, car il a *compris* que le pitbull ne représentait plus un danger. Ce faisant, il sera capable de maîtriser, voire d'abolir, par ses mises en jeu préfrontales, une prochaine cascade émotionnelle à son contact.

Une émotion comme la peur n'est pas une faiblesse. Elle est au contraire une puissance du système susceptible de mobiliser, à votre avantage, toutes les ressources métaboliques de l'organisme pour vous protéger. Cependant, dans certaines situations, une surcharge émotionnelle peut engendrer des effets profondément délétères. C'est l'exemple, notamment, des phobies ou du stress post-traumatique.

Dans l'exemple de la phobie des chiens, même comprendre que le pitbull est attaché peut ne pas suffire à maîtriser la cascade émotionnelle. Souvent, seule la répétition de la mise en contact en contexte sécurisé (exemple de la réalité virtuelle) peut améliorer le contrôle émotionnel des personnes phobiques.

Dans le cadre d'un stress post-traumatique, le cerveau considère qu'il a subi la situation et qu'il a été impuissant à trouver la parade à l'événement traumatisant. Cependant, souvent, il n'y avait tout simplement pas de parade qui aurait pu fonctionner (ou bien la surcharge émotionnelle a fait perdre au cerveau le contrôle du corps au moment de l'événement). Or, un cerveau qui *ne comprend pas comment* il aurait pu protéger son intégrité corporelle ou émotionnelle, ou *pourquoi* il ne l'a pas fait, peut peiner à trouver une contre-mesure.

Nos régions préfrontales nous offrent, entre autres capacités, la possibilité de comprendre et de contrôler nos émotions. Mais les émotions sont des puissances primordiales. Notre cerveau est fragile de les exprimer, fragile de ne pas pouvoir les contrôler mais également, et paradoxalement, parfois fragile de les comprendre. C'est le début de l'éthique ou de la philosophie...

L'émotion comme outil décisionnel

Avoir déjà ressenti, c'est savoir à quoi s'attendre. Avoir été triste, c'est savoir que l'on ne veut plus l'être. Pour *éviter* d'être triste, il faut *avoir été* triste et il faut *avoir compris* pourquoi.

Cela semble tomber sous le sens, mais ce constat cache trois notions d'importance :

- la mémoire (il faut se souvenir d'avoir été triste) ;
- la compréhension (il faut avoir compris ce qui nous a rendu triste) ;

- l'anticipation (il faut savoir prévenir toute nouvelle situation de tristesse).

Transversalement à ces trois notions, il faut un marqueur de l'état de tristesse représenté par des sensations corporelles et physiologiques désagréables. Ce marqueur corporel constituera pour le cerveau une image vivace et en relief qu'il ne perdra pas de vue pour lui rappeler d'en éviter, à tout prix, une nouvelle occurrence.

Émotion, mémoire, compréhension, anticipation, ces notions nous guident vers les régions cérébrales impliquées. L'émotion et ses répercussions physiologiques mobiliseront les amygdales et l'hypothalamus. La mémoire du contexte émotionnel nécessitera les régions hippocampiques. Et, comme on peut s'en douter, les capacités de compréhension/verbalisation de l'émotion ainsi que les capacités d'anticipation des états émotionnels futurs seront l'apanage de nos régions préfrontales (voir encadré page suivante).

Zoom sur Une atteinte aux régions préfrontales

De nombreuses découvertes fondamentales sur le cerveau humain ont souvent résulté de l'observation de surprenants faits médicaux.

Parmi eux, citons le cas de Phineas Gage, employé à la construction des chemins de fer aux États-Unis au milieu du XIX^e siècle. Il officiait en tant que responsable de l'équipe qui faisait exploser à la poudre les rochers barrant la route aux rails à construire. La procédure était relativement simple : un trou était percé dans le rocher et de la poudre explosive était positionnée tout au fond. Une mèche en sortait qui était allumée dans un second temps. Avant cela, du sable était généreusement versé sur la poudre puis tassé à l'aide d'une barre à mine afin que l'explosion concentre sa puissance vers le centre de la roche, mais également pour empêcher la poudre de s'enflammer au moment du bourrage à la barre à mine. En effet, la barre à mine étant métallique, elle était susceptible de provoquer une étincelle pouvant mettre, littéralement, le feu aux poudres.

Un jour de l'été 1848, Phineas Gage se retourne pendant que son collègue est supposé verser le sable. Considérant l'action faite, il entreprend de le tasser avec sa barre à mine (un morceau de métal de 1,10 m de long pour 3 cm de large, effilé au bout supérieur). Une déflagration retentit et ses collègues le voient se faire

propulser sur le dos. Le relevant péniblement, ils constatent (avec effroi) un important trou dans la partie supérieure de son crâne laissant entrevoir l'organe cérébral sanglant et palpitant... Mue par l'explosion, la barre à mine est rentrée à la verticale sous l'œil gauche de Phineas Gage pour ressortir par le haut de son crâne emportant avec elle, à une trentaine de mètres plus loin, une partie de ses régions préfrontales. Conscient de bout en bout, Phineas Gage continuera de parler durant son trajet vers le cabinet du médecin local à qui il dira : « Docteur, il y a du travail pour vous... »

Décédé douze ans plus tard des suites de crises d'épilepsie incontrôlables, Phineas Gage aurait vu sa personnalité changer et des choix comportementaux désastreux s'opérer. Sa tragédie ouvrit la voie, dans le siècle suivant, à une compréhension plus fine de l'importance des régions préfrontales dans nos capacités fondamentales de prise de décision.

À la fin du xx^e siècle, les dimensions cognitives et émotionnelles de patients présentant des atteintes préfrontales comparables à celles observées chez Phineas Gage ont été étudiées. Il a été mis en évidence que si *l'altération de l'expression émotionnelle* consécutive à certaines lésions préfrontales *ne modifiait pas* les capacités d'*intelligence* du patient, elles en *modifiaient* pourtant profondément les capacités *décisionnelles*. Tout se passe comme si, alors même que le cerveau lésé au niveau préfrontal était capable d'entrevoir tous les choix possibles d'une situation, sa capacité à sélectionner un des choix parmi tous les autres s'estompait. L'hypothèse a été faite que sans émotions et sans marqueurs corporels associés, nos capacités à faire des choix *personnels* (mais pas des choix plus pragmatiques et codifiés comme choisir entre différentes stratégies de résolution d'un problème de mathématiques) seraient compromises.

Choisir impliquerait d'anticiper les conséquences émotionnelles que nous devons affronter. Si, par exemple, vous avez à choisir entre deux situations personnelles antagonistes telles que : trahir un ami et faire un gros profit, ou conserver votre ami mais rencontrer d'importantes difficultés financières, comment vous déciderez-vous ? C'est parce que vous êtes potentiellement capable d'envisager les conséquences émotionnelles respectives de ces deux situations que vous pourrez prendre votre décision. Quel état émotionnel votre cerveau sera-t-il prêt

à assumer dans son futur : la perte d'une amitié ou un budget difficile ?

Nos émotions agiraient ainsi comme des valences/pondérations/colorations de nos choix personnels. Dans l'océan des décisions que nous devons prendre chaque jour, elles permettraient de réduire drastiquement les choix possibles, ceux que notre cerveau serait capable d'assumer émotionnellement dans notre futur. Les possibilités de choix peuvent ainsi être réduites, isolées, voire même supprimées. Prendre une décision ne serait ainsi pas forcément un acte de raison pure. Concernant la sphère personnelle, la raison s'attache à l'émotion. À l'échelle du cerveau et dans la limite de cette sphère personnelle, *choisir c'est ressentir* (voir encadré « Jeunesse et choix personnels », page suivante).

Jeunesse et choix personnels

Voir le futur, c'est pouvoir anticiper les conséquences pragmatiques mais également *personnelles* de nos comportements et de nos choix dans notre présent. Le cerveau jeune est en apprentissage permanent de ses états émotionnels et de la compréhension de ceux-ci. L'immaturité de ses régions préfrontales explique les difficultés dans la gestion de ses émotions mais aussi les difficultés à prédire les conséquences émotionnelles de ses choix personnels.

De même, un cerveau jeune apprend progressivement que l'état émotionnel d'un proche peut être susceptible de conditionner son propre état émotionnel : c'est le début des processus d'empathie. Si rendre triste un proche, c'est également se rendre triste soi-même alors nos décisions et/ou comportements seront conditionnés par rapport à l'autre, miroir de notre état. L'empathie peut donc elle aussi déterminer des décisions personnelles.

Accompagner l'enfant dans la compréhension de ses états émotionnels et de ceux de son entourage peut l'aider à limiter les conséquences délétères de son immaturité cérébrale sur ses décisions personnelles.

Neuromythe Nous disposons de trois cerveaux

FAUX. Il existe une théorie dite des trois cerveaux qui stipule que chaque niveau

phylogénétique de l'évolution cérébrale correspondrait à un étage fonctionnel *autonome* (reptilien, paléomammalien et néomammalien). Même si cette lecture s'appuie effectivement sur des étapes d'encéphalisation particulières, elle peut aussi être à l'origine d'une cécité conceptuelle.

En effet, l'évolution cérébrale doit se comprendre comme un processus *transversal* à l'organe entier et pas comme de simples couches que l'on superpose. Les émotions portées par le système limbique (nommé dans cette théorie « cerveau paléomammalien ») en sont un exemple frappant. Les émotions ne se limitent pas au système limbique, elles sont transversales à tous les autres systèmes. De même, elles ne sont pas inféodées à un niveau phylogénétique plus récent (dit « cerveau néomammalien », c'est-à-dire le néocortex). En effet, même si les amygdales reçoivent des afférences de la part des régions préfrontales, l'inverse est également vrai. En effet, les activations des amygdales conditionnent fortement les activations et les traitements réalisés dans les régions préfrontales. Elles y participent d'ailleurs tellement que nos choix personnels en dépendent, à notre avantage.

Il n'y a donc pas trois cerveaux autonomes. Il n'y a pas de couches évolutives que l'on empile comme des strates géologiques. Il y a un organe entier qui a intégré l'ensemble de ses niveaux évolutifs pour tendre vers un fonctionnement transversal optimisé. Savante construction où chaque région est bouclée directement ou indirectement à toutes les autres, le cerveau doit se lire comme un tout.

L'essence de la motivation

Les émotions sont des vecteurs de mémoire, des protections comportementales et des outils décisionnels. Mais est-ce là toutes leurs capacités ?

Afin d'aller plus loin, faisons un petit exercice. Essayez de vous remémorer votre plus grande réussite (personnelle ou professionnelle). L'image qui vous vient à l'esprit est-elle accompagnée de quelques modifications ou ressentis corporels ? Esquissez-vous un sourire ? Votre respiration est-elle plus ample ? Relevez-vous la tête ? Gonflez-vous le torse ?

Nouvel exercice : essayez de vous remémorer votre pire échec. Votre visage se ferme-t-il ? Ressentez-vous un certain sentiment de mal-être ? Baissez-vous la tête ? Dans ce deuxième exercice, peut-être que ces sensations vivaces et désagréables vous ont même assez déplu pour que vous les chassiez bien vite de votre esprit.

Pourquoi ce double exercice ? Parce qu'il est intéressant de constater que l'échec et la réussite engendrent des réponses corporelles et des ressentis bien différents. Ces ressentis peuvent être soit agréables, soit désagréables. Nous pouvons alors tout à fait comprendre que notre cerveau, organe sensible, cherchera à exprimer plus favorablement les premiers au détriment des seconds.

Prenons un nouvel exemple, sportif cette fois-ci. Vous êtes dos à un panier de basket, sur la ligne des trois points. Dans cette position, vous ne voyez pas le panier et êtes assez éloigné pour qu'un tir, même de face, soit une gageure. Vous vous concentrez. Votre cerveau fait des calculs savants sur les différents programmes moteurs des pieds, des jambes, du dos, des bras et des doigts qu'il doit mettre en place pour accéder à la trajectoire balistique optimale, celle qui fera entrer le ballon dans le panier derrière vous. Admettez à cette étape, et sans vous faire offense, que vos chances de réussite ne sont pas très grandes. Le défi est immense. Que vous arrive-t-il alors, lorsque vous constatez que vous avez produit la trajectoire parfaite, celle qui vous a permis de marquer trois points de dos ? Les bras en l'air, les poings serrés, un sourire qui vous mange tout le visage, vous ressentez une joie et un plaisir intenses. Peut-être vous laisserez-vous même aller à lancer quelque cri guerrier en courant en cercles, le tee-shirt relevé sur la tête... (toute ressemblance avec certains sportifs serait fortuite...).

Qu'est-ce que cela traduit ? Vous aviez un objectif et vous l'avez rempli. Vos ressentis sont d'autant plus forts que la tâche était ardue. Votre cerveau a trouvé les bons programmes et ses *feed-backs* visuels lui ont confirmé qu'il avait réussi. Une émotion surgit et un plaisir intense est ressenti : votre cerveau vient de *se récompenser lui-même*.

- *Promesse d'une récompense méritée*

Au milieu du ^{xx}e siècle, des expériences ont été réalisées par lesquelles des électrodes ont été implantées à différents

endroits dans le cerveau de rats. Ces électrodes envoyaient un courant électrique à chaque fois que l'animal appuyait sur une pédale. Il a été observé que, pour certaines localisations d'électrodes dans le cerveau, l'animal appuyait tellement frénétiquement qu'il pouvait se passer de boire et de manger jusqu'à s'en effondrer d'épuisement.

Toujours chez les animaux, ces mêmes appuis plus ou moins compulsifs ont également pu être observés lorsque la pédale était reliée à un mécanisme de distribution de nourriture ou à une seringue permettant l'injection de drogues telles que la cocaïne.

Les régions impliquées dans ces différentes expériences sont constitutives d'un circuit cérébral qui a été dénommé *système de la récompense*. La mise en évidence de ce système cérébral a, notamment, permis d'améliorer la compréhension des conduites addictives.

