



(Extrait du manuscrit précédent la version publiée sous le titre « Le Cerveau Attentif : contrôle, maîtrise et lâcher-prise », par JP. LACHAUX, aux éditions Odile Jacob en 2011)

Des continents, des montagnes, des vallées ...

Le cerveau est une drôle de planète. Une planète enrobée d'une écorce, comme la Terre, de quelques millimètres d'épaisseur appelée cortex, la traduction latine du mot 'écorce'. Ce cortex, qui constitue l'essentiel de la 'matière grise', est une sorte de croûte molle recouvrant toute la surface du cerveau. Au centre de la planète se trouve un ensemble de structures dites 'sous-corticales', car elles se situent sous le cortex, un peu comme le noyau de la terre. Entre le centre de la planète et sa surface, un dense réseau de fibres relie à la fois les structures sous-corticales avec le cortex, et les différentes régions du cortex entre elles. Grâce à ce réseau de fibres, deux régions du cerveau peuvent communiquer entre elles même si elles sont loin l'une de l'autre. Ces fibres constituent ce qu'on appelle la 'matière blanche'. Cette planète a également une lune, appelée cervelet, qui au lieu de flotter quelque part dans l'espace, est directement collé à l'arrière du cerveau.

Comme notre Terre, la planète-cerveau est divisée en continents, appelés lobes. On en dénombre quatre principaux : le lobe occipital, le lobe pariétal, le lobe temporal et le lobe frontal. Les noms des différents lobes indiquent leur position à l'intérieur du crâne. Le lobe frontal est à l'avant, juste derrière le front ; le lobe temporal est au niveau des tempes, le lobe occipital est à l'arrière de la tête - l'occiput', en latin - et le lobe pariétal est situé en haut et à l'arrière du cerveau, juste sous la tonsure des moines ; bien que le mot pariétal ne désigne rien de monacal, mais en latin : 'ce qui appartient aux murs'. Contrairement à nos continents, les lobes ne sont pas séparés les uns des autres par de vastes océans ou des chaînes de montagnes, mais par des vallées très profondes, appelées sillons, comme les sillons que l'on creuse dans les champs - les livres d'anatomie utilisent parfois le mot latin 'sulcus'.

Le sillon central sépare le lobe pariétal du lobe frontal, à mi-chemin entre l'avant et l'arrière de la tête, selon une ligne à peu près verticale allant d'une oreille à l'autre. Le sillon temporal

est plus horizontal, et sépare le lobe temporal du lobe pariétal et du lobe frontal. Vu de côté, le cerveau ressemble à un gant de boxe, dont le pouce est le lobe temporal. Le sillon temporal sépare le pouce du poing. Le sillon pariéto-occipital sépare quant à lui, le lobe pariétal du lobe occipital ... logique. Notez qu'il n'y a pas d'océan à la surface du cerveau pour séparer les lobes-continentes les uns des autres. Si océans il y a, il s'agirait plutôt de ces grandes poches de liquide enfouies sous la surface du cortex, appelées ventricules.

En dehors des quelques grands sillons qui séparent les lobes entre eux, d'autres sillons créent des séparations au sein des lobes-continentes, en lui donnant son allure de noix, ou de plat de spaghetti. Les sillons permettent au cortex de tenir dans un volume raisonnable malgré sa surface importante, 2500 cm², la surface d'une taie d'oreiller ; comme si la Nature avait dû chiffonner cette taie pour qu'elle tienne dans le crâne. Par ailleurs, les sillons sont séparés les uns des autres, comme certaines vallées, par de longues collines étirées appelées circonvolutions ou 'gyri' - au singulier 'gyrus', nom latin désignant une forme arrondie - serrées les unes contre les autres comme peuvent l'être les doigts de la main. Gyri et Sulci sont les repères géographiques les plus évidents sur la planète cerveau. Chacun d'eux porte un nom, qui indique précisément l'endroit où il se trouve. Ainsi, le sillon intra-pariétal se situe dans le lobe pariétal et le gyrus frontal inférieur dans la partie basse du lobe frontal.

La plus grande originalité de la planète-cerveau est d'être séparée en deux demi-sphères, appelées hémisphères - 'hémi' veut dire 'demi' en grec. L'hémisphère gauche et l'hémisphère droit ne sont reliés entre eux qu'au niveau de la matière blanche, principalement grâce à un dense réseau de fibres appelé 'corps calleux'. Il y a quelques années encore, il était courant de couper ce corps calleux pour guérir certaines formes d'épilepsie très graves. Aussi incroyable que cela puisse paraître, les patients survivaient à l'opération, guérissaient de leur épilepsie, et reprenaient le cours de leur vie sans trouble cognitif majeur, avec deux moitiés de cerveau indépendantes.

A la frontière entre les deux hémisphères, le cortex s'engouffre vers les entrailles du cerveau, jusqu'au niveau du corps calleux. De chaque côté de ce gouffre, une paroi verticale vertigineuse sépare les deux moitiés de la planète, depuis la pointe avant jusqu'à la pointe arrière du cerveau. Le long de cette paroi, appelée scissure inter-hémisphérique, la surface corticale verticale est aussi ridée qu'à l'extérieur, avec notamment le gyrus cingulaire, qui enrobe le corps calleux comme un boudin. Toute la surface corticale ne se situe donc pas immédiatement sous le crâne. Le cerveau a même une sorte de continent englouti, placé au carrefour du lobe temporal, frontal et pariétal. Il s'agit de l'insula, qui doit son nom à sa situation anatomique isolée, insula signifie 'île' en latin. Un neurospéléologue miniature qui souhaiterait atteindre l'insula devrait plonger dans le sillon qui sépare ces trois lobes, en se glissant entre

le pouce et le poing du gant de boxe. Au bout de sa corde, il poserait les pieds sur une surface relativement plane, parallèle à l'oreille - la fameuse insula, que certains considèrent comme le cinquième lobe du cerveau.

En 1909, l'anatomiste allemand Korbinian Brodman remarqua sous son microscope que la structure du cortex n'est pas partout la même. Ici et là, certaines discontinuités semblent suggérer que l'on passe d'une région à une autre. Brodmann dessina soigneusement toutes ces petites frontières et aboutit à une séparation de chaque hémisphère en 52 domaines, qui portent maintenant son nom, ce sont les "aires de Brodmann". Si les lobes sont les continents du cerveau, les aires de Brodmann en sont un peu les pays, tous identifiés par un numéro. Pour téléphoner en France depuis l'étranger, il faut d'abord composer le 33 ; si vous composez le 33 dans le cerveau, vous appellerez une région située dans le gyrus cingulaire. Si vous habitez le cerveau, vous pourriez donc donner votre adresse soit en indiquant le numéro de votre aire de Brodmann, soit en donnant le nom d'un gyrus ou d'un sillon - soit, encore mieux, les deux - sans oublier bien sûr de préciser de quel hémisphère il s'agit.

