



HAL
open science

L'exploration de la matière cérébrale du XIXe au XXIe siècle

Jean-Gaël Barbara

► **To cite this version:**

Jean-Gaël Barbara. L'exploration de la matière cérébrale du XIXe au XXIe siècle. L'exploration cérébrale, Paris, Hermann, p. 17-28., pp.17-28, 2015. hal-03107651

HAL Id: hal-03107651

<https://hal.science/hal-03107651v1>

Submitted on 12 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'exploration de la matière cérébrale du 19^e au 21^e siècle

Jean-Gaël Barbara

version auteur : J.G. Barbara, 2014. « L'exploration de la matière cérébrale
du XIX^e au XXI^e siècle », in C. Chérici, J.-C. Dupont, édés.,
L'exploration cérébrale, Paris, Hermann,
2015, p. 17-28, ISBN 2705690638.

INTRODUCTION

Une histoire des « explorations cérébrales » est utile du seul point de vue de l'histoire des neurosciences, mais également si l'on tente de l'intégrer dans les grandes histoires des explorations humaines, comme celles des explorations géographiques¹.

L'historiographie récente de ces explorations en brosse une représentation complexe où se mêlent l'instinct humain d'exploration, l'exploit scientifique et technique, le prestige, un symbole triomphaliste d'énergie, d'entreprise et de créativité, ainsi que l'omniprésence de l'écrit et de l'édition².

À bien des égards, on peut établir des parallèles intéressants entre cette représentation et l'histoire de l'exploration cérébrale, du néolithique à nos jours, histoire où se côtoient l'instinct ancien de découvrir l'origine des maladies dans la boîte crânienne, l'exploit scientifique des résections osseuses et des régions lésées du cerveau dans les blessures de la tête, l'exploit technique des explorations physiologiques par la stimulation et l'enregistrement électriques, le prestige de la neurologie et de la neurochirurgie, le symbole triomphaliste de certains succès médicaux dans certains cas

1. La complexité du cerveau humain est comparable à celle de notre planète envisagée à notre échelle. Étudier des contrées lointaines, du point de vue physique ou humain, à l'échelle du kilomètre ou du mètre, correspond en complexité à décrire les structures cérébrales et leurs fonctions, respectivement à l'échelle de la cellule ou de ses macromolécules intracellulaires, comme les filaments d'actine. Mais en ce qui concerne le cerveau, l'exploration est à la fois superficielle et profonde jusqu'en chaque point, alors que les données terrestres internes demeurent limitées.

2. Kennedy, 2015.

de guérison spectaculaire de blessures de la tête, l'entreprise et la créativité dans l'invention de nouveaux procédés comme l'angiographie par rayons X et l'omniprésence de l'écrit et de l'édition dans la fabrication d'atlas d'anatomie du cerveau humain utilisant des systèmes de coordonnées polaires.

L'origine des concepts d'exploration géographique et d'exploration médicale est si lointaine que débrouiller leurs rapports est une affaire délicate qu'on ne tentera pas, ne serait-ce que pour la Grèce antique. On se limitera donc ici à quelques jalons d'une histoire de l'exploration cérébrale aux époques récentes en suivant certains parallèles avec l'exploration géographique.

Dès le néolithique, la trépanation représente une pratique, sûrement à finalités multiples, qui a pu, entre autres, permettre d'observer les petits mouvements d'élévation rythmique du cerveau dans la boîte crânienne, dont la recherche des causes suscita au XVIII^e siècle une controverse à l'Académie de médecine³.

Au sein du corpus hippocratique, le texte sur la « maladie sacrée » utilise une exploration cérébrale chez l'animal dans le but de chercher une abondance d'humeur dans le cerveau d'une chèvre épileptique sacrifiée au moment d'une crise, pour en donner une explication causale basée sur la théorie des humeurs.