Les régions cérébrales sous-tendant le système de la récompense associent plus particulièrement l'aire tegmentale ventrale, le noyau accumbens et une partie du cortex préfrontal. Ce système utilise la *dopamine* comme neurotransmetteur. La dopamine s'est ainsi vu attribuer l'étiquette de *neurotransmetteur du plaisir*. Cependant, il est important de garder à l'esprit qu'elle ne se limite pas qu'à cela (voir encadré ci-dessous).

Zoom sur Dopamine, récompense et motricité

La dopamine est bien plus que le neurotransmetteur du système de la récompense. Elle représente, en effet, au niveau cérébral le neurotransmetteur majeur associé au *contrôle moteur*. Les problématiques motrices, touchant notamment les patients parkinsoniens, y sont profondément associées.

Faisons une halte à ce niveau. Des appuis compulsifs sur une pédale contrôlant des stimulations électriques dans des régions

cérébrales constituent-ils une preuve irréfutable que les animaux ressentent effectivement un plaisir profond à chaque décharge ? Est-ce si simple ? Incapables de verbaliser leur état, ces animaux ne peuvent pas nous communiquer les vraies raisons de leurs comportements. Aussi, des expériences lors de chirurgies sur patients éveillés ont été réalisées pendant lesquelles les patients pouvaient contrôler la fréquence de stimulation de certaines de leurs régions cérébrales associées au système de la récompense (il est à noter que ces expériences ont été faites en périphérie d'un acte chirurgical bien défini et n'ont donc pas motivé la chirurgie elle-même. En effet, aucun chirurgien n'aurait l'autorisation de pratiquer de telles chirurgies cérébrales invasives sans motif médical avéré).

De manière intéressante, les ressentis des patients à la stimulation électrique volontaire et contrôlée de certaines régions associées au système de la récompense n'étaient pas des ressentis de plaisir mais *la promesse* d'en recevoir un. En se stimulant lui-même, le patient ressentait qu'il allait avoir du plaisir. Cependant, quelles que soient sa fréquence ou sa durée de stimulation, il ne l'atteignait jamais. Le ressenti final exprimé par le patient était donc une très grande frustration.

Deux informations essentielles sont à comprendre. Tout d'abord, bien que pour ressentir du plaisir le système de la récompense doive être mobilisé, stimuler des sous-unités de ce système ne suffit pas à l'engager entièrement. Cela nous indique que le mécanisme de récompense à l'échelle cérébrale est bien plus subtil qu'estimé de prime abord.

Deuxièmement, le ressenti de *promesse* de plaisir exprimé par les patients nous indique une notion d'*attendu*. Le système ne fait pas que produire une récompense, il produit une récompense par rapport à une *attente*.

Prenons l'exemple d'un morceau de musique que vous adorez. Dans ce morceau de musique, il y a sûrement un passage que

vous préférez, celui que vous *attendez* avec impatience et délectation. Quand ce moment arrivera, l'émotion et le plaisir vous envahiront. Mais que se passe-t-il si le morceau commence directement à ce moment précis, celui de votre moment préféré ? Votre émotion et votre plaisir en seraient moindres et peut-être même ressentiriez-vous une certaine frustration. Il y a fort à parier que vous remettiez le morceau à son vrai début pour l'écouter de nouveau en entier. Tout se passe comme si l'attendu de la récompense participait à construire la récompense elle-même.

Ce point est capital ! Pour nous en convaincre, prenons un nouvel exemple sportif, celui du champion olympique au moment où il reçoit sa médaille d'or et qu'il se tourne vers son drapeau, les larmes aux yeux, à l'écoute de l'hymne de son pays. Ressent-il cette vive émotion seulement parce qu'il a gagné sa course du jour ou la ressent-il également au regard de ses années de sacrifice, d'entraînement, de travail, d'espoir, de rêve qu'il lui a fallu pour accéder, *enfin*, à la première marche du podium, sa consécration ? Combien de fois s'est-il vu heureux sur ce podium devant ses proches, fiers et émus ? L'émotion et le plaisir si intenses qu'il exprime ce jour-là ne sont pas que la conséquence de sa réussite du jour, mais aussi celle d'un *attendu* qui s'est concrétisé après de nombreux efforts.

Pour revenir à notre exemple sur le tir à trois points de dos, vous aviez un objectif, un *attendu*, et vous l'avez atteint. Plus le défi est grand, plus l'attente est grande et plus le plaisir associé à la réussite est intense. Le Cid de Corneille l'aura bien compris : « *À vaincre sans péril on triomphe sans gloire* »...

- *La motivation*

Réussir ne suffit pas, il est nécessaire que le système cérébral se soit également engagé dans l'attente de cette réussite. L'engagement du système cérébral pour tout effort, tout travail, toute mobilisation énergétique représente le sacrifice qu'est prêt à produire le cerveau pour concrétiser la réussite qu'il attend

avec impatience. La concrétisation de cette réussite tant attendue activera le système de la récompense et, avec lui, tout son cortège de sensations agréables.

Par ce système, le cerveau entre dans un cercle vertueux d'engagements et de concrétisations. Les récompenses qu'il s'autoattribue pour ses efforts concédés dans un objectif précis alimentent d'autant sa mémoire émotionnelle et autoentretiennent ses prochains engagements et ses prochains attendus de réussite. La réussite seule ne suffit pas, il faut pouvoir également *s'engager dans le processus de réussite*. Cet engagement est *la motivation*.

Un cerveau a besoin de connaître les conséquences de son engagement, de ses attendus et de la concrétisation de ceux-ci. Si petite que soit cette concrétisation, elle aura la même valeur à l'échelle cérébrale, car elle aura engagé le système de récompense en entier. Un cercle vertueux peut s'amorcer.

Reconnaître les réussites

Pour motiver un jeune cerveau, il est important de lui signaler quand il va dans le bon sens. Des blocages peuvent exister chez les élèves. Cependant, toute progression même la plus petite peut prendre la forme d'un succès et devrait pouvoir être soulignée comme telle par l'enseignant ou par le parent. Le jeune cerveau a besoin de reconnaître quand il s'engage à bon escient par ses efforts.

Formaliser des attendus, précurseurs des récompenses à venir, peut aider à obtenir de petites réussites.

Un cerveau jeune doit comprendre, cependant, qu'il n'y a pas de *petites réussites*, il y a des réussites tout court. Les marches conceptuelles que l'élève franchit ne sont parfois pas très hautes, mais elles ont le mérite de le diriger dans la bonne direction : l'enfant regarde vers le haut, ses attendus augmentent et sa motivation aussi.

Zoom sur

La drogue : récompense par piratage

Le système de la récompense est très puissant, car il permet au cerveau de sélectionner et de favoriser les comportements et les efforts qui lui sont les plus

profitables. Pour mériter sa récompense, le cerveau doit réussir après s'être engagé en termes comportemental et énergétique.

C'est le cas du sportif qui parvient à exécuter un mouvement complexe après des mois d'entraînement, du musicien qui parvient à maîtriser une partition majeure, de l'élève qui comprend enfin la solution à son problème de mathématiques, etc. Combien d'efforts et d'engagements ont-ils été nécessaires ? Le plaisir associé à ces réussites en sera d'autant plus grand. La récompense témoigne de l'achèvement.

Mais qu'en est-il lorsque le système de la récompense est forcé de libérer sa dopamine sans que le cerveau entier ne se soit engagé ou n'ait réussi quelque chose ? Cette tromperie est le résultat de l'action de pirates du système, bien connus et particulièrement dangereux : les drogues.

Chaque drogue ou substance addictive, quelle qu'elle soit, agit directement ou indirectement sur le système de la récompense. La drogue parvient à duper le système en lui faisant croire que réussite, attendus et engagement ont bien été combinés et qu'une récompense est méritée.

Plus la drogue est dite « *dure* », plus le système sera pris au piège. Les conséquences de ce piège peuvent être fatales. En effet, les neurones dopaminergiques, forcés de décharger à cause de la drogue, vont progressivement s'épuiser. Ce qui explique entre autres que les prochaines prises de drogues auront toujours des effets moindres, ce qui incitera le consommateur à augmenter les doses pour obtenir les mêmes effets. Pour certaines drogues dures comme la cocaïne, la spirale d'augmentation des doses associée à la sursollicitation permanente des neurones peut conduire à une excitotoxicité massive (les neurones meurent de s'être trop activés) : c'est *l'overdose*.

Toute drogue, *quel que soit son type (héroïne, cocaïne, cannabis, nicotine, etc.)*, sa *quantité et sa fréquence de prise*, modifie à la fois la structure et la fonction cérébrales. Or, le cerveau est électriquement et chimiquement d'une très grande précision. Toute modification, notamment du système de la récompense, peut en altérer profondément son fonctionnement total. Le système de la récompense étant une puissance majeure de l'organe, toute conduite addictive nécessitera donc un fort accompagnement personnel et médical, le plus rapidement possible.

Gardons à l'esprit que le choix de la première prise appartient à l'individu mais que les suivantes seront progressivement l'apanage de son seul système de la récompense. Consommer de la drogue, c'est devenir progressivement un système de *réaction* plutôt qu'un système d'*action*. Or, réagir n'est pas agir. La volonté a un prix : être faillible dans ses capacités de réussite mais les maîtriser de bout en bout.

Nous pouvons porter un nouveau regard sur le cerveau lorsque l'on comprend qu'un être qui pleure ou qui rit est un cerveau qui, par le biais de ses commandes nerveuses, s'empare de l'organisme entier pour exprimer son état.

Réceptacle des sensations et des souffrances du corps dont il a la charge, le cerveau doit ressentir pour protéger. L'expression de ce vécu sensible peut déborder de la sphère cérébrale pour toucher l'ensemble des composantes physiologiques et corporelles : ce sont les émotions. Puissances primordiales du système, elles conditionnent des comportements protecteurs, aident à l'ancrage de certains souvenirs, participent aux décisions-personnelles et poussent l'organe dans l'accomplissement de tous ses buts en lui fournissant le petit plus qui fera la différence. Sans sa sensibilité, le cerveau ne trouverait pas la motivation nécessaire pour concéder les importants efforts énergétiques qui le feront progresser. Toujours tendu vers la récompense de ses accomplissements, le cerveau peut s'engager pour s'améliorer en permanence.

Dans un cerveau humain aux capacités d'introspection et de verbalisation exacerbées, cette sensibilité prend une nouvelle dimension : l'organe peut comprendre pourquoi il souffre. Nos créations artistiques, notre poésie, notre philosophie, notre éthique sont quelques-unes des conséquences (parfois émotionnellement difficiles) de cette compréhension.

Un cerveau est à la fois riche et fragile de sa sensibilité. Cette double valence constitue la différence majeure entre un cerveau humain et un cerveau artificiel. Mais pour combien de temps encore ?...

3 NOTIONS À RETENIR

- Le cerveau est un organe d'une profonde sensibilité.
- Les émotions participent activement aux processus mnésiques et décisionnels.
- La motivation représente une anticipation de l'organe sur la récompense qu'il s'octroiera pour avoir accompli ses objectifs.

2 - Quand le cerveau se regarde et

regarde l'autre

L'organe cérébral est capable de multiples stratégies d'interactions avec son environnement. Dirigé vers l'extérieur, le cerveau mobilise ses capacités attentionnelles. Mais que se passe-t-il lorsqu'il se dirige vers lui-même ? Se comprendre lui-même sert-il le cerveau, organe social par excellence, à comprendre les autres ?

Le réseau de repos : se placer au centre

Ce n'est que depuis quelques années que nous savons que le cerveau fonctionne selon deux modes très différents : un mode dirigé vers l'extérieur et un mode dirigé vers l'intérieur. Si le premier mobilise, notamment, les régions cérébrales constitutives du réseau attentionnel, le second est porté par un réseau cérébral qui permet au cerveau de se centrer sur lui-même, sur ses pensées et sur son vécu.

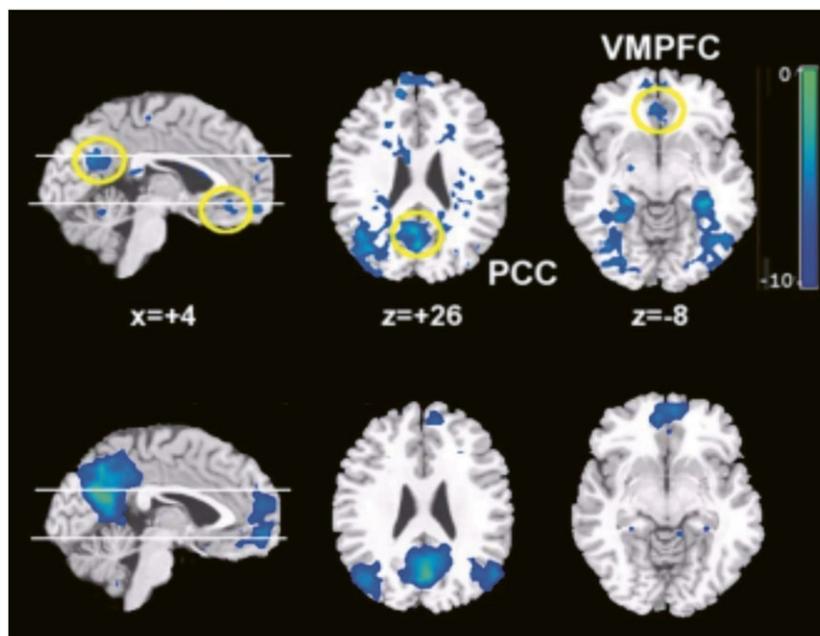


Figure 32 : Le réseau de repos (d'après Sridharan et al., 2008)

Ce mode d'activation pour lequel le cerveau est dirigé vers lui-même a été observé en neuro-imagerie fonctionnelle lorsque que les sujets n'avaient aucune tâche précise à faire et qu'ils

laissaient aller leurs pensées. Initialement (et abusivement) nommé « mode par défaut du cerveau », il est désormais appelé *réseau de repos*, car il a été découvert que, pendant cette activité de rêvasserie, le cerveau était, en fait, bien plus occupé qu'il n'y paraissait (voir fig. 32).