Le système de numérotation de Brodmann est encore très utilisé de nos jours car chaque aire de Brodmann est plus ou moins associée à une fonction cognitive. Les frontières identifiées par Brodmann ont un sens du point de vue fonctionnel. L'aire de Brodmann numéro 17, BA17, correspond par exemple au cortex visuel primaire, la région la plus en arrière du cortex où arrivent les informations visuelles en provenance de la rétine. BA4 correspond au cortex moteur primaire, spécialisé comme son nom l'indique dans la motricité, et ainsi de suite.

Cent milliards et quelques d'habitants ...

La Terre compte six milliards d'êtres humains ; le cerveau compte cent milliards de neurones. Ces neurones vivent pour la plupart dans le cortex, bien que certains aient choisi d'habiter au centre du cerveau, dans les structures sous-corticales, ou dans le cervelet. Au sein du cortex, les neurones vivent aussi bien dans les hauteurs des gyri que dans les profondeurs des sillons. Ils n'y vivent d'ailleurs pas seuls, mais entourés d'autres créatures appelées cellules gliales, dont on sait pour l'instant qu'elles servent à nourrir les neurones, comme les vaches nourrissent les hommes. Elles font sans doute bien plus que cela, mais leur rôle précis est encore mal connu.

Chaque neurone ressemble à un arbre qui aurait perdu toutes ses feuilles. Si vous vous promenez dans le cortex, vous auriez l'impression d'être dans une forêt au mois de janvier.

C'est une forêt un peu inhabituelle, cela dit, car les arbres ne sont pas disposés les uns à côté des autres sur le sol, comme nous en avons l'habitude, mais également les uns en-dessous et au-dessus des autres, au sein de plusieurs couches de forêt superposées. Cette drôle de forêt noire multicouches, c'est le cortex.

Dans cette forêt étrange, le tronc de chaque arbre ne se termine pas dans le sol, mais au niveau des branches d'un autre arbre. Ces branches sont les 'dendrites' du neurone, et le tronc son 'axone'. L'axone peut être long, très long, et pas forcément droit, pour pouvoir atteindre les dendrites de neurones situés à l'autre bout du cerveau. Il peut aussi être court et seulement relié à ses voisins ; tout dépend de la couche de forêt où se situe le neurone, et de l'espèce à laquelle il appartient. Car comme pour les arbres, il existe plusieurs espèces de neurones, mais nous ne rentrerons pas dans ces détails dès maintenant.

Chaque arbre-neurone est rempli de petites charges électriques appelées 'ions' - dont les noms nous sont familiers : calcium, sodium, potassium Certains de ces ions ont une charge électrique positive, comme le calcium, et d'autres une charge négative, comme l'ion chlorure. Ces ions se trouvent aussi à l'extérieur du neurone, mais il y a globalement plus de charges positives à l'extérieur qu'à l'intérieur, si bien que le neurone est dit '*polarisé négativement*', comme le pôle négatif d'une pile. Ce déséquilibre s'accroît lorsque des charges positives quittent le neurone, ou lorsque des charges négatives entrent ; dans ce cas, sa polarité augmente et le neurone devient *hyperpolarisé*. Si au contraire des charges négatives sortent, ou si des charges positives rentrent, sa polarité diminue et le neurone devient *dépolarisé*. Si les ions étaient libres d'entrer et de sortir, la proportion d'ions positifs et négatifs à l'intérieur et à l'extérieur du neurone ne tarderait pas à s'équilibrer- le neurone se dépolariserait complètement. Si le neurone est polarisé négativement, c'est parce que sa membrane, ou son écorce si vous préférez, est un mur infranchissable pour les charges électriques. Le passage vers l'intérieur ou l'extérieur ne peut se faire qu'au travers de minuscules ouvertures appelées canaux ioniques, dont l'entrée est étroitement surveillée.

Ces canaux ioniques sont disposés sur les dendrites du neurone, comme de petits trous dans les branches d'un arbre, munis d'un clapet bien fermé. Le passage des ions au travers du canal s'effectue ensuite selon un système rappelant les écluses de nos cours d'eau. Chaque canal ionique ne s'ouvre que très peu de temps, et à condition qu'il en reçoive l'ordre. Cet ordre ne vient pas du neurone lui-même, mais des autres neurones dont les axones viennent presque toucher la dendrite où se trouve le canal. Chacun de ces axones-troncs se termine par une sorte de renflement, comme le pied d'un champignon, que les neurobiologistes appellent le bouton synaptique, en référence à la 'synapse' - cet espace très fin séparant l'axone de la dendrite. Ce bouton synaptique est rempli de molécules prêtes à

jaillir dans la synapse en direction de la dendrite. Ce sont ces molécules qui donnent l'ordre aux canaux synaptiques de s'ouvrir, elles transmettent des signaux entre les neurones, ce qui leur vaut leur nom de *neurotransmetteurs*. Vous avez peut-être déjà entendu le nom de certains neurotransmetteurs : la dopamine, la sérotonine, ... la plupart des médicaments utilisés pour soigner les troubles d'ordre psychologique agissent en modifiant la quantité de ces molécules.

Après avoir traversé la fente synaptique, chaque neurotransmetteur vient s'insérer dans un *récepteur*, comme une clef dans une serrure, pour activer un canal ionique. Dans le cas le plus simple, le récepteur déclenche directement l'ouverture du canal pour permettre aux ions de passer. Selon le type de canal qui est ouvert, le neurone va se dépolariser ou s'hyperpolariser, selon le sens de transit des charges électriques. En principe, le neurone a plutôt tendance à se dépolariser - les ions positifs situés en dehors s'engouffrent vers le milieu intérieur chargé négativement. Mais certains canaux fonctionnent de manière inverse en faisant rentrer encore d'avantage de charges négatives dans le neurone, pour l'hyperpolariser. Ce système de communication neuronale est une merveille de micro-technologie. Songez que chaque contact entre un neurotransmetteur et un récepteur déclenche une cascade de réactions chimiques spécifique de ce type particulier de neurotransmetteur et de récepteur. Comme il existe des dizaines de types de neurotransmetteurs et de récepteurs différents, l'ensemble des combinaisons possibles est très large, ce qui dote la communication neuronale d'une grande richesse de vocabulaire.