Au début du XX^e siècle, l'« exploration cérébrale » devient un thème important de la pathologie et de la physiologie expérimentale et l'expression devient courante⁴. Il est alors possible de concevoir l'évolution de l'« exploration cérébrale » aux XVIII^e et XIX^e siècles selon deux axes, l'un étant celui de l'« exploration médicale » sur les blessés et lors de vivisections animales, et l'autre l'« exploration anatomique » qui s'inspire des méthodes de la description géométrique (Félix Vicq d'Azyr) et géographique (Vincenzo Malacarne), en employant les terminologies et en constituant une anatomie descriptive minutieuse. Ces deux voies sont alors disjointes, tel que cela apparaît déjà dans l'œuvre de Léonard de Vinci, si l'on compare ses croquis de dissection humaine et son schéma scolastique, d'esprit physiologique, des ventricules du cerveau, sièges des facultés. Pourtant, dès le XVIII^e siècle, des expériences d'ablation, comme celles réalisées

3. On discuta de l'implication possible du rythme cardiaque, de celui de la respiration ou d'un mouvement propre du cerveau.

4. « [...] exploration du cerveau [...] d'un soldat, mort [...] », *Journal de physiologie : expérimentale et pathologique*, 1826, tome 6, p. 165.

par François Pourfour du Petit, concernant le cervelet, sont tentées sur l'animal, afin d'établir parallèlement des corrélations entre l'exploration anatomique des lésions de soldats blessés et leur exploration clinique (perte de sensations, paralysies), à la manière des travaux de Galien sur la moelle épinière au II^e siècle apr. J.-C.

Ces modes anatomiques de description relativement grossiers, simplement par inspection visuelle, seront pratiqués encore jusqu'au milieu du XIX^e siècle en pathologie du système nerveux, par exemple par Jean-Martin Charcot, à la Salpêtrière⁵. Mais ils sont progressivement remplacés par des études de microscopie depuis les premières recherches des années 1830 d'Evangelista Purkinje, jusqu'aux procédés d'imagerie cellulaire actuels.

C'est cette dernière période qui nous intéresse ici et à travers laquelle on voudrait montrer comment l'« exploration neuronale » du cerveau a été un jalon fondamental pour comprendre les mécanismes cellulaires et moléculaires de la cognition, alors que bien d'autres types actuels et futurs d'exploration du cerveau sont nécessaires pour mieux comprendre l'émergence d'une activité consciente dans un cerveau étudié à l'échelle de certaines populations de neurones, de manière non invasive, durant le comportement d'un sujet humain.

I. L'INSTINCT D'EXPLORATION

L'instinct d'exploration, qui représente un thème de psychologie expérimentale depuis le début du XX^e siècle⁶, a été avancé pour comprendre les motivations de l'exploration scientifique. Cet instinct est en effet indéniablement mis en œuvre chez tous les grands explorateurs scientifiques, et antérieurement par exemple chez les Vikings atteignant l'Amérique, ou les baleiniers basques dans leurs pêches lointaines.

Cet instinct d'exploration, lorsqu'il n'est pas motivé par un instinct de survie, a été interprété comme une curiosité innée, un besoin d'activité et plus récemment comme un besoin actif et permanent de nouveauté de l'esprit humain (et animal) en éveil⁷.

De ce point de vue, les médecins, depuis l'Antiquité, n'ont pu que considérer le cerveau, enfermé dans sa boîte crânienne, alors à l'écart

5. Dupont, 2008.

6. Orsini, 1957.

7. *Ibid.*

de toute investigation directe sur le sujet vivant, comme un point central pour comprendre certains troubles psychiques, tel que cela apparaît dans le texte cité du corpus hippocratique.

Au cours de la première moitié du xx^e siècle, les neuroanatomistes ont été souvent tentés, de la même manière, de chercher dans le tissu cérébral, par inspection des neurones, des indices histologiques de toutes sortes de pathologies ou d'états, par exemple chez des criminels, des malades mentaux ou encore des homosexuels⁸.