En effet, les régions impliquées dans ce réseau (notamment le précunéus, le cingulum postérieur et des sous-régions des lobes préfrontaux et pariétaux) sont, en partie, support de nos mémoires autobiographiques et de notre mémoire du futur, c'est-à-dire de notre projection personnelle dans d'éventuels scénarii à venir. Lorsque le cerveau active ce mode de fonctionnement, on a ainsi supposé que le cerveau était centré sur lui-même et utilisait ce temps pour orchestrer et combiner l'ensemble de ses expériences personnelles en un tout cohérent temporellement.

Il existe une balance fonctionnelle d'activation entre le réseau cérébral dirigé vers l'extérieur (profondément attentionnel) et ce réseau de repos (profondément autocentré), à savoir que, lorsque l'un s'active, l'autre se « dé-active⁷ ». Ainsi, le cerveau *bascule* régulièrement et en permanence d'un réseau (mode) à l'autre.

Zoom sur Robuste mais fragile

L'activation du réseau de repos est très homogène d'un individu à un autre, ce qui le rend particulièrement robuste. Cependant, la recherche actuelle s'étonne de le voir altéré, de manière plus ou moins importante, dans un grand nombre de pathologies neurologiques.

Il est intéressant de constater que la bascule vers le réseau de repos se fait de manière totalement involontaire. Ces bascules, et donc ces activités de rêvasserie, peuvent apparaître consécutivement à une fatigue générée par un maintien attentionnel trop poussé ou par une pensée personnelle

impérieuse parfois en lien avec un contenu informatif qui vient de nous être soumis. Combien d'entre nous, ayant assisté à une conférence ou à une réunion, ont pu se rendre compte, *a posteriori*, qu'ils en avaient perdu le fil ? Pris dans leurs pensées, parfois induites par une information qu'ils venaient d'entendre, ils décrochent leur attention et leur regard des intervenants, avant de revenir un peu plus tard, déphasés, dans le fil de la discussion.

Ces expériences, que chacun de nous a pu connaître, sont particulièrement intéressantes à comprendre à la lumière de la dynamique cérébrale. Un cerveau saturé, et/ou qui a besoin de traiter une information à l'échelle personnelle, stopperait ses entrées en provenance du monde extérieur pour se concentrer exclusivement sur lui-même. Cette pensée impérieuse serait traitée à l'échelle du cerveau au regard de ses effets immédiats, de sa relation avec des expériences passées et de l'ensemble de ses implications futures. Le cerveau se focalise sur lui-même pour orchestrer les différentes dimensions temporelles de la pensée impérieuse à traiter. Il ne devient plus disponible pour se concentrer sur l'extérieur.

La bascule vers le réseau de repos peut donc s'apprécier selon ses deux valences :

- la *mise au repos* du réseau orienté vers l'extérieur et donc *des régions attentionnelles* impliquées. En effet, rappelons-nous que l'activation d'un réseau provoque la dé-activation de l'autre. Dans ce cas-là, la bascule agirait comme une soupape de sécurité pour préserver les régions attentionnelles ;
- la *mise en action d'un mode autocentré* favorable à des compilations d'informations en accord avec toutes les dimensions de notre « timeline » personnelle.

Rêvasser n'est donc pas ne rien faire ! La rêvasserie est un témoin potentiel d'une saturation attentionnelle et/ou d'un besoin du cerveau pour se focaliser sur lui-même afin de

« compiler » une information.

Dans les deux cas, la répercussion en pédagogie est majeure. En effet, il est à savoir que les capacités attentionnelles en continu chez l'enfant ne dépassent généralement pas 15 minutes. Au contraire de l'adulte qui peut atteindre en moyenne les 45 minutes d'affilée. Ce qui signifie que le réseau attentionnel d'un cerveau adulte a plus de capacités pour « tenir la charge » sur le long terme que celui d'un enfant. On comprendra alors aisément que l'activité de rêvasserie a une plus grande probabilité d'occurrence chez le cerveau jeune.

Gérer les bascules pour limiter l'inattention

Afin de gérer ces épisodes de rêvasserie, qui arriveront quoi qu'il arrive, il est important d'y être attentif et d'essayer de comprendre ce qui les a motivés. Est-ce que cela intervient en fin de journée, après un contenu informatif conséquent, chez un élève isolé ou chez plusieurs ? Les réponses à ces questions conditionneront la réponse pédagogique, par exemple alterner les tâches à demandes attentionnelles variables ou laisser un temps de pause après un effort attentionnel important. Quand l'attention a été très soutenue, que des concepts majeurs qui nécessitent une activité de compréhension ont été transmis, il est primordial de laisser le système cérébral de l'enfant les digérer.

Le temps de pause nécessaire peut varier d'un individu à l'autre, aussi est-il délicat de conseiller une durée plutôt qu'une autre. Cependant, le but n'est pas d'encourager la rêvasserie de l'élève mais de l'accompagner pour en limiter les conséquences éventuellement délétères comme l'inattention.

Quoi qu'il arrive, le système attentionnel d'un cerveau jeune devra se fortifier et les bascules devront diminuer. Mais le but n'est pas de les supprimer. Leur présence est pérenne (tous les adultes continuent de les vivre), car leur intérêt est majeur pour l'organe. Un équilibre doit être trouvé chez le cerveau jeune pour que ces temps de pauses et de réflexions sur lui-même bénéficient à sa dynamique d'apprentissage.

Ainsi, un élève qui rêve n'est donc pas toujours un élève qui ne s'intéresse pas au cours. Parfois, son cerveau en a juste besoin (voir encadrés « Gérer les bascules » ci-dessus et « Savoir s'ennuyer » ci-dessous).



Savoir s'ennuyer

S'ennuyer, c'est ne plus avoir d'objet d'intérêt direct susceptible d'être capté par notre focus attentionnel. Toujours à la recherche de quelque chose à faire, à voir et à toucher, les enfants (de plus en plus depuis l'avènement du numérique) ont beaucoup de difficultés à rester centrés sur eux-mêmes et à s'ennuyer. Pourtant, ces moments sont propices, à l'échelle cérébrale, à l'introspection, à la réflexion sur son vécu et à l'anticipation de son futur. Savoir s'ennuyer, c'est utiliser un temps aut centré pour compiler ses acquis et dessiner les contours de ses projets à venir.

Le réseau de repos est un mode d'activation qui permet au cerveau de se déconnecter de son environnement extérieur. Consécutivement à une surcharge attentionnelle ou par nécessité de se focaliser sur des réflexions personnelles, sa mise en jeu constitue une stratégie indispensable à tout fonctionnement cérébral.

L'activité de rêvasserie doit perdre sa connotation péjorative car, comprise et maîtrisée, elle peut bénéficier à une démarche pédagogique optimisée.

Le cerveau, plus particulièrement le cerveau jeune, s'échappe régulièrement et invariablement de son attache au monde extérieur. Mais pour *mieux* y revenir...

La théorie de l'esprit : comprendre l'autre

Il est une capacité cérébrale qui fait de nous des êtres profondément sociaux.

La *théorie de l'esprit* n'est pas une théorie mais une *capacité*. Elle représente la capacité d'un individu à *attribuer des états mentaux* (pensées, croyances, sentiments, désirs...) aux autres et à soi-même. Cette capacité est à la base de *l'empathie*. C'est parce que je sais et que je comprends ce que l'autre ressent que je suis à même de compatir à sa souffrance ou à sa tristesse. C'est parce que nous avons nous-mêmes déjà vécu des émotions *et* parce que nous avons compris que l'autre les vivait que nous pouvons nous mettre à sa place. Des

comportements correcteurs de l'émotion d'autrui peuvent alors éventuellement émerger, comme le prendre dans nos bras. En soignant l'autre, on se soigne d'abord soi-même.

Ainsi que précisé, la théorie de l'esprit dépasse la simple capacité d'empathie, elle rayonne sur et au travers de l'ensemble du vécu de l'autre. Elle peut ainsi permettre de comprendre, d'expliquer, de prédire, et même, de manipuler le-comportement d'autrui. La notion de prédiction doit à nouveau nous mettre la puce à l'oreille : la théorie de l'esprit est une capacité cérébrale qui engage effectivement fortement les régions préfrontales. Par cette implication, cette partie du cerveau est, notamment, nommée « *cerveau social* ».

Par ailleurs, le réseau cérébral supportant la théorie de l'esprit recouvre en partie celui associé au réseau de repos. Ainsi, se focaliser sur l'autre semble s'apparenter à se focaliser sur soi-même... (voir encadré page suivante)

Pour appréhender la théorie de l'esprit, voici quelques exemples :

- « Je sais que tu sais. »
- « Je sais que tu sais que je sais. »
- « Je sais que tu sais que je sais que tu sais », etc.

Ainsi que nous pouvons le comprendre, ces phrases sont déclinables à l'infini, notamment par l'ajout de négations et de pronoms : « Je sais qu'il ne sait pas que nous savons qu'ils ne savent pas... » Dans ce nouvel exemple, nous pouvons observer toute la subtilité de nos connaissances (ou de nos supputations) quant aux pensées et réflexions internes de l'autre pris en tant qu'individu ou en tant que groupe.

La théorie de l'esprit nous permet de nous mettre, non seulement, à la place de l'autre mais également d'entrevoir le monde au travers de ce que l'on suppose être ses connaissances et ses savoirs. Que sait-il de ce monde ? En

sait-il plus que moi ? En sais-je plus que lui ? Par cette capacité cérébrale, il devient possible de distinguer un savoir individuel d'un savoir partagé.

Zoom sur Les neurones miroirs

Nous connaissons l'existence des neurones miroirs depuis les années 1990. Il a été mis en évidence que des neurones particuliers du cerveau s'activaient de manière identique que nous faisons nous-mêmes une action ou que nous voyons un autre la faire. Mais attention, nos neurones ne s'activent pas en accord avec un mouvement particulier, mais en accord avec son *intention*, c'est-à-dire sa *finalité*. Typiquement, nos neurones miroirs ne s'activent pas à la vue du mouvement de la main d'un individu, ils s'activent à la vue de la main d'un individu saisissant, par exemple, un objet. C'est *l'interaction* entre l'individu et l'objet qui fait émerger un *but à l'action*. Nos neurones miroirs ne s'activent qu'à la vue de cette *finalisation d'action et d'interaction* mais pas aux différents mouvements qui y ont conduit.

Les neurones miroirs sont présents, notamment, dans le système prémoteur (lobe frontal), mais également dans d'autres régions cérébrales comme le lobe pariétal inférieur, l'hippocampe, l'aire de Broca ou encore l'insula. Compte tenu de la diversité des localisations cérébrales impliquées, le concept de neurones miroirs a laissé la place à la terminologie de *système miroir*. Ce système est supposé permettre à tout cerveau d'apprendre par imitation, ce qui expliquerait en partie l'acquisition du langage chez l'humain.

Le système miroir pourrait représenter une stratégie cérébrale à l'échelle de l'organe entier pour repérer les finalités d'action des individus en relation avec le même monde extérieur que nous. On suppose que la théorie de l'esprit serait une vision plus globale et plus cognitive que le système miroir, qui, lui, concernerait plus spécifiquement nos intentions motrices.

Dans les deux cas, il est intéressant de constater que ce qui nourrit la compréhension par un cerveau de son monde extérieur et de lui-même, c'est toujours l'autre...

Se mettre à la place de l'autre et voir le monde au travers de ses savoirs (même supposés) nous permet d'appréhender et d'anticiper ses réactions. Cette capacité est utilisée en permanence dans notre vie de tous les jours, dans nos interactions au sein de notre cellule familiale, dans notre cercle-amical, professionnel, jusqu'aux nations entre elles (géopolitique, renseignement).

Comprendre l'autre

La théorie de l'esprit nous apprend que le cerveau recherche en permanence à comprendre l'autre. Comprendre l'autre, c'est aussi et avant tout se comprendre soi-même en évoluant dans ses interactions, dans ses buts, dans ses réflexions et dans ses gestions émotionnelles.

Un jeune cerveau a besoin d'aide pour appréhender les vécus, notamment émotionnels, des individus qui l'entourent. Du fait de son immaturité cérébrale, le jeune cerveau exprime une certaine cécité vis-à-vis des états mentaux des autres, l'accompagnement par les adultes pour appréhender ces vécus est donc primordial.

Encourager l'enfant à exprimer ce qu'il ressent et à écouter ce que ressentent les autres est essentiel au développement de l'ensemble de ses aptitudes sociales mais également à son bien-être personnel.

Comme précédemment dit, une partie du réseau cérébral sous-tendant la théorie de l'esprit trouve son siège dans les régions frontales. Régions qui, nous le rappelons, ont un temps de développement et de maturation particulièrement long. Nous comprenons alors aisément que cette capacité soit encore immature chez un jeune enfant.

Pour l'illustrer, prenons l'exemple de la maman qui prépare un gâteau à son enfant de 4 ans et qui, dans sa volonté de bien faire, rate ledit gâteau. À la question : « Est-ce qu'il est bon mon gâteau ? », tout adulte, sensible aux émotions de la cuisinière et à ses intentions louables, acquiescera de la tête. Au contraire de l'enfant de 4 ans qui lâchera, sans complaisance, un « non » ferme et massif... L'expression « la vérité sort de la bouche des enfants » ne trouvera pas ici plus bel exemple. Effectivement, l'immaturité des régions cérébrales nécessaires à la compréhension des émotions de l'autre, de ses réactions et de ses réflexions empêche le jeune enfant d'en prendre toute la mesure. Ce n'est pas qu'il ne le pourra mais qu'il devra absolument être accompagné pour cela, car le développement de ces régions s'opère sur un grand intervalle de temps. Or, pour un enfant, comprendre l'autre est nécessaire pour pouvoir adapter l'ensemble de ses comportements en société.

Attention cependant, nous ne pouvons pas dire avec exactitude à quel âge cette capacité sera pleinement mature et donc à quel moment l'enfant évitera de faire de la peine à sa maman cuisinière. Car, parfois, il est bien possible qu'il le fasse exprès !