Du tac au tac

Le réseau qui relie les neurones les uns aux autres est très dense. On estime qu'en moyenne, chaque neurone communique avec dix mille de ses collègues - comme si dix mille personnes cherchaient en permanence à vous joindre au téléphone. Ces influences peuvent être excitatrices ou inhibitrices. Elles sont dites inhibitrices quand les neurotransmetteurs libérés dans la synapse provoquent l'entrée de charges négatives dans la dendrite, le potentiel électrique du neurone devient alors plus négatif - il s'hyperpolarise. Elles sont dites excitatrices dans le cas contraire, quand les neurotransmetteurs provoquent la sortie de charges négatives ; auquel cas le neurone se dépolarise. L'action combinée des influences excitatrices et inhibitrices modifie en permanence le potentiel électrique du neurone au cours du temps, jusqu'à ce que la dépolarisation dépasse un certain seuil. Au-delà de ce seuil, quand les influences excitatrices l'emportent sur les influences inhibitrices, le neurone réagit de façon très brutale en émettant une onde électrique appelée *potentiel d'action*. Cette onde se propage

le long de l'axone jusqu'à la synapse, telle une vague, et déclenche la libération de neurotransmetteurs au niveau du bouton synaptique.

Si l'on mesure localement l'état électrique du neurone, par exemple à l'endroit d'où part le potentiel d'action, tout en haut de l'axone, on constate que l'émission du potentiel d'action se traduit par une montée très brusque du potentiel électrique vers des valeurs positives, avant une retombée tout aussi rapide vers des valeurs négatives. En tout, cet enchaînement montée-descente ne dure pas plus d'une milliseconde. Le même phénomène se reproduit ensuite un peu plus loin le long de l'axone, avec un petit retard, et ainsi de suite ; exactement comme une onde. Si vous avez un petit peu de mal à imaginer cette onde, songez aux vagues qui se créent à la surface de l'eau quand vous jetez un caillou au milieu d'un bassin. Ces vagues mettent un certain temps à atteindre le bord du bassin. De même, le potentiel d'action met un certain temps pour atteindre le bouton synaptique, tout au bout de l'axone - environ un centième de seconde pour parcourir une distance de quelques centimètres. Par contre, si vous observez une petite feuille flottant à la surface de l'eau, vous pouvez la voir monter et descendre au rythme des vagues selon un rythme beaucoup plus rapide. Chaque montée-descente correspond à la montée et la descente du potentiel électrique que l'on peut mesurer localement. L'enchaînement des vagues est ce que l'on appelle un train d'ondes, comme si chaque vague était un wagon.

Le potentiel d'action est lui aussi un wagon. Un neurone peut réagir à une stimulation en produisant un potentiel d'action unique - l'équivalent d'une petite vague esseulée - ou bien un train de potentiels d'action. Si ces potentiels d'action se suivent les uns les autres à un rythme régulier, comme les vagues produites par le 'plouf' du caillou, on dit que le neurone oscille, comme la surface de l'eau. La fréquence de cette oscillation est le nombre de potentiels d'actions que générerait le neurone s'il oscillait à ce rythme pendant une seconde. Cette fréquence est comptée en nombre de Hertz, ou 'Hz'. On dit d'un neurone qu'il 'décharge' à une fréquence de 40 Hz, s'il est sur un rythme de 40 potentiels d'action par seconde - 40 wagons accrochés les uns aux autres. Cela ne veut pas dire nécessairement qu'il émet effectivement 40 potentiels d'action : une oscillation à 40 Hz, cela peut être aussi quatre potentiels d'action qui s'enchaînent en un dixième de seconde ; c'est le rythme qui compte, pas la durée. Je me permets d'insister car cette capacité des neurones à osciller joue un rôle important dans le fonctionnement cérébral, notamment en ce qui concerne l'attention. Les neurones oscillent d'ailleurs souvent ensemble, de façon synchrone, comme s'ils se mettaient d'accord pour générer leurs potentiels d'action en même temps. C'est le phénomène de synchronie neuronale sur lequel nous reviendrons.

Après chaque potentiel d'action, le neurone passe par une période dite *réfractaire* pendant laquelle il doit se reposer, ce qui impose une limite théorique à sa fréquence de décharge. Ce repos est de l'ordre de deux millisecondes, si bien qu'un neurone peut tout de même générer plusieurs centaines de potentiels d'action par seconde, si tous les neurones qui le stimulent sont excitateurs : il se dépolarise, décharge, attend, puis se dépolarise encore, décharge, et ainsi de suite. Mais en réalité, la plupart des neurones fonctionnent avec des fréquences de décharge bien plus faibles, à cause des influences inhibitrices qu'il subit.

Les électrophysiologistes représentent généralement les variations du potentiel électrique des neurones sous forme de courbes, avec le temps en abscisse et le potentiel en ordonnée. Dans ces tracés, les potentiels d'action ressemblent à de petites pointes, ce qui leur vaut d'être appelés 'spike' - nom anglais désignant à la fois une pointe, et un smash au volley-ball, ce qui a l'avantage de bien rendre compte du caractère spectaculaire de ce type d'évènements. Un dispositif électronique simple, disponible dans tous les laboratoires d'électrophysiologie, permet également de convertir l'activité électrique des neurones sous forme sonore. Les variations continues du potentiel électrique produisent alors un petit grésillement, tandis que les potentiels d'action émettent un 'tac' très caractéristique. Il est alors possible 'd'écouter' les neurones communiquer entre eux, au rythme de ces petits 'tacs' ... 'tac ... tac ... tac tac ... tac'.

Après avoir parcouru toute la longueur de l'axone, le potentiel d'action arrive au niveau du bouton synaptique où il provoque la libération des neurotransmetteurs dans l'espace synaptique. Ces neurotransmetteurs traversent l'espace les séparant des récepteurs situés sur les dendrites du neurone suivant, se fixent sur ces récepteurs et provoquent l'ouverture des canaux ioniques et la dépolarisation ou l'hyperpolarisation de ce neurone cible. Si le potentiel électrique de ce dernier dépasse un seuil, il émet à son tour un potentiel d'action qui se propage le long de son axone, et ainsi de suite.

Cette alternance de deux voies de communication, électrique et chimique, rappelle un peu ces indiens scrutant les signaux de fumée dans les bandes-dessinées. Perché au bord d'un canyon, un premier indien aperçoit au loin des signaux de fumée ; il saute alors sur son cheval et galope jusqu'au bord du canyon suivant. Aussitôt arrivé, il allume un feu, et envoie à son tour d'autres signaux de fumée. Un second indien aperçoit ces signaux depuis l'autre côté du canyon, saute sur son cheval, et ainsi de suite ... Comme ces indiens, les neurones utilisent principalement deux modes pour déplacer les signaux à travers le cerveau, par voie électrique le long de l'axone - à cheval - et par voie chimique pour traverser les fentes synaptiques - ce sont les signaux de fumée.