Citons l'exemple du neuroanatomiste berlinois juif, Oskar Vogt, qui, un temps, se persuada, après la seconde guerre mondiale, qu'une organisation neuronale particulière pouvait être mise en évidence sur les cerveaux de criminels nazis, dans l'esprit du criminologue italien Cesare Lombroso⁹.

Les techniques d'imagerie cérébrale suscitent, aujourd'hui, le même intérêt, souvent irrationnel et démesuré en comparaison de ce qu'on peut caractériser, dans l'ordre humain, avec un tel outil; et les vieux démons consistant à rechercher des stigmates de catégories sociales dans des indices objectifs scientifiques réapparaissent de la manière parfois la plus navrante et naïve¹⁰.

II. EXPLOITS TECHNIQUES DES EXPLORATIONS ANATOMIQUES

L'histoire de l'exploration élémentaire du cerveau par le microscope, à l'échelle de ses constituants, est des mieux connues, puisqu'il s'agit de l'histoire classique de la doctrine du neurone¹¹.

Ce type d'exploration a d'abord consisté en des observations empiriques de gros globules observables avec des instruments optiques peu performants et déformants, qu'on reconnut a posteriori comme des corps cellulaires de grands neurones, et qu'on dénomma alors « cellule », d'où la terminologie archaïque du neurone principal du cortex cérébelleux encore dénommé « cellule de Purkinje » (1837).

8. Ce type de questionnement est persistant dans les sciences. Voir par exemple, Harrison *et al.*, 1994.

9. Barbara, 2011.

10. *Ibid.*

11. Soury, 1899; Shepherd, 1991.

Mais cette première étape tenait presque du miracle avec les instruments d'alors, comme le reconnaissait François Magendie en défendant la position, en 1800 de Xavier Bichat, de ne pas employer pour ces raisons le microscope dans ses recherches anatomiques.

Dès cette époque, au cours des décennies 1820 et 1830, l'exploration élémentaire du cerveau se scindait en deux voies, avec l'étude des « cellules » et celles des « fibres nerveuses », tant il fut difficile de concevoir une unité anatomique qui associait un élément ponctuel aussi minuscule (20 µm) à un élément très fin, mais de 10 à 100 000 fois plus long.

On découvrit aux XIX^e et XX^e siècles des cellules géantes dans les ganglions nerveux de l'aplysie (Henri Dutrochet) et des fibres nerveuses géantes chez le lombric (Franz von Leydig), le crabe (Alan Hodgkin) ou encore le calamar (John Zachary Young). Et la découverte un peu par hasard de ces structures, par l'exploration des systèmes nerveux des animaux, permit de grandes avancées par leur étude physiologique.

Mais l'exploration cellulaire du cerveau ne put véritablement devenir systématique que lorsqu'on comprit qu'il existait une organisation neuronale des circuits en « chaînes de neurones » polarisées au sein des structures nerveuses, à partir des travaux de Santiago Ramón y Cajal et de la doctrine du neurone¹².

L'œuvre de Ramón y Cajal est souvent présentée comme emblématique des qualités nécessaires à l'exploration cérébrale, de par l'exploit de la maîtrise d'une technique de coloration nouvelle difficilement reproductible – dont la découverte improbable fut avant tout le fruit du hasard (réaction de Camillo Golgi) – et de par l'esprit d'entreprise et de persévérance qui furent nécessaires à Cajal pour étudier les vastes territoires du système nerveux à l'échelle des neurones.

À partir du début du XX^e siècle, l'exploration neuronale du cerveau envisagea la connectivité des territoires corticaux et sous-corticaux par l'organisation de voies neuronales spécifiques (Jules Dejerine), ou encore la topographie des associations de couches verticales de neurones dans les différents cortex du cerveau humain (Korbinian Brodmann). Plus récemment, l'imagerie de diffusion s'est progressivement imposée comme nouvelle technique d'exploration des voies de communication dans le cerveau humain, démontrant, ainsi une fois de plus, la persévérance requise pour les grandes aventures technoscientifiques de découvertes des secrets

12. Voir par exemple Barbara, 2010.

anatomiques du cerveau humain¹³. Aujourd'hui, le rêve d'une science systématique et exhaustive de ce domaine scientifique prend les recherches sur le génome en exemple pour imaginer une description complète des connexions neuronales du cerveau humain, qu'on concrétise par le concept de « connectome ».