Le cerveau navigue en permanence entre une focalisation centrée sur son univers extérieur et une focalisation centrée sur lui-même. Cette bascule régulière d'un réseau à forte dominante attentionnelle vers le réseau de repos permet au cerveau de se déconnecter régulièrement du monde extérieur pour mieux y revenir. Le cerveau profite de ce temps autocentré pour retracer ses souvenirs et envisager les futurs. Il orchestre, coordonne et archive.

Notre construction cérébrale, particulièrement celle de nos régions préfrontales, nous rend capables non seulement de nous centrer sur nous-mêmes mais également de nous mettre à la place de l'autre. Penser sur soi-même ou penser à travers l'autre repose sur des processus cérébraux très similaires.

Au travers de la compréhension de ses émotions, de ses savoirs et de ses interactions avec le monde extérieur, le cerveau, organe social par excellence, a profondément besoin de l'autre pour progresser lui-même.

3 NOTIONS À RETENIR

- Le réseau de repos constitue un mode de fonctionnement cérébral qui permet de reposer les régions attentionnelles pour se concentrer sur soi-même.
- Rêvasser est un temps d'inattention nécessaire.
- Le cerveau a besoin de voir les actions et de comprendre les ressentis et pensées de l'autre pour progresser lui-même.

3 - Le cerveau à l'ère du numérique et de l'intelligence artificielle

Les technologies numériques représentent une évolution majeure de nos sociétés. Fruits de nos cogitations, elles

nourrissent en retour et à bien des égards les besoins de notre cerveau. Devenues un pan essentiel de notre quotidien, ces technologies sont désormais à l'orée d'en prendre la place centrale, là où converge l'ensemble de nos savoirs, de nos compétences, de nos apprentissages jusqu'à nos décisions.

Dans nos mondes modernes du tout numérique, quelle est la place d'un cerveau apprenant ? Quelle est la place d'un cerveau agissant ? Quelle est finalement la place d'un cerveau humain ?

L'outil numérique : ami ou ennemi ?

Le développement du numérique auquel nous assistons depuis plusieurs années peut, d'une certaine façon, s'apparenter au développement de l'imprimerie. En effet, portés par une technologie révolutionnaire, tous nos savoirs deviennent fortement *transmissibles* entre personnes et *accessibles*, de manière indépendante et autonome, à l'échelle individuelle.

Comme il y a eu un avant et un après l'imprimerie, il y aura un avant et un après le numérique. Ainsi que nous pouvons le comprendre, rejeter le numérique serait comme rejeter l'imprimerie, ce serait un non-sens. Le numérique est et sera présent dans nos sociétés. La réflexion qui doit s'amorcer concerne la place que nous déciderons d'accorder durablement à cet outil.

En effet, si l'outil numérique peut être considéré comme révolutionnaire, il n'en reste pas moins, et avant tout, un *outil*. Cependant, ainsi que nous allons le voir, nos sociétés (et nos cerveaux) créent les conditions idéales pour que cet outil puisse s'émanciper de son rôle, potentiellement à nos dépens.

Stratégie à moindre coût et illusion des savoirs

Un des avantages qu'offrent nos technologies numériques, avantage largement plébiscité par nos cerveaux énergivores, est la stratégie permanente du moindre effort. En effet, toute information peut être trouvée en un temps record et avec un

coût métabolique minimal. La somme d'efforts à fournir s'en réduit d'autant. Nul besoin d'aller chercher l'information dans des bibliothèques physiques, au fin fond de livres mal indexés, l'information nous parvient au contraire avec une facilité déconcertante à coups de mots-clés, de tags et même de reconnaissance phonétique... En effet, dans les applications de dictionnaire, « *farmacie* » sera repéré par le logiciel qui nous amènera bien vite à la définition effective de « *pharmacie* ». Là où le lecteur d'un dictionnaire physique aurait à y réfléchir à deux fois concernant les orthographes alternatives au son [f] (car sans cela, trouver la bonne page relèverait d'un hasard quasi miraculeux), l'utilisateur de l'application tombera en un clic sur la bonne définition. Nous pouvons d'ailleurs soulever une première interrogation légitime : lequel des deux se souviendra le mieux que « *pharmacie* » commence par « *ph* » ? Celui qui a peiné devant son dictionnaire papier ou celui qui a écrit comme il parle ?...

Si un cerveau peut faire autant avec moins, il le fera. La stratégie du coût énergétique minimal conduit tout cerveau à particulièrement apprécier nos applications de recherche par mots-clés, nos applications encyclopédiques ou médicales, nos logiciels de correction orthographique et grammaticale, nos outils de traduction instantanée, ou encore nos GPS qui nous donnent notre position exacte sans avoir eu besoin d'étudier une carte.

Il est, cependant, intéressant de constater, par exemple, que plus un cerveau utilise des applications GPS, moins il est capable de se déplacer sans... En effet, l'hippocampe, n'ayant plus besoin de coder l'ensemble des paramètres de nos localisations spatiales, se comporte en sens inverse de celui des chauffeurs de taxi londoniens. La fonction fait l'organe, si la fonction n'est plus, l'organe se rouille.

L'accès facilité à toutes les connaissances au travers d'applications ou de moteurs de recherche fait qu'il est bien

moins coûteux pour un cerveau de connaître avec précision le *chemin d'accès en externe* vers ces savoirs que de les *conserver en interne* sur des réseaux neuronaux dédiés. Dans le premier cas, il lui suffit de *connaître le lien* vers la base de données externe ; dans le second, il lui est nécessaire de *créer* la base de données en interne. Le cerveau fera un choix directement dicté par sa consommation énergétique : sauvegarder une seule information (le lien) au détriment de toutes les autres (la base de données). L'accès facilité à toute connaissance, quelle qu'elle soit, donne ainsi au cerveau, particulièrement au cerveau jeune, *l'illusion de mémoire* et donc *l'illusion des savoirs*.

Or, savoir où trouver l'information n'est pas l'avoir conservée. Confondre le chemin d'accès vers la bibliothèque avec la bibliothèque elle-même conduit les cerveaux (plus particulièrement les cerveaux jeunes), dépendants de ces bases de données déportées, à la fausse impression d'avoir bien encodé les informations pertinentes et de pouvoir les réutiliser à la demande. Mais si le chemin est rompu, aucun réseau neuronal ne sera utilisable en secours. Sans l'outil numérique, support de ces chemins, le cerveau s'isole de ses connaissances. Il raisonne à vide (voir encadré ci-dessous).

Pensée élaborée et notion d'influenceur

Si les informations ne sont pas présentes et disponibles en permanence dans le cerveau, comment les associer les unes avec les autres ? Pour catégoriser, manipuler des concepts, avoir une pensée plus construite, il est nécessaire de posséder des concepts et des informations qui coexistent ensemble en mémoire. Or, une base de données extériorisée ne peut pas autoriser une manipulation élaborée de concepts en interne.

Pire, un cerveau qui se contente de savoir où trouver l'information sans se préoccuper de la conserver dans sa propre mémoire fera davantage confiance à l'hébergeur de cette base de données externe qu'à lui-même : c'est la notion d'*influenceur*, particulièrement puissante chez les jeunes. L'influenceur représente l'aboutissement d'une stratégie cérébrale à moindre coût : « pas besoin de le savoir moi-même, je sais *qui* saurait »...

Ne pas avoir assez de données en interne oblige le cerveau à s'en remettre à

des données extérieures et à les croire sur parole. Cette problématique n'est pas spécifique au numérique, elle apparaît à chaque fois que le cerveau n'a pas assez de données pour traiter une situation. Cependant, les stratégies de moindre effort, associées à beaucoup de nos outils numériques, sont susceptibles d'aggraver cette tendance. Ainsi, de l'écoute d'un influenceur à l'abandon de son esprit critique (voir encadré page suivante), la frontière peut devenir très mince...

Un cerveau jeune doit pouvoir s'appuyer sur une base de savoirs et de connaissances interne nécessaire au développement de ses capacités de réflexion et de compréhension.

Appétence naturelle et conséquences attentionnelles

Tous nos outils numériques, en premier lieu les ordinateurs, les téléphones ou les tablettes, sont conçus pour être profondément intuitifs. À l'utilisation de ces outils, le cerveau constate très rapidement que dans ces sphères parfois très réduites (comme un téléphone) peuvent s'exprimer des possibilités d'interactions quasi infinies. Nonobstant leur pertinence informative, les outils numériques offrent tout un panel d'interactions sensori-motrices : les couleurs sont vives, le son est présent et modulable, il existe des effets visuels comme la perspective ou le relief, il est possible d'agir dessus par différents moyens, en glissant, en tapotant, en pinçant, etc.

Un cerveau jeune recherche toujours activement à entrer en interaction avec son environnement extérieur. Ces outils numériques sont capables de puissamment combler cette quête naturelle. Le cerveau peut ainsi développer une très grande appétence pour ces interactions avec les objets numériques. Plus ils seront donnés précocement dans le développement de l'enfant, plus cette appétence sera marquée.

Zoom sur

L'esprit critique : l'indépendance du raisonnement

En sciences, la « critique » n'est pas péjorative. Bien au contraire, elle est le fondement de tout raisonnement scientifique.

La science représente, à la fois, l'étude des faits (biologiques, physiques,

chimiques, etc.) et la proposition de théories rassemblant ces faits en un tout cohérent et explicatif. Mais attention, ces théories ne sont jamais des vérités. La vérité peut être considérée comme la seule théorie qui concorde avec tous les faits. Or, de par nos limites conceptuelles et expérimentales, nous ne pouvons pas avoir accès à tous les faits. Aucune vérité absolue ne peut donc être obtenue en sciences.

De plus, l'un des fondamentaux de la science, la statistique, constitue une deuxième contrainte. La statistique utilise des règles mathématiques qui associent à tout résultat scientifique une probabilité d'erreur.

En effet, *a minima*, tout résultat scientifique, validé statistiquement, conserve tout de même une probabilité d'être faux à hauteur de 5 %. Plus la méthode d'expérimentation scientifique est rigoureuse et robuste (grands échantillons, reproductibilité de l'expérience, etc.), plus les probabilités d'erreur s'abaisseront mathématiquement à 1 %, 0,1 %, 0,01 %, 0,001 %, etc. Ainsi, plus notre probabilité d'erreur est basse, plus notre théorie se rapproche de la vérité, mais sans jamais l'atteindre, car la probabilité d'erreur (et donc la part du doute), bien qu'infinimentale, restera mathématiquement toujours non nulle. Ainsi, en sciences, pour toute théorie scientifique, quelle qu'elle soit, sa statistique ne nous autorise jamais à affirmer que nous avons raison, elle nous autorise à supposer que nous n'avons pas tout à fait tort...

Comme il est impossible de s'affranchir totalement de cette part de doute, la pensée scientifique suit une règle majeure : la possibilité d'une remise en question permanente de toutes nos théories. C'est le commencement de l'esprit critique. L'esprit critique est une attitude : parce que je sais qu'aucune vérité n'est absolue alors je dois conserver de la distance et me fonder sur une puissante analyse critique (rigueur et méthode) pour toute information/théorie portée à ma connaissance. L'esprit critique n'a pas vocation à rejeter toute théorie en bloc, il s'assure que celle-ci concorde effectivement avec tous les faits connus et que sa part de doute est la plus faible possible. L'esprit critique est une démarche qui permet à tout individu, enfant compris, d'accéder à une indépendance totale de son raisonnement.

Les objets numériques peuvent même devenir prioritaires en termes de cibles attentionnelles de l'enfant perturbant d'autant son attention globale. Sachant que l'état de concentration est particulièrement difficile à remobiliser lorsqu'il est perturbé (notamment chez l'enfant), il est donc compréhensible qu'un téléphone à portée de main constitue un distracteur majeur que l'enfant (comme parfois aussi l'adulte) aura beaucoup de mal à inhiber (voir encadré page suivante).

Appétence au numérique et sommeil

Le jeune cerveau peut développer une forte attraction pour l'utilisation des objets numériques, attraction qu'il aura beaucoup de mal à inhiber du fait de son immaturité cérébrale. Il devient alors plus que probable que l'objet soit utilisé dans le cadre de la chambre à coucher de l'enfant.

À cela s'ajoute que l'usage en question est susceptible de provoquer un état d'énervement et d'agitation non propice à l'endormissement. Or, le sommeil est une période cruciale qui doit être fortement préservée chez un cerveau en développement.

Aussi, il conviendrait de retirer de la chambre à coucher de l'enfant les objets numériques, tels que le téléphone ou la tablette au moins une heure avant d'aller au lit.

L'importance de l'écriture manuscrite

Si le numérique a révolutionné un domaine, c'est celui de nos productions scripturales. Plus besoin d'écrire à la main ou d'utiliser l'imposante machine de Gutenberg, tout un chacun peut produire au clavier, face à son écran, un texte à l'écriture codifiée, lisible et directement transmissible. Le bond technologique pour notre productivité et nos capacités de création en est majeur. Nos idées peuvent plus facilement se rédiger, s'afficher et s'échanger.

Dans un monde où la lecture, l'écriture et la pensée préexistent au numérique, l'avènement de celui-ci en potentialise les capacités. Quid de l'utilisation de cet outil par un cerveau en développement qui apprend à lire et à écrire ? Le numérique constitue-t-il un outil potentialisateur de ses performances ?

Le cerveau, comme régulièrement souligné dans cet ouvrage, se nourrit de ses expériences motrices et sensorielles pour soutenir et potentialiser l'ensemble de ses apprentissages. Ainsi que précédemment démontré dans le chapitre sur la plasticité, nous *vivons* notre pratique musicale comme nous *vivons* notre pratique sportive ou notre pratique langagière.