En fait, chaque indien ne voit pas un seul signal de fumée, mais dix mille, allumés par dix mille indiens, et certains d'entre eux signifient : 'tout va bien, rien à signaler, surtout ne faites rien', et d'autres : 'alerte, la cavalerie arrive, dépêchez-vous de donner l'alerte'. Le premier type de signal est évidemment inhibiteur, et le deuxième type excitateur. Tant que l'indien dénombre une quantité équivalente de signaux excitateurs et inhibiteurs, il ne sait pas trop quoi faire et reste sur place ; mais si la proportion de signaux de fumée excitateurs augmente jusqu'à dépasser un certain seuil, l'indien finit par s'inquiéter et décide de donner l'alerte. Il saute alors sur son cheval pour envoyer à son tour un signal de fumée.

En connectant les neurones entre eux de diverses façons, on peut créer toute sorte de circuits amusants. Si vous connectez par exemple deux neurones entre eux, en collant l'axone-tronc du premier aux dendrites-branches du second, et réciproquement, vous obtenez un circuit tout à fait différent selon que les neurones s'inhibent ou s'excitent mutuellement. Si les deux neurones sont excitateurs, le résultat n'est pas très intéressant : chacun excite l'autre jusqu'à l'amener à sa fréquence de décharge maximale et les potentiels d'action se succèdent simplement les uns aux autres à un rythme effréné. Si l'un des neurones est inhibiteur et l'autre excitateur, le résultat est beaucoup plus intéressant : plus le neurone excitateur est actif, plus il active le neurone inhibiteur ; mais plus le neurone inhibiteur est actif, plus il inhibe le neurone excitateur, donc moins le neurone excitateur est actif. Donc plus le neurone excitateur est actif, et moins il est actif. Vous me suivez ? Plus il y a de gruyère, plus il y a de trous, et plus il y a de trous, moins il y a de gruyère. Ce petit système de deux neurones se comporte de façon oscillatoire. Car lorsque l'un des deux neurones s'active, il s'écoule toujours un certain temps avant que l'autre neurone ne subisse les effets de cette activité. Ce petit délai détermine la fréquence de l'oscillation, plus il est long et plus la fréquence de l'oscillation est lente.

Il est donc très facile pour le cerveau de générer des oscillations, de fréquences très diverses. C'est ce que constata l'Allemand Hans Berger quand il fut le premier à mesurer l'activité électrique d'un cerveau humain en collant une électrode sur la tête du fils de son jardinier, dans les années 1920. Berger souhaitait découvrir les mécanismes de la télékinésie, la transmission de pensée. Il échoua dans cette entreprise mais découvrit à la place de magnifiques oscillations à 10 Hz, rapidement baptisées rythme 'alpha'. Ce fut le premier rythme découvert dans le cerveau de l'homme, avant le rythme bêta, autour de 20 Hz, et le rythme gamma, autour de 40 Hz, deux rythmes jouant un rôle important pour l'attention. Berger venait aussi d'inventer l'électro-encéphalographie, ou EEG, la technique la plus utilisée aujourd'hui pour mesurer l'activité du cerveau humain.

La démarche expérimentale en neurosciences cognitives

Les neurosciences cognitives cherchent à comprendre comment l'action collective des neurones permet au cerveau humain de percevoir le monde et d'agir sur lui, de façon parfois efficace chez les personnes en bonne santé, et parfois moins efficace, chez les patients souffrant de lésions cérébrales ou de maladies neurologiques.

Pour cela, les chercheurs étudient le cerveau à plusieurs échelles. Tous les niveaux, toutes les échelles, sont intéressantes ; c'est ce qu'il faut retenir de cette métaphore planète-cerveau : il n'existe pas un niveau privilégié pour étudier le cerveau. Certains s'intéressent aux aires de Brodmann, à leur fonction, à leurs interactions, ... c'est un peu le niveau 'géopolitique', celui concerné par les grands équilibres planétaires. D'autres chercheurs s'intéressent au neurone ou à la synapse ... c'est le niveau de l'individu. Chacun essaie à sa façon de comprendre le cerveau, avec des techniques très différentes selon l'échelle considérée. Il en résulte une stratification en termes d'échelles qui organise les neurosciences cognitives en plusieurs champs de recherches parallèles et largement complémentaires.

Quel que soit le niveau auquel il se situe, le chercheur en neurosciences cognitives essaie presque toujours d'établir une correspondance entre l'activité ou l'organisation du cerveau et le comportement du système qu'il pilote : le corps. Dans la plupart des cas, il s'agit du comportement moteur, c'est à dire l'ensemble des phénomènes corporels qui mettent en jeu les muscles, ce qui inclue la parole. Mais il peut aussi s'agir d'autres formes de réactions du corps, comme la libération d'hormones dans certains organes. Dans tous les cas, toute correspondance stable et reproductible est rapidement publiée sous la forme d'un article dans l'une des nombreuses revues spécialisées du domaine.

Etudier le comportement, cela ne signifie pas simplement étudier la contraction des muscles lors d'un mouvement du bras. Les neurosciences cognitives s'intéressent au comportement au sens large, en s'interrogeant sur les raisons pour lesquelles le cerveau privilégie un geste plutôt qu'un autre. Quand un chercheur demande à une personne de retenir une liste de six lettres - 'D ... C ... M ... K ... P ... B' - il tente de comprendre comment le cerveau peut, quelques secondes plus tard, restituer fidèlement chacune de ces six lettres. Mais ce n'est pas cette série de six gestes articulatoires qui l'intéresse, mais plutôt les mécanismes neuronaux qui ont permis au cerveau de garder en mémoire les six lettres, et de prononcer celles-ci, précisément. En répétant l'expérience un grand nombre de fois et en mesurant soigneusement comment varie l'activité cérébrale de cette personne selon qu'elle arrive ou non à réciter les six lettres, le chercheur peut identifier les régions du cerveau qui semblent moins actives quand la

mémorisation est imparfaite. Sur un plan purement descriptif, il s'agit bien d'établir une correspondance entre l'activité du cerveau et le comportement moteur de l'individu, même si c'est en réalité à la mémoire, et à sa modulation par l'attention, que s'intéresse le chercheur.

Les neurosciences 'cognitives'

La mémoire et l'attention ne sont ni des comportements, ni des activités neuronales, mais ce que l'on appelle des facultés, ou des fonctions *cognitives*. Les neurosciences cognitives font donc intervenir trois niveaux de description : le niveau *comportemental*, le niveau *neuronal* et le niveau *cognitif*. A chaque niveau, sa description ; une description comportementale de l'expérience précédente retiendrait qu'une personne s'est présentée au laboratoire, a lu des listes de six lettres et les a récitées à haute voix en commettant de temps en temps des erreurs. Une description neuronale retiendrait que certains neurones du gyrus frontal inférieur ont augmenté le rythme de leurs potentiels d'action entre le moment de la lecture et celui de la récitation. Enfin, une description cognitive retiendrait la mise en jeu d'un ensemble de processus d'analyse visuelle, de reconnaissance et d'encodage en mémoire de six lettres, modulée par l'attention, suivis par une phase de maintien en mémoire de travail de cette information, avant une étape finale de rappel de cette information et de conversion sous forme de programme moteur articulaire ... ouf !