III. EXPLOITS TECHNIQUES DES EXPLORATIONS DYNAMIQUES

En marge de cette exploration anatomique et anatomo-clinique statique, qui serait infructueuse si sa finalité n'était que descriptive, on distingue l'« exploration fonctionnelle » mise en œuvre par une épreuve au cours de laquelle un sujet est soumis à un test mettant en jeu une action directe sur son corps, son cerveau ou plus généralement son système nerveux¹⁴.

Cette tradition de physiologie animale est issue des recherches systématiques du médecin suisse Albrecht von Haller qui étudia les propriétés des tissus – comme l'avait fait le médecin français Xavier Bichat en anatomie et en décrivant des propriétés physiologiques – par des excitations à l'acide, la pince ou l'électricité¹⁵.

Une expérience de ce type concernant une exploration fonctionnelle systématique fut celle de la stimulation des nerfs de la moelle épinière, qui sortent de part et d'autre de la colonne vertébrale, et qu'on dissocie en « racines ventrales » et « racines dorsales ». Le physiologiste français François Magendie stimula ces racines chez des chiens vivants lors d'expériences de vivisection et découvrit que les racines ventrales sont motrices, qu'elles contrôlent les mouvements, alors que les racines dorsales sont sensibles. Magendie créa ainsi un type d'exploration fonctionnelle des nerfs.

L'exploration électrique du cerveau fut réalisée dans les années 1870 par l'anatomiste berlinois Gustav Fritsch et son collègue neuropsychiatre Edward Hitzig. Fritsch et Hitzig purent stimuler la surface corticale d'un chien à plusieurs endroits et explorer le lien fonctionnel entre une zone

13. Voir pour un aperçu rapide : « Les vertiges de l'imagerie du cerveau », *Le Monde Science et Techno*, 22 novembre 2011.

14. En réalité, dans ce type de recherches, la dichotomie corps-cerveau perd son sens.

15. Barbara, 2008. Haller distinguait les tissus irritables – ceux qui se contractent à la stimulation (démontrant ainsi la présence de fibres motrices) –, et les tissus sensibles – ceux dont la stimulation provoque une sensation (démontrant ainsi la présence de fibres sensibles).

cérébrale et une fonction : motricité ou sensation. Certaines stimulations entraînaient un mouvement : la stimulation du cortex moteur. D'autres provoquaient ou empêchaient une sensation : celle du cortex sensoriel. Ces explorations fonctionnelles furent affinées chez l'animal par le Britannique David Ferrier (*The functions of the brain*, 1876) et furent l'objet d'une très vive polémique en raison des difficultés pour obtenir ce type de résultats par la vivisection chez un animal subissant un choc opératoire¹⁶.

Au xx^e siècle, en implantant dans le cerveau d'animaux dits « chroniques » des électrodes à demeure, ces recherches permirent, par exemple, la découverte du « centre du plaisir » par James Olds en 1956, avec l'observation qu'un rat, pouvant déclencher par un levier la stimulation de ce centre, apprend à le faire de manière répétée, car cette stimulation conditionne son comportement et représente pour le rat une récompense ou encore une source de plaisir ou de bien-être.

Ces techniques furent transférées chez l'homme et utilisées dans plusieurs cas : la recherche de foyers épileptiques (stimulation de la zone supposée du foyer) et tests de fonctionnalités des zones corticales qu'on envisage d'extraire pendant des chirurgies du cerveau (ablations de tumeurs) pour éviter l'endommagement de certains centres importants (centre du langage par exemple).