En effet, un langage se vit corporellement. Le moteur et le sensoriel font partie intégrante de nos apprentissages langagiers jusqu'à l'écriture, support de celui-ci. Un mot que l'on

écrit à la main diffère d'un autre selon l'expérience corporelle qui lui est associée. Écrire un mot, c'est, par le jeu d'une procédure motrice et des *feed-backs* sensoriels, lui donner un *relief* cérébral. L'écriture manuscrite n'est pas que la représentation d'un mot associé à une pensée, c'est une *pensée corporalisée*. À l'écriture d'un mot, des règles émergent (d'orthographe, de grammaire, d'étymologie, etc.) au fur et à mesure que les syllabes naissent et s'associent. L'écriture manuscrite est un voyage *actif* dans l'univers de son langage. Elle fait notamment appel à nos capacités motrices les plus élaborées dites *motricité fine*, les mêmes qui ont, entre autres, permis la réalisation de nos plus grands chefs-d'œuvre de peintures.

Il est ainsi particulièrement important pour le développement cérébral de l'enfant, de l'appropriation de son langage jusqu'à l'élaboration de sa pensée, de proposer un apprentissage puissant, répété et consolidé de son écriture manuscrite le plus tôt possible.

Recherche, productivité, planification

L'outil numérique peut être à bénéfice direct pour le cerveau jeune selon trois axes majeurs :

- *La recherche d'informations*. Avec l'avènement du numérique, l'accès à la connaissance, même la plus complexe, est devenu rapide et simple. Toute recherche d'informations peut permettre à l'enfant de fortement accumuler et diversifier ses savoirs. Avec une limite majeure : accompagner l'enfant quant à la fiabilité des sources et privilégier l'encodage mnésique du contenu plutôt que le lien vers ladite source.
- *La productivité*. Les outils numériques représentent des atouts de taille pour la création de contenus pertinents. Par exemple, les correcteurs orthographiques et grammaticaux constituent, notamment, des aides précieuses qui peuvent permettre à l'enfant de repérer certaines de ses erreurs. Cependant, si ces outils potentialisent les compétences, ils ne doivent pas s'y substituer. L'enfant doit pouvoir être capable de produire ces contenus sans ces aides.
- *La planification*. Tout cerveau jeune présente de grandes difficultés à appréhender le temps. Tous les outils numériques de planification (agendas, rappels, organisateurs) peuvent représenter une aide utile à l'enfant pour apprendre à gérer temporellement les exigences de son quotidien.

Illusions de l'action

Aucune des interactions entre le cerveau et l'outil numérique n'est concrète. Tapoter sur l'écran ne fait rien reculer, glisser un élément sur l'écran ne fait rien bouger dans le monde réel, pincer l'écran ne change la taille d'aucun objet. Nous pouvons alors comprendre que certains très jeunes enfants peuvent ne pas se rendre compte que le comportement de pincer pour zoomer n'aura aucun effet sur leur feuille de papier *réelle* ! Ils le font donc parfois, tout surpris de l'absence de conséquence. *L'illusion de l'action*, bien que comprise et admise par un cerveau adulte, berne plus facilement le cerveau jeune.

Interagir avec le monde, c'est pouvoir manipuler celui-ci de manière concrète, avoir des retours sensoriels divers et nombreux et s'engager corporellement à plusieurs niveaux. L'utilisation des outils numériques chez les jeunes enfants est ainsi susceptible d'altérer, parfois profondément, le besoin du cerveau de vivre corporellement l'ensemble de ses apprentissages.

Tout entier dirigé vers l'outil numérique, le corps s'efface, la pensée est concentrée sur un espace très réduit et s'exprime au travers de micromouvements de doigts. Beaucoup d'effets et de conséquences avec peu d'efforts engagés, le cerveau est naturellement attiré par ces contacts avec les outils numériques. Dans ces interactions, pour lesquelles la plus grande partie du corps est immobile, le temps suspend son vol. Les heures passent, le corps se fige, la pensée s'isole, c'est le début, notamment, des problématiques sociales (voir encadré ci-dessous).

Cerveau et jeux vidéo

Des interrogations légitimes se sont fait jour avec l'apparition du numérique telles que le danger que pouvaient représenter les jeux vidéo violents sur le

comportement de l'enfant ou les addictions qui seraient susceptibles de se développer.

Il est à noter que tous les jeux vidéo ne se valent pas. Certains jeux qui font, par exemple, intervenir les capacités de résolution de problème, de logique ou de planification peuvent se révéler pertinents pour un cerveau en développement.

Le jeu vidéo est une activité que tout cerveau peut apprécier quel que soit son âge (des adultes jouent). Du fait de cette appétence forte et pérenne, une vigilance doit pouvoir s'opérer à plusieurs niveaux :

- *L'impact émotionnel.* Les émotions représentent des puissances primordiales qu'un cerveau immature a de grandes difficultés à gérer. Ainsi, les jeux vidéo à forts impacts émotionnels tels que les jeux violents, stressants ou horribles sont à fortement proscrire chez un cerveau jeune.
- *La durée d'utilisation.* Tout jeu, quel qu'il soit, possède une pertinence développementale, en cela que l'enfant développe par le jeu, notamment, ses aptitudes motrices, sensorielles ou encore relationnelles. Cependant, le jeu doit rester une activité transitoire qui vient en complément du temps consacré aux apprentissages, aux interactions sociales et à la découverte de son monde extérieur. Si un cerveau jeune a besoin de jouer, il ne doit pas pour autant ne faire que cela. Concernant le jeu vidéo, qui est une activité souvent solitaire n'engageant que de façon très limitée les sphères motrices, sensorielles et relationnelles, il conviendrait d'en limiter l'usage chez l'enfant à une heure par jour.
- *L'impact relationnel.* Même quand pratiqué en ligne avec des amis, le jeu vidéo n'est pas une activité relationnelle au sens propre. Contrairement à toutes les autres formes de jeu qui poussent au développement et à la diversification de nos aptitudes sociales (notamment les jeux dits *de société*), un jeu vidéo est souvent vécu seul et peut être susceptible de contraindre fortement le développement de ces aptitudes sociales chez l'enfant. Le risque devient ainsi particulièrement grand que l'enfant s'isole de son entourage familial ou amical. Cet isolement peut représenter un indice révélateur de la surutilisation de jeux vidéo par un enfant.

Le cerveau social en défaut

Un outil numérique présente à la face d'un sujet qui le regarde une simple vitre (l'écran de l'ordinateur, du téléphone, de la tablette, de la télévision, etc.). Un outil numérique ne dévoile aucun visage à son utilisateur, aucune émotion. Si l'utilisateur se met en colère contre son outil numérique, celui-ci ne le sait pas.

Dans nos interactions sociales entre humains, être en colère face à quelqu'un a des effets, tout comme voir la colère chez

l'autre. Ainsi qu'abordé dans le chapitre sur la théorie de l'esprit, nous avons la possibilité, lors de nos interactions avec autrui, d'imaginer et d'anticiper ce que l'autre pense et ressent. Cette capacité ne s'applique pas à l'objet numérique de manière équivalente. Un objet numérique est un mur qui s'oppose à nos compétences sociales. Il ne réagit pas, il ne répond pas.

Dans le cadre du développement, plus l'enfant aura été en contact tôt avec l'outil numérique, plus il peut être susceptible de s'isoler dans son utilisation, diminuant d'autant ses contacts sociaux *réels*. Non entraîné à repérer les états mentaux de l'autre sur son visage de chair, de sang et d'émotions, l'enfant peut prendre du retard dans le développement de ses aptitudes sociales. Ce ne sont pas les émoticônes, maigres substituts numériques de nos états mentaux, qui sauront suffire à entraîner les compétences sociales d'un enfant. Un cerveau doit comprendre l'autre pour se comprendre lui-même, seules ses interactions sociales sont susceptibles d'entraîner ses compétences. Les problématiques d'isolement jusqu'à celles de harcèlement peuvent trouver une partie de leurs racines dans la difficulté d'un cerveau jeune à expérimenter les moyens et les occasions de voir et de comprendre les émotions et les états mentaux de l'autre.

Nous sommes des êtres sociaux qui fondons une grande partie de nos apprentissages sur des processus d'imitation et des expériences communes. Comprendre l'autre et voir le monde à travers son regard constituent une des richesses fondamentales du cerveau humain. Cette richesse se doit d'être préservée et développée dès le tout jeune âge.

Intelligence artificielle : une problématique éthique

La question se pose de plus en plus dans nos sociétés de savoir si l'intelligence artificielle pourra un jour détrôner l'intelligence humaine. L'humain, dépassé par les compétences toujours plus puissantes des ordinateurs, dominé sur tous les

plans – robustesse, endurance, erreurs réduites, voire inexistantes, manipulation et traitement de données complexes –, que lui restera-t-il ?

Stratégie et versatilité

Intéressons-nous aux premiers ordinateurs qui ont été capables de jouer aux échecs. En ce temps-là, ils ne gagnaient pas toujours, car leur puissance de calcul n'était pas assez importante pour anticiper tous les coups possibles. L'humain pouvait gagner, car il s'appuyait sur un privilège cérébral stratégique : *la réduction des choix par l'expérience*.

En effet, un joueur humain expert sait, au regard de l'ensemble de ses expériences acquises par les milliers de parties déjà faites, *qu'il est des coups qui ne donneront rien*. Inutile donc d'envisager les conséquences de ceux-ci. Mais les ordinateurs de l'époque, n'ayant pas cette « expérience vécue », se contentaient de calculer tous les coups possibles et les conséquences associées, quel que soit leur niveau de pertinence. Dépassés par les calculs à faire, ils perdaient face à des humains, au cerveau moins puissant en termes de calcul brut mais stratégiquement plus efficace.

De plus, c'était sans compter sur la volonté de l'humain de ne pas perdre face à un ordinateur. Une question d'honneur, de fierté, en un mot d'émotion. Nous avons vu toute la puissance des émotions, leurs capacités à engager le corps et le cerveau dans un processus unifié. C'est cette motivation, cette envie de gagner qui permet au cerveau de mobiliser ses ressources énergétiques, ses capacités attentionnelles et son envie de se dépasser à l'échelle de toutes ses fonctions. Le cerveau pouvait ainsi devenir compétitif face à la puissance de calcul brute d'un microprocesseur.

Mais désormais nous sommes face à des ordinateurs qui nous battent aux échecs sans autres formes de procès. Leur puissance de calcul dépasse les nôtres en dépit de toute notre

motivation et de toutes nos stratégies d'efficacité. Même pour des jeux encore plus complexes que le jeu d'échecs, notre cerveau ne suffit plus. Sa toute-puissance se heurte à un plafond de verre qu'il a lui-même construit : il a développé des puissances de calcul qui dominent la sienne propre. Sommes-nous asservis pour autant ?

Il est important d'observer l'intelligence artificielle qui peut nous battre au jeu d'échecs : elle nous bat au jeu d'échecs, certes, mais pas à la bataille navale, ni au tarot, ni à la belote, ni au saut à la perche, ni au tennis ou au violon. Pour résumer, sa domination est cloisonnée. Tout simplement parce que pour qu'une intelligence artificielle puisse maîtriser un jeu ou une procédure, quels qu'ils soient, il faut qu'elle ne fasse que cela. En comparaison, notre cerveau a des compétences multiples et transversales. Il n'est peut-être pas le meilleur pour une des compétences prises de manière isolée, mais ses capacités d'adaptation, d'évolution et d'apprentissages lui permettent de basculer d'un mode « je joue au foot » à un mode « je joue aux échecs » avec un niveau de performance honorable. Ce profil profondément protéiforme constitue la spécificité d'un cerveau vivant et une de ses plus grandes forces.

Mais, à l'ère de l'intelligence artificielle, la limite du cerveau humain, en termes de puissance de calcul brute, fait pourtant émerger une faiblesse.

Aide à la décision et problématique éthique

Initialement, l'ordinateur avait une seule fonction : faire la même activité qu'un être humain mais en beaucoup moins de temps. Gagner du temps était le critère d'utilisation initial d'un ordinateur. Prenons l'exemple d'un calcul à faire, nous pouvons effectivement le faire de tête mais, plus ce calcul sera complexe, plus il nous prendra du temps. N'est-il pas plus simple d'utiliser une calculatrice ? L'ordinateur prend en charge les tâches les plus répétitives, les plus fastidieuses pour que

nous ayons l'esprit plus libre pour d'autres tâches de création ou de résolution de problème. Si l'ordinateur était une région cérébrale, assurément il serait une structure apparentée au cervelet...

Cependant, l'outil informatique s'est développé sous la main (et le cerveau) de ses concepteurs. Grâce à l'intelligence artificielle, il est devenu bien plus qu'un outil d'automatisation. Ainsi, le programme artificiel AlphaGo, sans compter les multiples (et humiliantes) défaites successives infligées aux champions du monde du jeu de go, a inventé des coups inconnus de toute l'histoire du jeu... Des superordinateurs ont vu le jour qui, à partir d'un volume astronomique de données (le big data), sont capables de produire des *avis décisionnels* pouvant guider des stratégies médicales, économiques ou militaires. La problématique de l'intelligence artificielle apparaît alors : de capacités d'automatisation, l'ordinateur est passé à des capacités de décision. Le cervelet se prend pour le lobe préfrontal...

Lorsque, face à toutes ces données, nous n'avons pas les moyens à l'échelle d'un cerveau humain de les analyser, de les corrélérer, de les associer, en un mot de les comprendre assez pour prendre une décision qui impactera notre futur, faisons-nous plus facilement confiance en celui qui le peut ? Ne serait-ce pas là le début d'un certain *biais d'autorité* ? Effectivement, n'adoptons-nous pas la proposition de traitement de notre médecin parce que c'est lui qui a la connaissance, qui a appris et compilé l'ensemble des données médicales nécessaires à la prise de décision thérapeutique ? Nous lui remettons les rênes de nos décisions médicales. Cependant, notre médecin est un cerveau humain, sensible, compatissant et éthique qui s'inquiète de notre sort. Quid de l'ordinateur ? Lorsque la dépendance à l'outil informatique s'étend jusqu'à la sphère décisionnelle, est-ce encore un outil ?