Les neurosciences cognitives doivent leur nom à cette particularité de relier le niveau neuronal et le niveau comportemental en passant par le niveau cognitif. Toutes les neurosciences ne sont pas cognitives. Certains neurobiologistes consacrent toute leur carrière à étudier les mécanismes biologiques gouvernant la vie des neurones sans jamais se préoccuper de leur importance éventuelle pour les facultés cognitives. Ce qui distingue le chercheur en neurosciences *cognitives*, c'est sa volonté de comprendre une fonction cognitive. Sa tâche est donc double, puisqu'il doit d'abord traduire le comportement qu'il observe en termes cognitifs - mémorisation, déplacement de l'attention, imagerie mentale, programmation motrice, etc. - puis associer chacun de ces processus cognitifs aux variations de l'activité neuronale qu'il a pu mesurer.

Parmi ces trois niveaux, seuls le niveau neuronal et le niveau comportemental peuvent être quantifiés par des mesures objectives, et c'est ce qui fait la principale difficulté, et peut être la spécificité, des neurosciences cognitives. On peut en effet mesurer l'activité électrique d'un neurone et la traduire en microvolts ou noter le nombre de lettres correctement récitées par le sujet, mais on ne peut pas observer, et encore moins mesurer, directement, la mémoire, pas

plus que l'attention. On ne peut mesurer que leurs conséquences sur le comportement. Il faut donc reconstruire intellectuellement, à partir de ce comportement, l'enchaînement des processus cognitifs que le sujet a dû mettre en jeu pour le produire.

Concevoir une expérience. La psychologie cognitive

Ce jeu de construction intellectuelle est la grande affaire de la Psychologie Cognitiveⁱ. Pour la Psychologie Cognitive, chaque comportement, depuis la prononciation d'un mot lu sur un écran jusqu'à la conduite automobile, est le produit d'une interaction entre des processus mentaux simples, qu'il est possible d'isoler et d'étudier séparément en laboratoire. Le pari de cette discipline, c'est qu'il est ensuite possible de reconstituer comme un jeu de Lego, à partir de ces éléments simples, un modèle des processus mentaux impliqués dans le comportement complexe. L'activité principale du psychologue cognitif consiste donc à bâtir des modèles explicatifs des comportements qu'il observe, à partir des briques élémentaires que constituent les opérations mentales. La Psychologie Cognitive est pour cette raison une discipline essentielle des neurosciences cognitives, absolument centrale dans l'étude de l'attention.

Les psychologues cognitifs sont des gens à peu près comme les autres, à ceci près qu'ils ne peuvent s'empêcher de disséquer les opérations mentales mises en jeu dans chacune des activités de la vie quotidienne, comme un cuisinier cherchant à deviner ce que vous avez mis dans votre poulet au curry - une phase de mémorisation par-ci, un léger déplacement de l'attention par-là, et sans doute un peu d'imagerie mentale. Leur occupation favorite est d'imaginer des jeux, et d'y faire jouer des gens tout en mesurant tout ce qu'il est possible de mesurer dans leur comportement : le nombre de millisecondes mis pour faire ceci ou cela, ou le nombre d'erreurs, etc. Les expériences de psychologie cognitive ressemblent d'ailleurs tellement à des jeux qu'elles sont parfois reprises telles qu'elles sous forme de jeux de société ou de jeux vidéo. Pourtant, la conception d'une expérience de psychologie cognitive n'a rien d'un jeu d'enfant, et les bonnes expériences pour étudier l'attention ne courent pas les rues. Une bonne expérience doit manipuler de façon isolée un processus cognitif simple - le déplacement de l'attention visuelle, par exemple - qui, d'ordinaire, interagit avec d'autres processus, comme le déplacement du regard ou celui de l'attention auditive. C'est la base de la bonne vieille méthode scientifique dite 'variationnelle' ; l'expérimentateur fait varier un paramètre et mesure scrupuleusement l'effet produit ; comme dans la fameuse blague, il coupe les jambes de la grenouille, lui crie 'saute !', et la grenouille ne saute pas ; il en conclue que les jambes servent à entendre. 'Manipuler' signifie ici 'faire varier' : en faisant varier la hauteur depuis laquelle il lâche sa pièce d'un euro, et en mesurant à chaque fois la durée de

la chute, l'expérimentateur peut en déduire une loi concernant la gravité. La psychologie cognitive procède d'une démarche semblable.

La conception d'une expérience demande donc beaucoup de réflexion, pour parvenir à un exercice qui manipule spécifiquement le processus mental que l'on souhaite étudier. Le travail de l'expérimentateur qui souhaite étudier l'attention commence donc par une phase très créative visant à mettre au point un jeu qui nécessite l'attention. Ce n'est pas le plus difficile, puisque pratiquement toutes les activités de la vie mettent en jeu l'attention, mais il doit encore imaginer une variante de son exercice qui mette en jeu la même séquence d'opérations cognitives, très exactement, à l'exception de celle qu'il souhaite étudier, ou qui engage celle-ci à un degré moindre. Il doit donc imaginer un autre jeu, quasi identique, mais qui demande soit de faire moins attention, soit de faire attention ailleurs. En neurosciences cognitives, cette variante de l'exercice de départ est appelée *condition contrôle*. En comparant l'activité cérébrale mesurée pendant que le sujet réalise la tâche principale ou la condition contrôle, l'expérimentateur conclut que, 'toutes choses étant égales par ailleurs', une variation du processus d'intérêt - en l'occurrence l'attention - s'accompagne de telle ou telle modification de l'activité du cerveau.

L'idée d'utiliser une condition contrôle ne vient pas de la psychologie cognitive. C'est l'une des bases du raisonnement scientifique, et même du raisonnement tout court. Si je veux savoir si ce sont mes nouvelles chaussures qui me font mal aux pieds, j'essaie de remettre mes anciennes chaussures (condition contrôle) pour voir si j'ai encore mal. Si je n'ai plus mal, j'en conclus que 'toutes choses étant égales par ailleurs', j'ai moins mal avec mes anciennes chaussures. J'en déduis donc que le problème vient bien de mes nouvelles chaussures. Comme on peut s'en douter, la question de savoir si une expérience est 'bien contrôlée', c'est à dire si la condition contrôle fait bien intervenir les mêmes opérations mentales que la condition principale à l'exception de celle que l'on souhaitait étudier, est toujours source de grands débats dans les réunions de laboratoire. On ne compte plus le nombre d'articles refusés par les meilleures revues scientifiques à cause d'une condition contrôle imparfaite, au grand désespoir des chercheurs ayant consacré de longs mois à leur étude. Ce souci de rigueur est pourtant légitime. Si le jour où j'essayais mes nouvelles chaussures, j'avais exceptionnellement marché cinquante kilomètres de plus que d'habitude, je ne pourrais évidemment pas savoir si ma douleur aux pieds est due aux nouvelles chaussures ou à cet effort inhabituel. Il est donc important de comparer des situations comparables.