Ces explorations fonctionnelles peuvent être également réalisées d'une autre manière. Au lieu de provoquer une stimulation en injectant un courant dans l'électrode implantée dans le cerveau, on mesure l'activité électrique du cerveau. Ces techniques furent également mises au point chez l'animal et l'on enregistra des électrocorticogrammes par exemple sur le chien. On put aussi réaliser des enregistrements électriques à la surface du scalp ; c'est le Britannique Richard Caton qui réalisa le premier ce type d'expériences à partir de 1875.

Cependant, ces mesures ne passionnèrent les scientifiques qu'à partir du milieu des années 1930, lorsque la communauté internationale accepta la valeur de ce type de mesures réalisées chez l'homme par le neurologue allemand Hans Berger à la fin des années 1920.

16. François Magendie avait attiré l'attention sur la difficulté de la reproductibilité des résultats obtenus par la vivisection et du grand art que cela exige pour y arriver. Magendie entendait ainsi défendre la physiologie expérimentale en réfutant l'argument de ses détracteurs qui refusaient à cette discipline le caractère scientifique de la reproductibilité de ses résultats.

Avec les progrès de la neurophysiologie, l'exploration du cerveau par des électrodes de stimulation et des électrodes d'enregistrement put alors être associée non pas seulement à l'échelle des régions cérébrales larges, mais à celle de ses éléments anatomiques identifiés par l'exploration anatomique. Par exemple, on réalisa des explorations physiologiques sur des nerfs coupés et isolés, maintenus en vie. Ces expériences se sont affinées en utilisant des axones géants (de crabe ou de calamar) et elles ont permis d'élucider au cours des années 1950 les mécanismes ioniques du potentiel d'action des neurones : dépolarisation par entrée sélective d'ions sodium, puis repolarisation et hyperpolarisation par sortie d'ions potassium¹⁷.

À la fin des années 1920, le physiologiste britannique Edgar Adrian put enregistrer les potentiels d'action de fibres nerveuses uniques en utilisant un petit muscle particulier de grenouille faiblement innervé, ou encore le nerf optique du congre. On put ensuite faire ce type d'expérience sur de petits centres nerveux, les ganglions d'invertébrés et de vertébrés. Par exemple, la physiologiste française Angélique Arvanitaki réalisa au cours des années 1940 les premiers enregistrements de neurones par des électrodes extra-cellulaires sur des neurones géants d'aplysie. Puis dans les années 1950, elle réalisa des enregistrements intracellulaires et des mesures directes du potentiel d'action à l'instar de John Carew Eccles, prix Nobel de physiologie ou médecine de 1963, qui réalisa en premier ces enregistrements sur des motoneurones de chat (1951).

Cette exploration de l'activité de neurones individuels s'est beaucoup développée en physiologie animale, surtout sur des modèles d'animaux invertébrés. Progressivement, on a pu enregistrer l'activité de plusieurs neurones individuels et comprendre le fonctionnement de certains réseaux de neurones contrôlant des comportements simples comme la nage de la sangsue, le contrôle de la motricité de l'estomac du homard ou le réflexe de rétraction de la branchie de l'aplysie¹⁸.

Cette neurobiologie a fait un grand usage de modèles animaux variés. Comme pour l'anatomie microscopique, il fallait adopter le meilleur modèle animal possible en fonction de la question posée. Dans son autobiographie, écrite à l'occasion de son prix Nobel de 2000, Éric Kandel cite ces études

17. C'est le prix Nobel de physiologie ou de médecine d'Alan Hodgkin et de Andrew Huxley de 1963.

18. C'est ce type de recherche qui a été récompensé par le prix Nobel de 2000 attribué à Éric Kandel.

comme une nouvelle façon de faire de la neurophysiologie, en choisissant un modèle simple et adapté à une question : « J'ai appris des articles de Kuffler un nouveau critère de qualité de la science – l'importance d'avoir une préparation adaptée pour tester les questions posées. Kuffler m'a appris la puissance de la neurobiologie des invertébrés. »

Ce type d'exploration est approché chez l'homme par l'exploration en imagerie fonctionnelle à résonance magnétique qui permet de se faire une idée de l'activité supposée de réseaux de neurones identifiés par leur localisation à l'endroit où ils ont été décrits anatomiquement lors d'autopsies.

