HAL open science

Le cerveau, une histoire d'explorations techniques et de représentations, XIXe -XXe siècle

Jean-Claude Dupont

To cite this version:

Jean-Claude Dupont. Le cerveau, une histoire d'explorations techniques et de représentations, XIXe -XXe siècle. Les Cahiers du Comité pour l'histoire de l'Inserm , 2021, 1/2 (2), pp.21-28. hal-04071247

HAL Id: hal-04071247

https://u-picardie.hal.science/hal-04071247v1

Submitted on 17 Apr 2023

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

TECHNIQUES, REPRÉSENTATION, MODÉLISATION DU CERVEAU

Le cerveau, une histoire d'explorations techniques et de représentations, XIXe-XXe siècle

Jean-Claude DUPONT
Professeur d'histoire et de philosophie des sciences, Université de Picardie Jules Verne

Résumé

Dans l'espace scientifique, les représentations, les méthodes et les objets de savoirs évoluent ensemble. Depuis deux siècles, les techniques d'exploration du cerveau ont ainsi généré des représentations cérébrales, de même que les représentations ont guidé les explorations. L'article reprend brièvement quelques exemples historiques de ces interactions du XIXe au XXe siècle.
Mots-clés : cerveau, histoire, exploration, représentation, modèle

Abstract

The brain, a history of technical explorations and representations, 19th-20th centuries

In scientific space, representations, methods and objects of knowledge evolve together. Over the past two centuries, brain exploration techniques have thus generated brain representations, just as the representations have guided explorations. The article briefly reviews some historical examples of these interactions from the 19th to the 20th century.
Keywords: *brain, history, exploration, representation, model*

Les planches anatomiques du médecin français Félix Vicq d'Azyr (1748-1794), aussi exactes qu'il est possible avant la photographie, constituent l'aboutissement d'une longue tradition d'anatomie cérébrale. L'anatomie est alors une science qui possède des ambitions physiologiques[1] et s'intéresse ainsi aux fonctions cérébrales. C'est aussi dans cette perspective que s'inscrit le projet du fameux anatomiste d'une anatomie cérébrale comparée, qui resta inachevée, consistant à aligner les cerveaux d'homme et de tous les animaux dans une série de tables anatomiques en couleur accompagnées de légendes adéquates. Les cerveaux devaient se simplifier au fur et à mesure que l'on descendait l'échelle zoologique. En théorie, des hypothèses sur la fonction des différentes parties cérébrales pourraient être avancées. Mais, Félix Vicq d'Azyr, comme de nombreux médecins de son temps, excluait de ne pouvoir jamais atteindre les mécanismes proprement dits des fonctions intellectuelles. Même lorsque la représentation cérébrale prônée était celle de la localisation – certains préférant l'idée d'un fonctionnement unitaire –, pour beaucoup d'entre eux, localiser les facultés de l'homme dans les différentes parties de l'organe cérébral relevait de la pure spéculation. L'anatomie comparée possédait ses limites. Aussi lorsqu'en 1786 Félix Vicq d'Azyr procédait dans son *Traité d'anatomie* à un inventaire critique des méthodes possibles d'études du cerveau, il mentionnait, outre la dissection anatomique, l'expérimentation, l'observation clinique des fonctions organiques et la comparaison entre organes sains et malades[2].

Même si elles se sont considérablement affinées depuis, les approches ainsi pressenties correspondent, très schématiquement, aux méthodes d'exploration des fonctions cérébrales développées pendant les deux siècles suivants, générant différentes représentations du cerveau humain. L'exploration du cerveau humain sera notamment rendue possible par la dernière méthode, la comparaison des organes sains et malades, qui deviendra la grande affaire du XIXe siècle. À l'orée du siècle, la médecine est dominée par l'École de Paris, qui prône, dans la lignée du médecin italien Giovanni Battista Morgagni (1682-1771) une démarche scientifique rigoureuse destinée à découvrir les causes des maladies, fondée sur la méthode anatomoclinique qui repose sur l'observation clinique de chaque cas, la vérification de l'hypothèse post mortem, la corrélation statistique des cas recensés[3]. C'est cette approche anatomopathologique, appliquée au cerveau à plus petite échelle, qui va mener à la découverte de l'aire cérébrale du langage, l'aire de Broca[4].