En psychologie, il est bien connu qu'un cerveau humain a plus

de facilités à dire « oui » qu'à dire « non ». C'est d'ailleurs la base de tous nos contrats avec tacite reconduction... Serons-nous psychologiquement assez forts pour lutter, décisionnellement parlant, avec le prochain superordinateur dans des situations extrêmes, voire *éthiques* ? Gardons en tête que, de la même façon, il est des coups aux échecs qui ne donneront rien, *il est des choix éthiques qui n'en sont pas*. Parce qu'il est sensible et doué d'empathie, un cerveau humain saura faire la différence, au contraire de l'ordinateur...

Quand il est maîtrisé, l'outil numérique est capable de potentialiser l'ensemble de nos capacités. Mais, lorsque nous en sommes dépendants, il est susceptible d'affaiblir, particulièrement chez le cerveau jeune, nos fonctions cérébrales essentielles.

Si l'utilisation du numérique présente de nombreux avantages, de la procédure de chirurgie assistée au pilotage automatique des avions, une question doit tout de même se poser : considérons-nous que nous devrions toujours être capables de faire l'ensemble de ces procédures sans l'aide de l'outil numérique ? De l'homme augmenté à l'homme diminué, il n'y a qu'un pas que peuvent franchir très rapidement nos cerveaux en recherche perpétuelle du coût énergétique minimal.

Face aux défis qui se profilent, il nous est pourtant nécessaire de conserver l'ensemble de nos fonctions. Notamment, face à l'émergence d'intelligences artificielles toujours plus puissantes, les générations qui arrivent, nos enfants, devront savoir gérer leur cerveau, par nature, faillible et imparfait. C'est pourtant dans leurs imperfections cérébrales que se cache également leur plus grande force : une profonde sensibilité, seule garante de la préservation de leurs choix éthiques et humains.

3 NOTIONS À RETENIR

- L'appétence à l'outil numérique repose sur l'intérêt du cerveau pour toute stratégie

à moindre coût énergétique.

- L'utilisation de l'outil numérique peut retarder le développement des compétences sociales de l'enfant.
- La limitation intrinsèque en capacités de traitement cérébral ne doit pas bénéficier à une ingérence de l'intelligence artificielle dans nos décisions éthiques.

5. Les « efférences » d'un neurone correspondent aux fibres qui en partent, c'est-à-dire les axones. Ainsi, les efférences des régions préfrontales représentent l'ensemble des fibres axonales envoyées depuis les neurones préfrontaux vers les autres régions du cerveau. À noter : les fibres qui parviennent à un neurone sont quant à elles nommées « afférences ». Un moyen mnémotechnique pour s'en souvenir et ainsi éviter de les confondre : « afférence » / « arrive ».

6. Des efférences axonales sont envoyées par les neurones des régions préfrontales vers les neurones de l'amygdale en retour des afférences reçues de la part des neurones de l'amygdale. Cela génère une boucle : la boucle de rétroaction. Les régions préfrontales reçoivent des informations en provenance de l'amygdale (signaux de peur) et y répondent en envoyant à leur tour des informations (signaux d'inhibition) vers l'amygdale.

7. Il existe une différence entre « dé-activation » et « désactivation ». Nous pourrions présenter la désactivation d'une région cérébrale comme une baisse d'activité par rapport à elle-même tandis que la dé-activation s'apparenterait à une baisse d'activité par rapport à une référence. Pour le comprendre, nous pourrions imaginer les deux plateaux d'une balance. Lorsqu'un plateau s'élève, l'autre s'abaisse. Les mouvements des deux plateaux ne sont pas autonomes, ils se conçoivent par rapport à un tout – la balance – et se servent mutuellement de référence. Ainsi, lorsque le réseau attentionnel s'active (son plateau monte), le réseau de repos se dé-active (son plateau descend) et inversement. Il existe une balance fonctionnelle entre ces deux plateaux et donc entre ces deux modes de fonctionnement du cerveau.

Conclusion

Rien n'est figé. Dans notre organe cérébral, de sa structure à sa fonction, tout est en mouvement. À tous les âges, le cerveau est en perpétuelle recherche de son fonctionnement optimal et de l'adéquation parfaite entre ses comportements et son équilibre intérieur.

Structure la plus complexe du monde connu, le cerveau peut adapter, modifier, optimiser, à chaque seconde, l'ensemble de son écosystème. Profondément dynamique, il peut apprendre et retenir des informations pour mieux prédire les conséquences de toutes ses décisions.

Responsable d'un corps dont il dépend entièrement pour sa propre subsistance, le cerveau n'est pas qu'une simple tour de contrôle douée d'actions et de réactions. C'est un organe raisonné capable de s'appuyer sur sa sensibilité pour anticiper le meilleur de ses futurs possibles.

Poursuivant une logique de fonctionnement à coût énergétique minimal, le cerveau oscille en permanence entre besoins, économie et motivation. Un équilibre subtil qui, dans sa phase de développement, a les défauts de ses qualités. Non maîtrisées, ses fonctions peuvent se retourner contre lui. Les conséquences des états émotionnels sur les capacités de prises de décision nous rappellent qu'une absence de contrôle peut engager l'organe immature dans des prises de risques inconsidérées.

Un cerveau jeune a besoin de temps pour déployer les ailes de toutes ses compétences. Il est alors en plein développement et sa maturation effective n'apparaîtra qu'au-delà de 25 ans. Comprendre cela doit nous aider à envisager cette période de maturation avec une approche et un soin particuliers, d'autant plus qu'un cerveau qui se construit est, par essence, naturellement fragile.

Face à l'immaturation de l'ensemble de ses régions cérébrales, particulièrement préfrontales, chaque enfant et adolescent aura ainsi besoin d'être fortement *accompagné* pour l'aider à :

- *prédire* l'avenir (gestion du temps, prévention des conduites à risques) ;
- *gérer et vivre ses apprentissages* (optimisation du système, aide à la répétition, lutte contre l'oubli, corporalisation, gestion des efforts énergétiques) ;
- *gérer ses émotions et comprendre celles des autres* (aide à la décision, cerveau social) ;
- *parfaire ses stratégies attentionnelles et d'inhibition* (automatisation des procédures, gestion des distracteurs) ;
- *protéger son cerveau* (prévention des traumatismes physiques, chimiques et émotionnels).

Fragile car infiniment complexe, le cerveau de l'enfant porte pourtant déjà en lui les promesses de toutes les capacités qu'il se prépare à construire. Il n'existe pas de fatalité. La plasticité cérébrale ou la motivation constituent autant de stratégies intégrées à l'organe qui lui permettent d'apprendre et de s'améliorer en permanence.

Comprendre les failles, comprendre les fragilités, comprendre la logique de fonctionnement d'un cerveau peut aider à envisager les stratégies pédagogiques les plus profitables à son développement et à l'optimisation de ses capacités d'apprentissage, socles puissants de la structure cérébrale de l'adulte que cet enfant s'apprête à devenir.

« *Savoir étant sublime, apprendre sera doux* »

Victor Hugo

Jouons un peu pour mieux comprendre

L'idée de cette partie est de découvrir certaines de nos capacités cérébrales, avec nos enfants et/ou entre adultes, au travers de jeux s'inspirant, parfois, de tests qui peuvent être utilisés en recherche sur le cerveau. À titre d'exemple, le jeu n° 5 est ainsi dérivé du test que j'ai créé en IRM fonctionnelle et dont les résultats sont présentés pour partie dans le chapitre sur l'attention (p. [«Figure 30 : Amélioration de la performance attentionnelle par la mobilisation du cervelet. Les couleurs représentent les activations cérébrales associées aux différentes tâches attentionnelles de complexité croissante utilisées dans ce test de Go/No-go \(Source : M. Bonnet d'après Bonnet et al., 2009\)»](#), page 158).

Cependant, bien que pouvant s'inspirer d'éventuels tests utilisés en recherche, ces jeux n'ont pourtant rien de comparable avec ceux-ci : ils ne présentent aucune valeur normée, ni aucune échelle de cotation et encore moins de critère de jugement quant aux capacités cognitives explorées. Ils n'ont ainsi pas vocation à être utilisés pour dépister d'éventuelles atteintes ni pour mesurer certaines capacités.

En revanche, et même si ce ne sont que des jeux, ils permettent déjà de visualiser quelques composantes du fonctionnement cérébral et peuvent servir d'outils ludiques pour sensibiliser les enfants à des concepts/problématiques qu'ils seraient susceptibles de rencontrer.

Bons jeux à tous !

Jeu n° 1 - Jouons visuellement avec la mémoire de travail

L'idée du jeu est de faire prendre conscience à l'enfant de sa capacité de mémoire de travail en lui faisant essayer de retenir un maximum de petites images sur les 25 présentées (voir page suivante).

Pour rappel, la mémoire de travail est un espace mnésique conscient qui nous permet de conserver en mémoire plusieurs informations en même temps mais sur un temps relativement court.

La mémoire de travail a deux particularités : elle est limitée (et donc saturable) et très labile (c'est-à-dire qu'elle est fragile face à tout perturbateur).

Consignes

- Le dessin doit être présenté à l'enfant ou aux enfants (et/ou aux autres adultes) pendant une durée maximum de 10 secondes (si l'enfant est très jeune il est recommandé de lui laisser un peu plus de temps).
- Pendant ces 10 secondes, il faut que l'enfant se concentre afin de mémoriser le plus grand nombre possible de petites images.
- À l'issue de ces 10 secondes de présentation, l'adulte cache le dessin et demande alors à l'enfant de lui redonner le plus grand nombre possible de petites images dont il se souvient.
- L'adulte compte le nombre d'images correctement rappelées.

Important

L'enfant ne doit pas être perturbé pendant les 10 secondes où il se concentre sur le dessin ni pendant le temps plus ou moins long pendant lequel il redonne les images dont il se souvient.

En effet, comme dit précédemment, la mémoire de travail est labile, c'est-à-dire que si elle est perturbée (par un bruit quelconque, etc.), elle s'efface automatiquement. « On perd le fil. »

On interprète ensemble

- Ce jeu s'intéresse à la capacité de stockage en mémoire de travail, nommée « empan mnésique ».
- Dans la population générale, l'empan mnésique est en moyenne de 7 items +/- 2. C'est-à-dire que, dans l'exemple qui nous concerne, les individus seraient en moyenne susceptibles de se rappeler entre 5 à 9 images. À noter qu'il est donc normalement impossible en 10 secondes de retenir les 25 petites images. Si les enfants se souviennent de plus de 9 images, c'est qu'ils ont mis en place des stratégies (voir le jeu n° 2).
- L'enfant doit comprendre qu'il ne peut pas retenir un grand nombre d'informations en une seule fois (car sa mémoire de travail est limitée). La mémoire de travail est un filtre par lequel toute information doit passer pour se consolider progressivement en mémoire à plus long terme. La mémoire de travail est donc l'étape première de l'encodage de toutes nos connaissances.
- Pour fonctionner, la mémoire de travail a besoin des capacités d'attention de l'individu : si l'individu n'est pas attentif, il ne pourra rien retenir. La mémoire de travail représente donc un effort important de la part du cerveau, car elle cumule des capacités de mémoire mais également d'attention.
- Ne pas se formaliser si l'enfant se souvient de moins de 5 items. Cela peut, par exemple, s'expliquer par une inattention passagère ou un événement distracteur. Essayez de lui donner plus de temps (10 secondes c'est très court, même pour un adulte).
- La mémoire de travail se travaille et, par certaines stratégies, il est possible de l'optimiser (voir le jeu n° 2).



Jeu n° 2 - Jouons auditivement avec la mémoire de travail

L'idée du jeu est de s'attacher à suivre à nouveau la mémoire de travail, mais en s'intéressant cette fois-ci à l'empan mnésique auditif.

Voici une liste de 16 mots à présenter oralement à l'enfant ou aux enfants (et/ou aux adultes) :

Tournevis

Dromadaire

Radis

Basket

Singe

Pinceau

Rugby

Marteau

Tomate

Pince

Tennis

Cheval

Salade

Mouton

Courgette

Football

Consignes partie 1

- Il est nécessaire de lire la liste de mots avec un rythme régulier, ni trop vite, ni trop lentement.
- Après avoir lu la liste de mots, il est demandé à l'enfant de dire à l'oral (ou d'écrire sur une feuille de papier) tous les mots dont il se souvient.
- L'adulte compte le nombre de mots correctement rappelés. Un score de 7 +/-2 devrait être observé.
- L'adulte retire la feuille de papier à l'enfant afin qu'il n'ait

plus ses réponses sous les yeux.

Consignes partie 2

- L'adulte annonce à l'enfant qu'il va lui relire la liste de mots mais que la nouvelle consigne est d'essayer de les mémoriser en essayant de faire des catégories : les 4 légumes, les 4 sports, les 4 outils et les 4 animaux.
- L'adulte relit la liste de mots.
- L'adulte compte le nombre de mots correctement rappelés. Un score plus élevé devrait être observé (pour deux raisons que nous allons voir plus bas).

On interprète ensemble

- La première partie du jeu a le même objectif que le jeu n° 1, c'est-à-dire de calculer l'empan mnésique, mais cette fois-ci l'empan mnésique *auditif*. Quel que soit l'empan mnésique (visuel ou auditif), il a toujours la même valeur, c'est-à-dire en moyenne 7 ± 2 .
- À la première lecture, les mots les mieux mémorisés sont souvent les premiers et les derniers entendus. C'est ce que l'on appelle *l'effet d'amorce* (fixation en mémoire des premiers items que l'on entend) et *l'effet de récence* (fixation en mémoire des derniers items entendus).
- Le score après la deuxième lecture est généralement plus élevé pour deux raisons :
 - c'est la *deuxième* fois que l'enfant entend l'information donc, non seulement il a consolidé en mémoire à plus long terme les mots dont il s'est souvenu la première fois, mais il a également pu en ajouter de nouveaux ;
 - la stratégie de catégorisation a normalement permis à l'enfant d'assembler les mots appartenant à une même catégorie, potentialisant ainsi ses capacités mnésiques. Il est

important que l'enfant se rende compte qu'il s'est amélioré parce qu'il a appris qu'il était possible d'associer des informations entre elles pour mieux se souvenir de toutes (une information aide au rappel de l'autre et vice versa).