Toutes ces explorations de cerveaux animaux ou humains représentent de véritables prouesses dès lors qu'il est possible de comprendre l'émergence de processus cognitifs par la mise en jeu de certains circuits de neurones particuliers, connectés à des organes des sens jusqu'à des centres corticaux d'aires sensorielles primaires et des régions cérébrales impliquées dans des processus cognitifs plus complexes. Le meilleur exemple récent de telles découvertes est sans conteste la découverte des neurones miroirs chez l'homme¹⁹.

IV. ESPRIT D'ENTREPRISE ET PRESTIGE DE L'EXPLORATION CLINIQUE DU CERVEAU

L'exploration clinique de l'activité du cerveau humain par des techniques non invasives a pu débiter par l'électroencéphalographie. Même si les données acquises par cette technique furent finalement assez décevantes, elle put être utilisée pour obtenir certaines informations relatives à la présence et à la localisation de certaines tumeurs localisées, ou à certaines pathologies comme les épilepsies.

C'est après la seconde guerre mondiale que la neurochirurgie acquit un prestige progressivement supérieur à celui de la chirurgie générale pour deux raisons principales contradictoires, la première étant que la neurochirurgie s'éloigna progressivement du rêve de la psychochirurgie de traiter de nombreux troubles mentaux par des ablations cérébrales, et la seconde étant la complexification de la neurochirurgie qui affina ses méthodes pour ne plus pratiquer seulement des ablations de lésions circonscrites. Les progrès d'avant-guerre, l'électroencéphalographie et l'angiographie par rayons X, furent mieux mis à profit, mais le développement mondial

19. Mukamel *et al.*, 2010.

de la neurochirurgie bénéficia de bien d'autres progrès techniques, comme les destructions profondes, les bistouris laser et surtout la technique de stéréotaxie qui constitue un système de repérage du cerveau par des coordonnées polaires. La « révolution stéréotaxique » de la neurochirurgie fut permise parce qu'il devenait possible de se positionner minutieusement dans le cerveau d'un patient en connaissant à l'avance quelles structures étaient traversées et lésées²⁰.

La chirurgie des épilepsies utilisa également les progrès des années 1950 en matière de microélectrodes implantées dans le cerveau pour localiser les foyers épileptiques chez des patients éveillés. Cette technique était couramment utilisée en France au cours des années 1950 à l'aide de la technique stéréotaxique par le professeur Jean Talairach à l'hôpital Sainte-Anne, en collaboration avec le neurophysiologiste Pierre Buser²¹. Ces recherches qui témoignent d'un esprit d'entreprise exceptionnel, réalisées en concertation avec les malades dont la pathologie était insensible aux traitements pharmacologiques, furent une odyssée scientifique exceptionnelle qui marqua profondément Pierre Buser ainsi qu'il m'en fit part régulièrement.

V. ÉDITIONS ET ATLAS DU CERVEAU

Les travaux de Jean Talairach aboutirent au cours des années 1950 à l'élaboration progressive d'un nouveau type d'atlas du cerveau : un atlas basé sur des coordonnées stéréotaxiques à destination des neurochirurgiens²². Cet ouvrage de référence pendant de nombreuses années eut un succès mondial très important qui apparaît dans ses très nombreuses citations.

L'édition de planches de dissection de cerveaux humains et d'atlas tient une immense importance dans l'histoire des explorations du cerveau parce que la révélation de la complexité des structures d'une matière qui apparaît à première vue homogène, incolore, molle et sans forme a toujours tenu de l'exploit personnel²³.

20. Escoffier-Lambiotte, 1966.

21. Nous regrettons la récente disparition de notre ami et collègue prestigieux Pierre Buser survenue le 29 décembre 2013.