J'insiste sur la difficulté de définir une condition contrôle rigoureuse, parce que les personnes extérieures au domaine ne comprennent pas toujours bien pourquoi les expériences de laboratoire sont souvent simplistes, peu réalistes, et peu ambitieuses.

Pourquoi s'intéresser au comportement d'une personne réduite à regarder des ronds s'affichant sur un écran ? Pourquoi ne pas plutôt étudier la concentration du pilote de Formule 1 lancé à 300 km/h ou celle du champion de tennis abordant le tie-break du dernier set face à une foule hostile ? Tout simplement parce qu'il est difficile d'envisager une condition contrôlée rigoureuse, qui fasse intervenir *exactement* les mêmes processus cognitifs *sauf* ceux spécifiques de ce type particulier d'attention et de cette situation précise. Les expériences de laboratoire n'étudient donc généralement que des enchaînements de processus cognitifs bien définis, pouvant chacun être manipulés de façon indépendante. Si vous pensiez avoir trouvé une expérience géniale pour étudier l'attention, vous voilà donc prévenu ; même un jeu comme le sudoku représente une situation cognitive trop complexe pour être étudié précisément en laboratoire.

C'est cassé. La neuropsychologie.

Vous aurez compris que lors d'une étude de neurosciences cognitives, une grande partie de la réflexion est consacrée à la partie 'cognitive', pour aboutir à une expérience bien conçue, et bien contrôlée. La partie 'neurosciences' s'intéresse ensuite à l'activité du cerveau des sujets qui réalisent l'expérience. Si 'toutes choses étant égales par ailleurs', le chercheur constate qu'une différence d'attention s'accompagne d'une différence d'activité dans telle ou telle région du cerveau, il sera tenté d'associer les deux phénomènes, en gardant tout de même en tête le vieil adage selon lequel 'corrélation n'est pas raison' ; c'est à dire qu'une association, même systématique, n'est pas la preuve d'une relation de cause à effet entre le phénomène biologique et le phénomène cognitif. Ce n'est pas parce que la grenouille ne saute pas qu'elle est devenue sourde une fois ses jambes coupées.

Les premières personnes à s'être posé la question du lien entre cerveau et cognition étaient des médecins, qui remarquaient que certaines lésions du cerveau s'accompagnaient de troubles cognitifs parfois très spécifiques. L'accumulation de ces observations a progressivement donné naissance à une science, la neuropsychologie clinique, qui s'intéresse donc aux conséquences des lésions ou des pathologies cérébrales sur les fonctions cognitives. On situe généralement l'origine de la neuropsychologie clinique moderne à la découverte par le français Paul Broca en 1861 qu'une lésion du cortex frontal gauche suffit à priver un individu de la parole. Broca reçut un jour la visite d'un certain Monsieur Leborgne incapable de prononcer autre chose que le son 'tan'. Broca le surnomma 'tan', lui ouvrit le crâne - une fois celui-ci décédé de manière naturelle - et découvrit une grave lésion au niveau du gyrus frontal inférieur gauche. Broca en fut récompensé en devenant le premier membre

du club très restreint des neurologues ayant une aire corticale à leur nom, celle endommagée chez 'tan' : l'aire de Broca. Il y fut bientôt rejoint par un autre médecin, l'allemand Carl Wernicke, qui identifia quelques années plus tard par des moyens semblables une région du cortex nécessaire à la compréhension du langage, l'aire de Wernicke, à la limite du lobe temporal et du lobe pariétal. Depuis Broca et Wernicke, des générations de neuropsychologues se sont succédées sans laisser leur nom dans le cerveau, mais en posant toujours les mêmes questions : 'en quoi le comportement de ce patient diffère-t-il de celui d'une personne saine ?', 'quel est l'inventaire des tâches que ce patient fait moins bien, ou différemment d'une personne normale ?', 'quelles sont les fonctions cognitives altérées ?'. Au fil des années, les patients cérébro-lésés, c'est à dire atteints de lésions cérébrales, ont été soumis aux exercices les plus exotiques auxquels on puisse penser, parfois imaginés en quelques jours par des médecins guidés par une intuition géniale.

Le neuropsychologue appuie sa réflexion sur des séries d'entretiens avec le patient et ses proches, et sur les résultats de tests auxquels il soumet le malade. L'incapacité d'un patient à rester assis tranquillement, la tendance d'un autre à attraper tous les objets placés devant lui, sont autant de symptômes qui aident le médecin à mener son enquête. Celle-ci n'aboutit que lorsque le médecin finit par déterminer ce que ces différents symptômes ont en commun, et quels sont les processus cognitifs partagés par toutes les tâches pour lesquelles le patient échoue. La réflexion évolue donc naturellement du niveau comportemental, celui des symptômes, vers le niveau cognitif, puisque l'objectif final du neuropsychologue est d'identifier le ou les processus cognitifs atteints, spécifiquement, par la lésion.

Certaines lésions cérébrales affectent spécifiquement l'attention. Ainsi, les patients atteints au niveau de la partie arrière du lobe pariétal droit souffrent souvent d'un syndrome d'héminégligence, une tendance à négliger, voire à 'oublier', la partie gauche de leur champ visuelⁱⁱ. Ces patients ne sont pas aveugles - ils peuvent voir certains objets situés sur leur gauche - mais ne prêtent aucune attention à ce qui se trouve de ce côté. Un patient héminégligent peut oublier de se raser un côté du visage, ou oublier de manger ce qui se trouve à gauche de son assiette. D'autres lésions du lobe pariétal peuvent empêcher la personne de voir deux objets à la fois, comme dans le syndrome de Balint sur lequel nous reviendrons. Ces troubles sont considérés par les neurologues comme des dysfonctionnement de l'attention.

Heureusement pour les successeurs de 'tan', il n'est plus nécessaire aujourd'hui d'ouvrir le capot pour examiner le cerveau d'un malade. Aujourd'hui, une technique appelée Imagerie par Résonance Magnétique, ou IRM, permet de visualiser en 3D le cerveau de n'importe qui, au seul prix d'un séjour de quelques minutes dans un aimant surpuissant. L'avènement de ce

que l'on appelle la neuroimagerie, et dont l'IRM représente le fleuron, a radicalement changé la neuropsychologie clinique, en multipliant le nombre de patients étudiés et la précision des observations anatomiques. Le recours systématique à ces techniques puissantes permet maintenant de recouper les symptômes observés chez de très nombreux patients, et d'en trouver le dénominateur commun, aussi bien cognitif qu'anatomique. Grâce à cette évolution technologique, chercheurs et cliniciens disposent aujourd'hui de bases de données très complètes reliant lésions cérébrales et déficits cognitifs, au point que l'on pourrait pratiquement donner le nom d'un neuropsychologue, ou d'une marque d'IRM, à chaque région du cortex.