- Ne pas se formaliser si le score augmente peu à la deuxième lecture. Cela peut signifier que l'enfant n'a pas encore compris la stratégie de catégorisation et/ou comment l'utiliser. Tout ceci s'apprend et s'optimise. Le cerveau de l'enfant est en plein développement, il a besoin de temps et d'accompagnement pour s'améliorer.

Jeu n° 3 - Jouons avec la mémoire procédurale

L'idée du jeu est de faire prendre conscience à l'enfant que certaines de ses mémoires ne sont pas des savoirs mais des *savoir-faire*, c'est-à-dire des procédures. Ce sont les actions et les retours sensoriels associés à ces actions qui ont permis leur consolidation à long terme sous forme de procédures (par exemple, savoir faire un lacet, savoir faire du vélo, etc.).

Consignes

- L'adulte doit tenir deux bouts de ficelle, un dans chaque main.
- L'enfant doit garder les mains dans ses poches pendant tout le temps de jeu.
- L'enfant doit expliquer à l'adulte comment nouer les deux ficelles en faisant une boucle comme lorsqu'il lace ses chaussures.
- Il est interdit à l'enfant de mimer, pointer du menton, montrer du coude les gestes à faire pour réaliser le laçage entre les deux bouts de ficelles : l'enfant doit rester parfaitement immobile pendant tout le temps du jeu.
- L'enfant n'a le droit que d'essayer d'expliquer avec des mots comment nouer les deux bouts de ficelle comme il lacerait ses chaussures.
- L'adulte doit veiller à suivre scrupuleusement les consignes données oralement par l'enfant sans essayer de combler les lacunes éventuelles de la procédure énoncée.

On interprète ensemble

- Ce jeu montre à quel point il est difficile de verbaliser une procédure motrice.

- L'enfant doit comprendre que savoir nouer deux ficelles en faisant une boucle est une mémoire des savoir-faire : c'est-à-dire une mémoire procédurale.
- C'est le même type de mémoire qui lui permet, par exemple, de faire du vélo.
- La mémoire procédurale s'explique difficilement avec des mots, elle se vit.
- Pour que l'enfant acquière des savoir-faire, il est nécessaire :
 - de lui montrer avec des gestes l'action en question ainsi que ses attendus (mise en jeu des neurones miroirs de l'enfant) ;
 - qu'il fasse lui-même l'action en question.
- Le cerveau de l'enfant est riche à la fois de ses savoirs et de ses savoir-faire.

Jeu n° 4 - Jouons avec l'attention

Pour réaliser ce jeu, il sera nécessaire d'aller à deux reprises sur Internet à ces adresses :

- Vidéo n° 1 : https://www.youtube.com/watch?v=IGQmdoK_ZfY
- Vidéo n° 2 : <https://www.youtube.com/watch?v=v3iPrBrGSJM>

Important

Il est recommandé de regarder les vidéos avant d'en lire l'interprétation ainsi qu'avant de les montrer à l'enfant : en effet, tout cerveau même adulte peut être surpris par les résultats. Mieux vaut connaître le principe afin de pouvoir suivre le comportement de l'enfant.

La première vidéo est devenue très connue, il n'est donc pas impossible que l'enfant l'ait déjà vue. Si tel était le cas, il est recommandé d'enchaîner directement avec la vidéo n° 2.

Consignes pour la vidéo n° 1

- L'enfant doit compter le nombre de passes que se font les membres de l'équipe avec le maillot blanc.
- L'adulte regarde la vidéo avec l'enfant jusqu'au moment où les individus arrêtent de jouer et stoppe la vidéo (important).
- L'adulte demande à l'enfant de lui donner le nombre de passes qu'il a comptées.
- L'adulte demande à l'enfant s'il a vu quelque chose d'autre sur la vidéo que des jeunes femmes jouant au ballon.
- L'adulte demande à l'enfant s'il a vu : le gorille entrer dans l'aire de jeu, le départ d'une joueuse avec un maillot noir et le changement de couleur du rideau derrière les joueuses.

- L'adulte poursuit avec l'enfant la lecture de la vidéo présentant l'ensemble des explications données par ceux qu'ils l'ont réalisée (voir interprétation).

Consignes pour la vidéo n° 2

- L'adulte dit à l'enfant qu'il a trouvé sur Internet la vidéo d'un tour de magie exceptionnel dans lequel le magicien change la couleur des cartes mais qu'il n'a pas compris comment il faisait. L'adulte demande à l'enfant de voir la vidéo avec lui afin que l'enfant puisse lui expliquer comment le magicien fait son tour de magie (important). (À noter : l'homme responsable du tour demande à la dame de choisir une carte dans le jeu puis de la replacer. Le tour de magie se termine quand il est constaté que le dos de la carte choisie par la dame est d'une couleur différente de celui des autres cartes.)
- L'adulte lance la vidéo et l'arrête lorsque le tour de magie est fini (important).
- L'adulte demande à l'enfant son explication sur le tour de magie.
- L'adulte demande à l'enfant s'il a vu quelque chose d'autre sur la vidéo que le tour de magie.
- L'adulte demande à l'enfant s'il a vu : le changement de couleur des tee-shirts portés par les protagonistes, de la nappe et du rideau.
- L'adulte poursuit avec l'enfant la lecture de la vidéo présentant les explications données par l'équipe qui a réalisé la vidéo.

On interprète ensemble

- Les enfants qui n'ont pas vu le gorille (mais qui ont le *nombre juste* de passes au ballon) et ceux qui n'ont vu aucun des éléments périphériques au tour de magie ont une

grande capacité à se concentrer. Ils ont pu se focaliser sur l'objectif demandé (capacité d'attention) et ignorer tout élément perturbateur et/ou non pertinent pour la tâche (capacité d'inhibition).

- Quelle que soit la vidéo choisie, les expériences ont pour but de démontrer que l'attention, lorsqu'elle est contrôlée et/ou captée, permet de mettre sous le projecteur une seule chose au détriment de toutes les autres. Lorsque l'attention est focalisée sur un objectif précis (compter le nombre de passes au ballon, comprendre le tour de magie), le cerveau est capable d'ignorer un nombre faramineux d'informations en provenance de son environnement extérieur (la présence d'un gorille, la disparition d'une joueuse avec un maillot noir, le changement de couleur des tee-shirts, du rideau, de la nappe).
- L'enfant doit comprendre que s'il y a au moins une chose dans les vidéos qu'il n'a pas vue, c'est qu'il a été capable de se concentrer. L'attention est un choix. Elle se met en place par rapport à un objectif. Les enfants se concentrent généralement plus facilement au visionnage de la vidéo n° 2, car elle est plus ludique. La compréhension du tour de magie représente un problème à résoudre. Cet objectif sert d'amorce pour accrocher l'attention de l'enfant.
- Le fait que le cerveau soit capable d'ignorer un nombre faramineux d'informations en provenance de son environnement extérieur lorsqu'il est concentré sur quelque chose en particulier est une notion qui doit être bien comprise par un enfant. Car cela explique qu'il ne faut pas, par exemple, regarder son portable pendant que l'on traverse une rue. Le cerveau, tout entier capté par les informations en provenance du téléphone portable, ne pourra plus faire attention aux autres informations autour de lui (les voitures) et prendra des risques inutiles.

Jeu n° 5 - Jouons avec l'attention et l'inhibition

Le jeu proposé est une variante ludique du Go/No-go, un test utilisé en recherche pour étudier les capacités d'attention et d'inhibition.

Le Go/No-go peut se traduire comme : « y aller-ne pas y aller ». Dans le test du Go/No-go, le sujet réagit quand il voit une *cible* (le Go) et ne réagit pas quand il voit un *distracteur* (le No-go).

Le jeu proposé ici utilise les gestes du chifoumi (pierre/papier/ciseau) pour représenter les cibles et les distracteurs.

Consignes partie 1 « Le Go simple »

- L'adulte et l'enfant (ou les enfants/adultes) sont face à face.
- L'adulte a son poing fermé devant lui et explique à l'enfant qu'il va faire le geste du ciseau de manière très rapide et répétée.
- Il lui explique qu'à chaque fois qu'il fera le geste du ciseau, l'enfant devra taper dans ses mains (ou taper avec un objet, un crayon par exemple, sur une table) le plus rapidement possible. À noter : l'important ici est que la réponse de l'enfant soit audible pour suivre ses temps de latence et/ou ses erreurs.
- L'adulte doit essayer d'être le plus rapide possible dans l'exécution de ses mouvements.
- Cette phase de jeu dure 1 minute.

Important

Essayez de ne pas avoir une fréquence de gestes trop prédictive (alternez des pauses plus ou moins longues dans la succession de gestes) tout en essayant d'être le plus rapide possible.

Consignes partie 2 « Le Go/No-go »

- L'adulte et l'enfant sont toujours face à face.
- L'adulte a son poing fermé devant lui et explique à l'enfant qu'il va faire de manière très rapide et répétée :
 - soit le geste du ciseau ;
 - soit le geste du papier.
- L'adulte explique à l'enfant qu'il doit taper dans ses mains à la présentation du geste du ciseau *mais pas* à la présentation du geste du papier.
- L'adulte doit essayer d'être le plus rapide possible dans l'exécution de ses mouvements.
- Cette phase de jeu dure 2 minutes.

Important

Le geste du ciseau est la cible tandis que le geste du papier est le distracteur.

La séquence de gestes doit comporter 70 % de cibles pour 30 % de distracteurs (**attention : ne pas le dire à l'enfant**). Donc si l'adulte fait 100 gestes en 2 minutes, il lui faut présenter 70 fois le geste du ciseau pour 30 fois le geste du papier.

L'adulte doit alterner de manière non prédictive le geste du ciseau et du papier.

Pour être plus rapide, non prévisible et respecter le ratio entre cibles et distracteurs, il est recommandé d'écrire la séquence de gestes en amont sur une feuille qui sera cachée à l'enfant.

Des résultats intéressants peuvent (notamment) être obtenus lorsqu'une longue séquence de cibles (environ une dizaine) est suivie d'un distracteur.

L'adulte doit essayer de ne pas avoir une fréquence de gestes trop prédictive (alternance de pauses plus ou moins longues dans la succession de gestes) tout en essayant d'être le plus rapide possible.

On interprète ensemble

- Dans la consigne 1, le but est d'observer le niveau basal attentionnel nommé *alerte tonique*. Dans cette consigne, seul le Go (la cible) est utilisé : « Si je vois quelque chose

correspondant à un attendu (le geste du ciseau) alors j'y réagis. »

- Dans la consigne 1, l'enfant peut être particulièrement rapide (souvent plus rapide qu'un adulte).
- La consigne 2 est le Go/No-go car, en plus de la cible (geste du ciseau), un distracteur est ajouté (le geste du papier).
- Dans la consigne 2, si la séquence utilisée respecte bien les critères mentionnés dans l'encadré « Important », vous devriez constater au moins ces deux éléments :

- l'enfant fait plus d'erreurs qu'un adulte ;
- les erreurs apparaissent préférentiellement lorsqu'un distracteur est présenté après une séquence plus ou moins longue de cibles.

- Ne pas taper dans ses mains lorsqu'un distracteur apparaît est le résultat de la mise en jeu de nos capacités d'inhibition.

- Nos capacités d'inhibition, comme nos capacités d'attention, sont très gourmandes en énergie, car elles reposent sur des réseaux cérébraux qui se recouvrent.

- Lorsqu'une séquence de cibles est un peu longue, le cerveau a tendance à basculer vers un mode d'alerte tonique moins gourmand en ressources, il est alors moins prompt à inhiber les distracteurs à bon escient. Ce phénomène est particulièrement fréquent chez l'enfant.

- Il est important que l'enfant comprenne que l'attention et l'inhibition sont des capacités qui fonctionnent ensemble.

- L'alerte tonique est comme une « routine attentionnelle », importante, mais à laquelle il faut prendre garde pour éviter de basculer dans l'erreur. L'erreur représente le fait d'avoir tapé dans ses mains alors qu'il ne le fallait pas : on n'a pas *inhibé*.

- Il peut être important de discuter avec l'enfant de ce qu'il a ressenti comme différence entre la consigne 1 et la

consigne 2. Il peut notamment avoir remarqué que sa réponse (taper dans ses mains) était ralentie dans la consigne 2. Cette latence correspond au *temps d'inhibition*. C'est le temps dont a besoin le cerveau pour s'assurer que le geste vu était bien une cible et qu'il peut s'autoriser à taper dans les mains.

- Les adultes sont souvent moins rapides que les enfants, mais ils font aussi généralement moins d'erreurs (ils ne tapent pas ou très peu dans leurs mains lorsqu'ils voient un distracteur). Leur plus grande capacité d'inhibition a un prix : ils mettent plus de temps pour réagir. Cependant, lorsqu'ils le font, c'est parce que leur cerveau a pris le temps de vérifier que la cible était bien une cible et qu'ils pouvaient s'autoriser à taper dans leurs mains.
- Ne pas se formaliser si l'enfant fait des erreurs, les capacités d'attention et d'inhibition sont portées par des réseaux à forte dominante préfrontale qui sont en plein développement.
- Si peu d'erreurs sont observées à la consigne 2, essayez de complexifier votre séquence en ajoutant d'autres distracteurs (geste de la pierre, geste du puits, ou d'autres gestes), mais en respectant toujours le ratio initial de 70 % de cibles et de 30 % de distracteurs (quels qu'ils soient). Vous pouvez également augmenter la durée de la séquence. Dans les deux cas, vous augmenterez la *charge cognitive*. L'augmentation de la charge cognitive est la première responsable de l'émergence d'erreurs attentionnelles et d'inhibition. Veillez cependant à ne pas précipiter le cerveau de l'enfant dans l'erreur massive, le but du jeu est qu'il prenne conscience de certaines de ses capacités cérébrales, pas qu'ils les mettent totalement en défaut.
- Ne pas se formaliser si l'enfant (et/ou l'adulte) est fatigué après ce jeu, car celui-ci est très gourmand en ressources attentionnelles et donc énergétiques.

