

Un seul état de référence ne suffit pas, car toute activité synaptique apparaissant sur la différence des images entre l'état de repos et l'état de référence peut être attribuée soit à un processus actif qui, pendant l'état de repos, augmente l'activité neuronale, soit à un processus durant l'état de référence réduisant cette activité. Pour lever cette difficulté, nous avons utilisé de nombreuses tâches de référence, variées dans leur contenu cognitif. La logique de cette approche est que, plus les tâches de référence sont multiples et différentes, plus la probabilité qu'elles aient le même effet sur l'activation d'une région est faible.

La conscience au repos

Compte tenu du nombre limité de tâches que l'on peut faire effectuer à un même sujet, une telle étude doit nécessairement être conduite sur différents groupes de sujets, chacun réalisant une tâche de référence particulière en sus de la tâche correspondant à l'état de repos. Nous avons réalisé les expériences avec 63 jeunes hommes, droitiers, dont la langue maternelle était le français, et ayant suivi un enseignement supérieur durant trois à cinq ans. Les neuf protocoles expérimentaux auxquels ils ont été soumis mettaient en jeu un large champ de stimulus et de modes de réponse. Les stimulus étaient aussi bien visuels (une source lumineuse, un dessin...) que sonores (écoute de mots, de phrases et d'histoires). Lors de la condition de repos, on affiche la consigne suivante 30 secondes avant le début de l'acquisition : «La prochaine condition de mesure est une condition de repos. Vous n'aurez pas de tâche particulière à effectuer. Relaxez-vous, essayez de ne pas bouger et gardez les yeux fermés. Laissez aller vos pensées en évitant des activités systématiques comme compter ou repenser aux tâches déjà effectuées.»

Les images ont été acquises par TEP et superposées à des images IRM anatomiques obtenues au préalable. Le résultat principal de cette étude est

que l'état de repos met principalement en jeu un réseau d'aires situées dans l'hémisphère gauche, et deux autres zones, plus réduites, dans l'hémisphère droit (voir la figure 7). Différentes expériences semblent indiquer que ce réseau est bien impliqué dans des processus actifs qui sous-tendent la pensée consciente. Il est intéressant de remarquer que ces régions sont récentes du point de vue phylogénique. Cette découverte vient étayer l'hypothèse selon laquelle la pensée consciente a émergé tardivement dans le règne animal et n'est vraisemblablement à l'œuvre que chez l'homme et ses plus proches parents.

Ces résultats, les premiers obtenus chez l'homme sain, confortent les théories matérialistes de l'esprit. La conscience ne semble être qu'une activité cérébrale particulière, et non, comme les héritiers de la pensée de Descartes le soutiennent, une fonction détachée de tout substrat matériel.

Quel est l'avenir de l'imagerie cérébrale fonctionnelle ? À court terme, il est prévisible qu'elle va poursuivre son expansion et que les études concernant les bases neuronales des fonctions cognitives chez le témoin volontaire se multiplieront. Maintenant que l'on sait que la pensée peut être explorée de façon quantitative, psychologues, linguistes, comportementalistes, et bien sûr neurobiologistes l'utiliseront de plus en plus. À moyen terme, on peut espérer que la comparaison des images obtenues par IRM, TEP et par les méthodes électromagnétiques révélera de nouveaux aspects du fonctionnement cérébral. À plus long terme, une théorie neurobiologique de la pensée devrait émerger de l'ensemble des informations recueillies sur les différents niveaux d'organisation du cerveau. Les neurobiologistes partis à l'exploration du support matériel de la pensée poursuivent leur quête, suivant ainsi le conseil de Bertrand Russell : «Sans doute, il est contraire à la raison de tenter l'impossible ; mais tenter le possible qui a l'air impossible est le sommet de la sagesse».

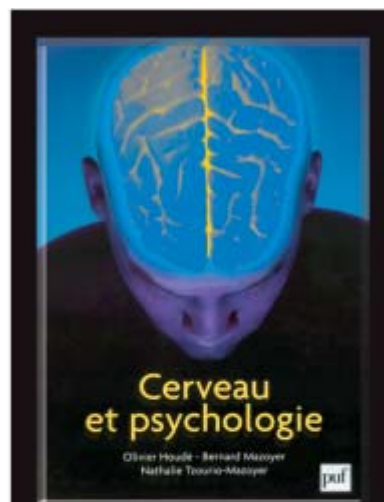
Bernard MAZOYER dirige le Groupe d'imagerie neurofonctionnelle, CNRS UMR6095, CEA LRC36V, Université de Caen et de Paris 5.

B. MAZOYER et al., *Cortical Networks for Working Memory and Executive Functions Sustain the Conscious Resting State in Man*, in *Brain Research Bulletin*, vol. 54, pp. 287-298, 2001.

B. MAZOYER, *Cartographie du cerveau et de la pensée*, in *Le cerveau, le langage, le sens*, Odile Jacob, 2002.

B. MAZOYER, *L'imagerie cérébrale fonctionnelle*, Que Sais-Je n°3268, Presses Universitaires de France, 2002.

O. HOUDÉ, B. MAZOYER, N. TZOURIO-MAZOYER, *Cerveau et Psychologie*, Presses Universitaires de France, 2002.



614 pages - 28 €

“La première synthèse française des données d'imagerie cérébrale et de psychologie expérimentale.

Splendides images.

Un ouvrage qui a sa place dans la bibliothèque de tout homme cultivé.

Indispensable à lire et à méditer.”