22. Talairach *et al.*, 1957 ; Talairach et Szikla, 1967.

23. Voir Barbara, 2008.

Les planches de Joseph-Guichard Duverney ou celles de Félix Vicq d'Azyr firent une telle impression qu'elles demeurent encore célèbres chez les scientifiques actuels. L'ouvrage de Jules Luys, *Iconographie photographique des centres nerveux* (1873), utilisa la photographie associée à des lithographies précises. Puis les grands neuroanatomistes neuronistes, Brissaud (*Anatomie du cerveau de l'homme*, 1893), Flatau (*Atlas du cerveau humain*, 1894), Dejerine (*Anatomie des centres nerveux*, 1895) ou Brodmann (*Beiträge zur histologischen Lokalisation der Grosshirnrinde*, 1907) publièrent de célèbres ouvrages d'exploration systématique des neurones du cerveau humain.

ÉPILOGUE

L'exploration du cerveau humain aux époques récentes à l'échelle du neurone revêt donc les caractères particuliers des aventures scientifiques et humaines des grandes activités exploratoires de l'humanité. Nul doute en effet que le cerveau humain représente par sa complexité autant de défis que l'exploration de notre planète entière et sûrement davantage en terme d'apparition de processus émergents comme la conscience.

L'histoire des explorations cérébrales ainsi envisagée n'appartient ainsi plus seulement à l'histoire spécialisée des neurosciences, mais elle rejoint l'histoire générale tant l'esprit d'entreprise, d'innovation, d'imagination et de créativité sont à l'œuvre aussi bien dans l'histoire politique, dans les développements économiques, que dans ces odysées scientifiques parmi les plus remarquables.

Bibliographie

- BARBARA J.-G., *La naissance du neurone*, Paris, Vrin, 2010.
- « Diversité et évolution des pratiques chirurgicales, anatomiques et physiologiques du cerveau au XVIII^e siècle », in C. Cherici et J.-C. Dupont (éd.), *Les querelles du cerveau à l'âge classique (XVI^e-XVIII^e siècles)*, Paris, Vuibert, 2008.
- « Ouvrir le corps des fous et des criminels : science et enjeux philosophiques d'hier et d'aujourd'hui », in L. Bossi (éd.), *Crime et folie*, Paris, Gallimard, coll. « Les entretiens de la fondation des Treilles », 2011.
- DUPONT J.-C., « Charcot à la conquête du cerveau », *Pour la Science*, 37, 2008, p. 18-96.
- ESCOFFIER-LAMBIOTTE C., « Un exposé du professeur Lhermitte sur la chirurgie du cerveau et la nouvelle éthique de la psychiatrie », *Le Monde*, 30 mai 1996.

- HARRISON P. J., EVERALL I. P. et CATALAN J., « Is homosexual behaviour hard-wired? Sexual orientation and brain structure », *Psychological Medicine*, 24, 1994, p. 11-16.
- KENNEDY D., *Reinterpreting exploration: The West in the World*, Oxford, Oxford University Press, 2014.
- MUKAMEL R., EKSTROM A. D., KAPLAN J., IACOBONI M. et FRIED I., « Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions », *Current Biology*, 20, 2010, p. 750-756.
- ORSINI F., « Conduite et besoin d'exploration chez les mammifères », *L'Année psychologique*, 57, 1957, p. 99-119.
- SHEPHERD G. M., *Foundations of the neuron doctrine*, New York/Oxford, Oxford University Press, 1991.
- SOURY J., *Le système nerveux central, structure et fonctions, histoire critique des théories et des doctrines*, Paris, G. Carré et C. Naud, 1899.
- TALAIRACH J., DAVID M., TOURNOUX P., CORREDOR H. et KVASINA T., *Atlas d'anatomie stéréotaxique : repérage radiologique indirect des noyaux gris centraux des régions mésencéphalo-sous-optique et hypothalamique de l'homme*, Paris, Masson, 1957.
- et SZIKLA G., *Atlas d'anatomie stéréotaxique du télencéphale*, Paris, Masson, 1967.