Jeu n° 6 - Jouons avec l'attention (tout sauf) partagée

L'idée du jeu est de lire à l'enfant (aux enfants et/ou aux adultes) deux textes en même temps avec deux consignes différentes afin qu'il puisse se rendre compte que l'attention est une fonction qui ne peut être dirigée que sur une seule cible à la fois, sinon sa performance est altérée.

Consignes partie 1

- Deux personnes (adultes ou enfants) doivent chacune lire un des deux textes ci-après **en même temps**.
- Les autres enfants (et/ou adultes) doivent essayer de compter le nombre de mots de **légumes** dans le premier texte et le nombre de mots de **fleurs** dans le second texte.
- L'adulte demande le nombre de mots cibles qu'a compté l'enfant pour chacun des textes.
- Dans un second temps, l'adulte demande à l'enfant de quoi parlaient les deux textes.

Important

Il est nécessaire d'avoir le même débit de parole dans la lecture des deux textes de façon à commencer et à terminer en même temps.

Texte 1

« Trèfle de plaisanterie ! » dit le lapin dans son champ de luzerne
Adieu **carottes**, **salade** et **choux** chéris, mon moral est en berne
Le jardinier est là et mes **tomates** et mes **épinards** n'y sont plus
Haricots, **petits pois** et **poireaux**, c'est fini, il n'y en aura plus
À moi, petit lapin blanc affamé, il ne me reste que le **potiron**
Quand le jardinier est passé, c'est toujours moi qui suis marron !

Texte 2

Au jour commençant, moi, petite abeille virevoltant de **lys en rose**

Mon vol a fière allure de **jonquilles** en **tulipes** à peine écloses
Que dites-vous ? Effeuille une **pâquerette** ? Non, très peu pour moi
Je préfère gambader allègrement sur le **géranium** tout en émoi
De me voir arriver lui apportant le message de ses nombreux amis
Depuis la prairie aux mille **pensées**, cent **muguets** et six **soucis**

Consignes partie 2

- L'adulte dit à l'enfant que les deux textes vont lui être à nouveau relus et qu'il doit se concentrer exclusivement sur le **texte 1** afin de compter le nombre de mots de **légumes**.
- Les deux textes sont relus toujours à deux voix et en respectant la recommandation de l'encadré « Important ».
- L'adulte demande le nombre de mots de légumes qu'a compté l'enfant pour le texte 1.
- Dans un second temps, l'adulte demande à l'enfant de quoi parlait ce texte.

On interprète ensemble

- Dans la consigne 1, il est normalement impossible de compter tous les mots cibles (surlignés) des deux textes même si ceux-ci sont parfois donnés de manière décalée (les mots cibles sont plus nombreux en début de phrase dans le texte 1 et plus nombreux en fin de phrase dans le texte 2). En effet les lignes 2 et 3 restent conflictuelles et perturberont normalement le décompte.
- Donc, ne pas se formaliser quel que soit le décompte de mots cibles donné par l'enfant.
- Même si le nombre juste de mots cibles est obtenu, cela se fera au détriment des histoires racontées dans les deux textes, d'où l'intérêt de questionner l'enfant sur celles-ci. Il est normalement impossible d'avoir obtenu le nombre juste de mots cibles pour chacun des textes **et** d'avoir retenu en même temps de quoi parlaient les deux histoires.

- Par ce jeu, l'enfant doit pouvoir comprendre que son attention est un choix qu'il met en place pour répondre à une demande. Soit il choisit de se concentrer sur le texte 1, soit il choisit de se concentrer sur le texte 2. S'il essaie de se concentrer sur les deux à la fois, il perd le fil. De plus, la demande initiale qui lui avait été faite était de dénombrer les mots cibles, mais pas forcément celle d'enregistrer le contenu des deux histoires. Choisir, c'est renoncer. L'attention est un choix dirigé qui se fait toujours au détriment de quelque chose d'autre : le nombre de mots d'un seul texte au détriment de celui des deux ; le nombre de mots total au détriment du contenu des deux histoires racontées.
- On ne peut pas être attentif à deux choses à la fois, d'autant plus que les deux tâches à réaliser sollicitent ici les mêmes ressources cognitives. Donc, en classe, il est impossible d'écouter en même temps le professeur et son camarade ou, à la maison, de faire ses devoirs en même temps que de regarder la télévision. C'est toujours soit l'un, soit l'autre. Si l'on veut faire les deux tâches en même temps, il y aura automatiquement une altération de la performance : les consignes du professeur dans la classe seront mal comprises et les devoirs à la maison seront mal faits.
- La consigne 2 doit permettre à l'enfant de se rendre compte qu'il lui est possible d'avoir une bonne performance en ne se concentrant que sur une seule chose à la fois (un seul des deux textes). Cependant, il constatera également que cela reste difficile, car il lui faut en même temps se concentrer sur un texte et inhiber le second. Le résultat de cette compréhension par l'enfant doit l'amener dans sa vie quotidienne à choisir par lui-même de se placer dans les conditions les plus favorables pour réaliser une tâche/un apprentissage : se concentrer exclusivement sur la tâche **et** éviter les distracteurs (par exemple, dire à son camarade de ne pas lui parler quand le professeur donne des informations

et éteindre la télévision quand il fait ses devoirs).

- L'ensemble de ces notions est extrêmement complexe à appréhender pour un enfant. Ne pas se formaliser si leur apprentissage prend du temps. Les capacités attentionnelles et d'inhibition sont portées, rappelons-le par les régions préfrontales qui mûrissent sur un temps très long.

Jeu n° 7 - Jouons avec l'expression et la reconnaissance des émotions et des sentiments

L'idée du jeu est de faire s'intéresser l'enfant à ses émotions, à celles des autres, à comment les exprimer et à comment les reconnaître.

Consignes partie 1

- L'adulte et l'enfant (et/ou les enfants/les adultes) se placent face à face.
- L'adulte annonce à l'enfant qu'il va faire 6 grimaces d'affilée et que l'enfant devra les reconnaître en les nommant.
- L'adulte enchaîne alors les mimiques faciales associées aux 6 émotions primaires (la colère, la joie, le dégoût, la surprise, la peur, la tristesse).
- L'adulte demande pour chaque mimique à quelle émotion l'enfant pense qu'elle correspond.
- Puis c'est au tour de l'enfant de mimer à l'adulte les 6 émotions.
- L'adulte et l'enfant discutent ensemble de leurs ressentis respectifs sur ce jeu.

Consignes partie 2

- L'adulte annonce à l'enfant qu'ils vont mimer chacun leur tour des **sentiments** et qu'ils devront essayer de les reconnaître.
- L'adulte et l'enfant piochent chacun leur tour dans un sac

un petit papier sur lequel est écrit un sentiment (l'adulte aura au préalable écrit une dizaine de sentiments différents sur des petits papiers individuels qu'il aura placés dans un sac. Ces sentiments sont par exemple : l'amour, la honte, l'amitié, la culpabilité, la reconnaissance, le mépris, la compassion, la haine, l'admiration, etc.).

- L'adulte et l'enfant discutent ensemble de leurs ressentis respectifs sur ce jeu.

Consignes partie 3

- L'adulte annonce à l'enfant que le défi du jeu est de préparer chacun de son côté une petite saynète à présenter ensuite à l'autre.
- La saynète ne doit pas utiliser de mots mais des expressions faciales, des gestes et des mouvements associés à des émotions ou à des sentiments. Le but est de raconter (sans mot aucun) une histoire et de faire comprendre aux auditeurs le contenu de cette histoire en n'utilisant que des expressions faciales et corporelles. (À noter : un sentiment est toujours plus complexe à mimer qu'une émotion, car il n'engage pas que des attitudes mais aussi tout un langage. Créer une saynète en n'utilisant que des sentiments représente ainsi un énorme défi.)
- Une saynète peut être, par exemple, de mimer la *surprise* d'une personne entrant dans une pièce et voyant que son objet fétiche est cassé, elle exprime de la *colère* et de la *tristesse*, mais quelqu'un arrive et lui répare, elle exprime de la *joie* et de la *reconnaissance*, etc.
- L'adulte demande à l'enfant combien d'émotions et de sentiments il a repéré dans la saynète.
- Quand c'est au tour de l'enfant, l'adulte essaye de lui donner à son tour le nombre d'émotions et de sentiments qu'il aura repéré dans sa saynète.
- L'adulte et l'enfant discutent ensemble de leurs ressentis

respectifs sur ce jeu.

Important

Comme pour tous les autres jeux, ne pas forcer l'enfant à participer activement à celui-ci. Il n'est pas toujours évident de se sentir assez libre pour exprimer ses émotions et ses sentiments, surtout chez l'adolescent. Ainsi, il peut parfois être pertinent de réaliser le jeu avec le reste de la famille tout en invitant les enfants un peu moins à l'aise à être des spectateurs (des saynètes notamment). Cela peut les amener, dans un deuxième temps, à participer eux aussi aux différents jeux par imitation.

On interprète ensemble

- Les jeunes enfants s'approprient plus facilement la consigne 1 que les consignes 2 et 3. En effet, les consignes se complexifient et peuvent nécessiter que l'enfant soit plus âgé et maîtrise mieux ses capacités d'expression et de reconnaissance des émotions et des sentiments.
- Il est important pour l'enfant de développer la connaissance de ses propres émotions et de celles des autres. Par ce genre de jeu d'interaction sociale, se comprendre soi-même et comprendre l'autre (travailler sa théorie de l'esprit et son empathie) peut devenir plus facile.
- Les enfants peuvent constater qu'il peut y avoir parfois une grande différence entre ce qu'une personne ressent (et qu'elle essaie d'exprimer corporellement) et ce que les autres pensent qu'elle ressent. En effet, il n'est pas toujours évident d'être transparent dans ses émotions et surtout dans ses sentiments (plus complexes), ce qui peut aboutir à des problèmes de communication et d'entente. Il est donc important que l'enfant apprenne à *mettre des mots* pour exprimer ses ressentis et qu'il soit également à l'écoute de la verbalisation des ressentis des autres (respect de soi et respect des autres).
- Les émotions et les sentiments sont des ressentis

exprimés par tout un chacun. Il faut avoir pris conscience qu'ils existent pour pouvoir les comprendre, les respecter et les contrôler.

Références bibliographiques

Barnes A. M., « Mathematical Skills in 3- and 5-Year-Olds with Spina Bifida and The Typically Developing Peers: a Longitudinal Approach », *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17(3): 431-444, 2011.

Bonnet M. C., Dilharreguy B., Allard M., Deloire M. S., Petry K. G., Brochet B., « Differential Cerebellar and Cortical Involvement According to Various Attentional Load: Role of Educational Level », *Human Brain Mapping*, 30: 1133-43, 2009.

Broca P., « Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie (perte de la parole) », *Bulletin de la Société anatomique*, 6: 330-357, 1861.

Brodmann K., *Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde*, Leipzig, Johann Ambrosius Bart, 1909.

Choquet D., Triller A., « Role of Receptor Diffusion in the Organization of the Postsynaptic Membrane », *Nat. Rev. Neurosci.*, 4: 251-265, 2003.

Damaiso A., *L'Erreur de Descartes*, Odile Jacob, 1995.

Diamond M., Scheibel A., Murphy G., Harvey T., « On the Brain of a Scientist: Albert Einstein », *Experimental Neurology*, 88: 198-204, 1985.

Dias B. G., Ressler K. J., « Parental Olfactory Experience Influences Behavior and Neural Structure in Subsequent Generations », *Nat. Neurosci.*, 17(1): 89-96, 2014.

Ebbinghaus H., *Memory: A Contribution to Experimental Psychology*, Dover, 1885.

Garagnani M., Pulvermüller F., « Conceptual Grounding of Language

in Action and Perception: a Neurocomputational Model of the Emergence of Category Specificity and Semantic Hubs », *Eur. J. Neurosci.*, 43(6): 721-737, 2016.

Gazzaniga M., Bogen J. E., Sperry R. W., « Some Functional Effects of Sectioning the Cerebral Commissures in Man », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 48(10): 1765-9, 1962.

Hebb D. O., *The Organization of Behavior*, Wiley, 1949.

Held R., Hein A., « Movement-Produced Stimulation in the Development of Visually Guided Behavior », *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 56(5): 872-876, 1963.

Hyde K. L., Lerch J., Norton A. *et al.*, « Musical Training Shapes Structural Brain Development », *J. Neurosci.*, 29(10): 3019-3025, 2009.

Korn H., « La libération des neurotransmetteurs dans le système nerveux central », *Med. Sci.*, 4(8): 476-483, 1988.

Kupers R., Fumal A., de Noordhout A. M., Gjedde A., Schoenen J., Ptito M., « Transcranial Magnetic Stimulation of the Visual Cortex Induces Somatotopically Organized Qualia in Blind Subjects », *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103: 13256-13260, 2006.

Maguire E. A., Gadian D. G., Johnsrude I. S. *et al.*, « Navigation-Related Structural Change in the Hippocampi of Taxi Drivers », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 97(8): 4398-4403, 2000.

Prochiantz A., *Les Anatomies de la pensée : à quoi pensent les calmars ?*, Odile Jacob, 1997 ; et d'après les travaux de Woolsey T. A., Wann J. R., « Area Changes in Mouse Cortical Barrel Following Vibrissal Damage at Different Postnatal Ages », *Journal of Comparative Neurology*, 170: 53-66, 1976.

Sridharan D., Levitin D. J., Menon V., « A Critical Role for the Right Fronto-Insular Cortex in Switching Between Central-Executive and Default-Mode Networks », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105(34): 12569-74,

26.08.2008.

Viard A., Chételat G., Lebreton K. *et al.*, « Mental Time Travel into the Past and the Future in Healthy Aged Adults: an fMRI Study », *Brain Cogn*, 75(1): 1-9, 2011.

Bear F., Connors B. W. Paradiso M. A., *Neuroscience: Exploring the Brain*, Williams & Wilkins, 1996. Traduction française : *Neurosciences : à la découverte du cerveau*, Éditions Pradel, 1999.