Jean-Pierre Changeux,
La Recherche

“Une brillante réussite. L'ouvrage est cohérent,

le style clair et précis, les références toujours pertinentes.”

Michel Imbert,
Pour la science

“Tous ceux qui s'intéressent aux énigmes du cerveau apprécieront l'exhaustivité de l'ouvrage.”

Kheira Betayeb,
Science et vie

“Un événement !”

Hervé Ponchelet,
Le Point

“Un livre très richement illustré. Une référence.”

Impact Médecin

puf

Le développement et l'évolution du système nerveux

PHILIPPE VERNIER

Le système nerveux central, interface du corps et de l'environnement, est, chez l'être humain, le siège de la conscience. Son développement est une succession de segmentations et de régionalisations.

Selon Méphistophélès, le héros diabolique du *Faust*, de Goethe, «La fabrique de la pensée» est «comme un métier de tisserand, où une poussée du pied met en mouvement mille fils, où les navettes circulent de-ci de-là, où les fils se déroulent sans qu'on les voie, où chaque coup produit mille entrecroisements.» Cette vision romantique de la formation du cerveau chez l'embryon est proche de celle des biologistes, aujourd'hui : une même trame guide la formation du cerveau chez tous les vertébrés. Cependant, un plan d'organisation identique n'empêche pas la diversité des cerveaux, ni celle des comportements qui en dépendent. Aussi, depuis deux siècles, les biologistes étudient le développement de cet organe afin d'en comprendre la complexité et de mettre au jour les principes qui gouvernent son élaboration. Ils sont aidés dans leur quête par l'analyse de l'évolution des espèces qui tente de répondre à la question : comment une «forme se forme»? Dans la première moitié du XIX^e siècle, les embryologistes, Karl-Ernst Von Bär et Ernst Hæckel en Allemagne, Geoffroy-Saint-Hilaire, Jean-François Meckel et Étienne Serres, en France, conscients des liens entre les mécanismes de l'évolution et ceux du développement de l'embryon, ont proposé que les modifications du développement de l'embryon seraient la cause de la diversité des formes adultes des animaux.

Par exemple, selon Meckel, Serres et surtout Hæckel, le développement embryonnaire des vertébrés récapitule les étapes de l'évolution. Ainsi, le développement d'un poisson s'arrêterait prématurément, alors que celui de l'oiseau, et *a fortiori* celui de l'être humain, accomplirait quelques étapes supplémentaires. Ce principe de récapitulation «l'ontogénie récapitule la phylogénie» a été «prouvé» par Hæckel au prix... d'une des plus célèbres fraudes de l'histoire des sciences : pour étayer son propos, Hæckel n'a pas hésité à publier des dessins d'embryons de diverses espèces qui n'étaient fidèles ni aux proportions au sein de chaque embryon ni au stade de maturité qui diffère selon les espèces.

Pourtant, depuis une dizaine d'années, l'idée que les étapes du développement embryonnaire se déroulent plus ou moins vite selon les espèces est devenue l'une des clefs de la compréhension de l'action des gènes du développement. Ce phénomène, nommé hétérochronie par Hæckel lui-même, est essentiel à la diversité des formes adultes. À toutes les étapes de l'embryogenèse, l'organisme et le

système nerveux se développent plus ou moins vite et dans des proportions variables selon les espèces.

Les résultats obtenus sur le contrôle génétique du développement du cerveau ont révélé la profonde unité qui marque le développement embryonnaire des vertébrés. De la lamproie à l'homme, les mêmes gènes gouvernent les mêmes étapes de l'embryogenèse. Aujourd'hui, l'homologie des étapes du développement des vertébrés est utilisée par les embryologistes pour comprendre comment de petites variations dans la nature ou l'expression des gènes engendrent une grande variété de formes chez ces animaux.

De l'homogénéité vers l'hétérogénéité

Quels que soient les mécanismes, un système nerveux fonctionnel doit fournir à l'organisme les moyens physiques de recevoir les informations du monde environnant, mais aussi celles qui proviennent du corps lui-même. Pour construire un organe aussi complexe, la solution sélectionnée très tôt au cours de l'évolution a été d'organiser le système nerveux de façon topographique : le rôle de chaque neurone dépend de la place qu'il occupe et de sa localisation au sein des réseaux de neurones qui régissent l'ensemble des comportements animaux. Le développement embryonnaire du système nerveux se résume à la mise en place des neurones au bon endroit et au bon moment. L'établissement ultérieur des connexions appropriées entre les neurones du système nerveux central et la périphérie du corps est l'autre versant de ce développement. Voyons comment ce système nerveux s'organise lors de son développement et comment des territoires s'y différencient grâce à l'action de quelques gènes.

Après la fécondation de l'ovule par le spermatozoïde, l'œuf se divise (voir la figure 2) et forme un amas, nommé morula, de cellules indifférenciées. Puis, cet amas se creuse d'une cavité, le blastocèle. Les cellules constituent deux couches, ou feuillets : l'ectoderme, au-dessus de la cavité,

1. LE SYSTÈME NERVEUX des vertébrés, ici d'une souris (vue du dessus, en haut et de côté, en bas), est, au dixième jour, un tube qui se referme. On a mis en évidence un gène qui n'est exprimé que sur la ligne médiane (en bleu foncé). Celle-ci résulte de la soudure, à la façon d'une «fermeture éclair» des bourrelets neuronaux le long de la face dorsale de l'embryon. Ce dernier mesure ici environ cinq millimètres.