Cette abondance d'observations a largement confirmé ce qu'avaient pressenti Broca et Wernicke : la plupart des régions du cortex remplissent des fonctions bien précises. C'est ce que l'on appelle le principe de ségrégation fonctionnelle - 'qui se ressemble s'assemble'. Les neurones participant aux mêmes processus cognitifs se trouvent souvent les uns à côté des autres dans les mêmes parties du cerveau, sans doute pour interagir plus facilement. C'est grâce à ce principe qu'il est possible de dire grosso modo 'à quoi servent' la plupart des aires de Brodmann.

Ce mode d'organisation n'a pas que des avantages. Dans certaines entreprises, le président et le vice-président ne voyagent jamais dans le même avion pour qu'il reste toujours un survivant au cas où l'un des deux s'écrase. Malheureusement, les neurones chargés d'une même fonction voyagent toujours ensemble, collés les uns aux autres. Si un neurone est impliqué dans la reconnaissance des visages, il y a toutes les chances pour que ses voisins le soient aussi. Il suffit donc que cette partie du cerveau soit détruite pour que le cerveau ne sache plus reconnaître les visages. C'est ce que l'on appelle la prosopagnosie, que l'on constate généralement chez les patients atteints dans un gyrus en forme de fuseau situé sur le plancher du lobe temporal : le gyrus fusiforme.

Le principe de ségrégation fonctionnelle permet de nommer les régions du cortex à partir de la fonction qui les caractérise. On parle ainsi en anglais de la 'fusiform face area' pour désigner cette partie du gyrus fusiforme nécessaire à la reconnaissance des visages, ou de la 'word form area', située aussi dans le gyrus fusiforme et spécialisée dans la reconnaissance des mots. Le cortex moteur désigne quant à lui une large bande de cortex verticale située dans le lobe frontal, juste en avant du sillon central, là où on porte parfois ses lunettes de soleil quand on ne veut pas les avoir sur le nez, sur le dessus de la tête. Il sert à mettre les muscles du corps en action, avec une sous-région particulière pour contrôler la main, le pied, et toutes les autres parties du corps. Il n'existe pas à proprement parler de "région de l'attention", bien que la lésion de certaines zones provoque, comme nous l'avons vu, des déficits attentionnels marqués.

Voir le cerveau travailler, dans l'espace et le temps

Grâce à l'IRM, il est maintenant possible de voir non seulement la forme du cerveau, mais aussi son activité, sans jamais avoir à ouvrir le crâne - on parle alors d'IRM fonctionnelle, ou d'IRMf. L'IRMf voit le cerveau comme un assemblage de milliers de petites briques de Lego de quelques millimètres de côté, appelés voxels, dont elle sait mesurer la consommation d'oxygène. Comme les neurones ont besoin d'oxygène pour travailler, l'IRMf permet d'identifier avec précision les régions du cerveau dont l'activité augmente, ou diminue, quand une personne est occupée à faire quelque chose - qu'il s'agisse de lire attentivement un livre ou de s'imaginer en train de jouer au tennis. L'IRMf fournit donc des cartes d'activité cérébrale en trois dimensions.

En comparant pour chaque voxel la consommation d'oxygène du cerveau pendant une tâche cognitive et pendant sa condition contrôle, il est maintenant possible de localiser au millimètre près les zones cérébrales associées à un processus cognitif. Si vous avez déjà vu des images de cerveau avec de petites tâches colorées, il s'agissait vraisemblablement d'IRMf. Il pouvait aussi s'agir de la tomographie par émissions de positons, ou TEP, moins précise que l'IRMf mais également très utile, car elle permet d'obtenir d'autres cartes reflétant d'autres mesures, comme le débit sanguin, la consommation de glucose, ou bien la concentration de certains neurotransmetteurs.

La TEP et l'IRMf ont pour seul inconvénient d'être des techniques assez lentes : l'IRMf met plusieurs secondes pour mesurer l'activité de l'ensemble du cerveau, et la TEP plusieurs dizaines de secondes. Ces techniques ne mesurent pas non plus directement l'activité neuronale, mais seulement la *conséquence* de cette activité, qui intervient toujours avec un certain retard. L'IRMf, par exemple, est surtout sensible à la quantité d'oxygène que l'hémoglobine apporte aux neurones pour les recharger après qu'ils se soient activés. Comme cette recharge intervient toujours avec un certain retard après l'activation neuronale - une seconde environ - l'IRMf ne mesure jamais l'activité du cerveau *en direct*. L'IRMf et la TEP ont donc beau produire des images de qualité, elles ne sont pas assez rapides pour rendre vraiment compte de la vitesse à laquelle le cerveau travaille. Songez qu'il faut moins d'un quart de seconde pour reconnaître un visage, et qu'un neurone peut décharger un potentiel d'action toutes les deux millisecondes ! S'il suffit de vingt-cinq images par seconde pour suivre un match de foot, il en faut au moins mille pour suivre le match joué par les neurones. Utiliser l'IRMf et la TEP pour savoir comment le cerveau reconnaît un visage, c'est un peu comme résumer un match de foot en donnant simplement la composition des équipes. C'est une information intéressante, mais qui ne suffit pas à rendre compte du match. L'IRMf et la TEP

servent donc surtout à savoir 'qui joue à quel poste et dans quelle équipe', c'est à dire quelles sont les régions cérébrales qui participent à chaque fonction cognitive. Mais pour étudier *comment* fonctionne le cerveau, les chercheurs doivent utiliser d'autres mesures de l'activité cérébrale, à très haute résolution temporelle.

Il est possible de mesurer instantanément l'activité électrique au voisinage d'un neurone en plaçant simplement une petite pointe de métal conducteur à proximité - on dispose alors d'une microélectrode, qui une fois reliée à un système d'enregistrement externe, permet de suivre en direct les réactions électriques du neurone et de ses voisins immédiats, 'tac,tac,tac'. Certains dispositifs un peu plus complexes permettent même de mesurer le potentiel électrique *intracellulaire*, le potentiel à l'*intérieur* du neurone. Ces enregistrements ultra-précis permettent de détecter l'instant précis où le neurone émet ses potentiels d'action ; ce sont les mesures les plus précises que l'on puisse imaginer, tant sur le plan spatial que temporel ... mais elles ne sont possibles, pratiquement, que chez l'animal. Qui aurait envie d'avoir des électrodes plantées dans son cerveau ? A part pour se soigner, personne. Les électrophysiologistes utilisent donc ces électrodes pour étudier le cerveau de nombreuses espèces animales, et en définitive, pour mieux comprendre le fonctionnement du cerveau humain. L'expérimentation animale pose toujours des questions éthiques, bien sûr, mais il faut bien admettre que l'immense majorité des connaissances dont nous disposons sur le fonctionnement du cerveau provient d'études faites chez l'animal, soit directement, soit indirectement, dans le cas d'études menées chez l'homme mais inspirées de résultats obtenus chez l'animal.

En attendant un jour la mode du neuro-piercing, peu d'êtres humains acceptent qu'on leur ouvre le crâne pour y placer des électrodes. C'est pourtant le choix que font chaque année des centaines de patients souffrant de maladies neurologiques, comme la maladie de Parkinson ou l'épilepsie. Dans le cas de l'épilepsie, il s'agit de malades dont les crises ne succombent à aucun traitement médicamenteux. L'implantation d'électrodes intracérébrales, placées directement dans leur cerveau, permet alors d'identifier les populations de neurones qui sont à l'origine des crises et qui doivent être enlevées. Chez ces patients, le cerveau humain peut être enregistré avec une très grande précision spatiale et temporelle, à l'échelle du millimètre et de la milliseconde, et éventuellement pendant des tâches de psychologie cognitive pour étudier l'activité neuronale associée. Ce livre mentionne plusieurs exemples d'enregistrements de ce type car c'est une technique à laquelle j'ai souvent recours.

Mais en dehors de ces cas exceptionnels, aucune technique ne permet de mesurer l'activité du cerveau humain à l'échelle de la milliseconde et du millimètre de façon non-invasive, sans chirurgie. Par contre, une simple électrode scotchée à la surface de la tête suffit à mesurer

toutes les millisecondes le signal électrique généré par les neurones. C'est la technique de l'électro-encéphalographie inventée par Hans Berger, la fameuse EEG. Ce signal est dû aux mouvements des ions au voisinage des canaux ioniques qui entraînent des accumulations de charges négatives et positives à différents endroits le long du neurone. L'existence simultanée, et à faible distance l'un de l'autre, d'un excès de charges positives et de charges négatives crée alors ce que l'on appelle en physique un dipôle, qui modifie le potentiel électrique autour du neurone. Lorsque ce phénomène se produit en même temps dans des millions de cellules nerveuses situées côte à côte, la modification du potentiel devient suffisamment forte pour qu'elle puisse être détectée depuis la surface du scalp, à quelques centimètres de distance. Mais le signal mesuré par l'électrode correspond à l'activité électrique moyenne d'une population de neurones très vaste, distribuée sur plusieurs centimètres carrés de cortex. Il s'agit donc d'une mesure globale, qui ne renseigne pas sur ce que fait chaque neurone en particulier. C'est un peu comme le brouhaha que vous entendez quand vous passez aux abords d'un stade un soir de match de foot. Vous n'entendez pas les paroles prononcées par chacun des spectateurs, mais plutôt une sorte de clameur, qui suffit tout de même à savoir quand un but est marqué et par quelle équipe. L'EEG mesure la clameur des neurones, et permet de suivre en direct l'action qui se déroule dans le cerveau.

Depuis les années 90, les chercheurs disposent également d'une technique pour mesurer le champ magnétique produit par les neurones, la Magnétoencéphalographie, ou MEG. Comme le remarqua le danois Hans Christian Orsted au XVIII^{ème} siècle, tout courant électrique, c'est à dire tout mouvement de charge électrique, génère un champ magnétique ; les mouvements de charges électriques au voisinage des neurones génèrent donc de petits champs magnétiques. Comme pour l'EEG, les petits champs magnétiques générés de façon synchrone par des millions de neurones situés côte à côte peuvent se sommer pour créer un champ détectable depuis la surface de la tête, à condition d'y placer un capteur adapté, appelé SQUIDⁱⁱⁱ. Ce champ est faible - de l'ordre du millionième du champ magnétique terrestre - mais peut être détecté à condition d'isoler le sujet dans une chambre blindée, et de le placer dans une sorte de gros sèche-cheveux refroidi à l'hélium liquide. La MEG a une meilleure précision spatiale que l'EEG, mais coûte aussi beaucoup plus chère, sans quoi elle aurait sans doute fini par la remplacer dans la plupart des laboratoires.

L'IRMf, la TEP, l'EEG et la MEG sont donc les quatre principales techniques utilisées pour mesurer l'activité cérébrale chez l'homme. Les deux premières servent à savoir *où* sont les régions cérébrales les plus actives pendant une tâche cognitive, et les deux dernières *quand* celles-ci s'activent. Malheureusement, pour l'instant, aucune technique non invasive ne peut répondre à la fois aux questions 'où' et 'quand', et c'est pourquoi il est souvent question dans

ce livre d'études faites chez l'animal, ou en collaboration avec des patients épileptiques enregistrés par des électrodes intracérébrales.

Une science toute neuve

C'est la fin de ce petit tour d'horizon des neurosciences cognitives d'aujourd'hui, avec leurs joies et leurs tracas. En définitive, vous aurez compris qu'il n'y a pas *une* technique, ou *une* approche privilégiée pour étudier l'attention. Celle-ci doit être étudiée à de nombreuses échelles et au travers de nombreuses disciplines complémentaires les unes des autres. Les chercheurs qui étudient l'attention disposent donc d'un large éventail d'approches pour mesurer ses mécanismes dans le cerveau à tous les niveaux, depuis le canal ionique jusqu'à l'hémisphère, depuis le dixième de milliseconde jusqu'à la minute, voire plus. Mais cette abondance de techniques ne doit pas donner l'illusion de la complexité ; les neurosciences cognitives sont encore des sciences jeunes, qui restent à l'heure actuelle relativement 'faciles' d'accès, par rapport à d'autres disciplines comme la physique ou les mathématiques. Un étudiant qui arrive dans un laboratoire peut souvent maîtriser en quelques mois à peine les concepts et les techniques qui lui permettront de mener une expérience originale et intéressante. Donc partez du principe que tout ce qui se passe dans le cerveau est finalement assez simple. Vous en savez maintenant largement assez pour aborder la question de l'attention.

ⁱ Neisser U., *Cognitive psychology*, New York, Appleton-Century Crofts, 1967.

ⁱⁱ Milner A. D., et col., *The Cognitive and Neural Bases of Spatial Neglect*, Oxford, Oxford University Press, 2002.

ⁱⁱⁱ L'acronyme SQUID correspond aux initiales du terme anglais Superconducting Quantum Interference Device. Il s'agit d'un dispositif de mesure des champs magnétiques extrêmement faibles utilisant la supraconductivité.