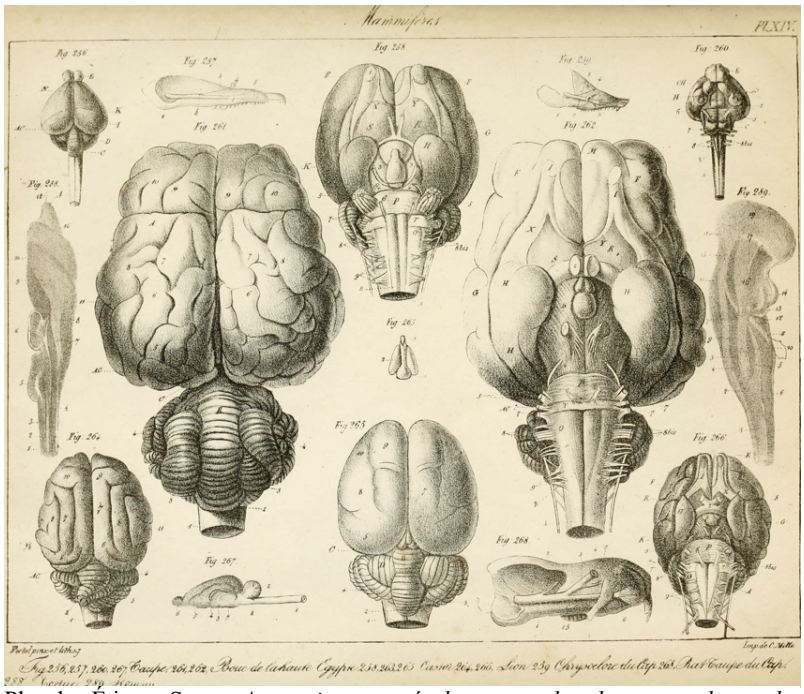
---

1 Cherici C, Dupont J-C éd. *L'anatomie sans les arts ? Le corps en images à l'époque moderne (XVIIe - XVIIIe siècles)*. Paris : Hermann, 2019.

2 Vicq d'Azyr F. *Traité d'anatomie et de physiologie avec des planches colorées représentant au naturel les divers organes de l'Homme et des Animaux*. Paris : F Didot L'Aîné, 1786.

3 Morgagni GB. *De sedibus et causis morborum per anatomen indagatis libri quinque*. Venetiis : Remondiniana, 1761.

4 Broca P. Sur le siège de la faculté du langage articulé. *Bulletins de la Société d'Anthropologie de Paris*, 1865, 6 : 377-93.



Planche, Étienne Serres, *Anatomie comparée du cerveau dans les quatre classes des animaux vertébrés*, Paris : Gabon et Compagnie, 1824 : 82.

© Internet Archives Book Images

Le cerveau à l'ère de la physiologie expérimentale

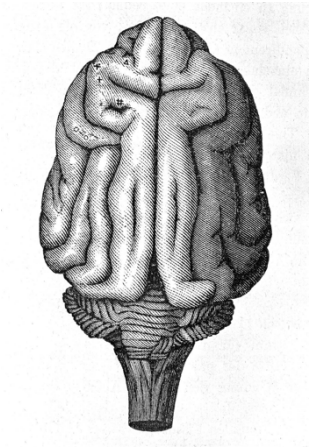
Ablations et stimulations cérébrales chez l'animal

L'anatomopathologie paraissait prometteuse. Mais à la suite de Paul Broca (1824-1880), les lieux anatomiques de l'aphasie se multiplient aussi vite que les traits cliniques. Selon lui, il n'y avait qu'un seul site de lésion, déterminant la perte de la parole. Mais, il y a ceux qui mentionnent l'existence de lésions situées dans différents territoires corticaux, comme l'Anglais Henry Charlton Bastian (1837-1915) et l'Allemand Carl Wernicke (1848-1905)[5]. Les schémas compliqués de l'organisation du fonctionnement mental élaborés par ces neurologues, cherchant à mettre en relation les niveaux de perturbation de cette organisation et les différentes formes cliniques, appartiennent à l'histoire naissante des aphasies et, au-delà, représentent les premiers pas de l'étude fonctionnelle de la spécificité cérébrale humaine. Cependant, l'anatomopathologie, comme l'anatomie cérébrale, ne reposait encore que sur des observations sur le cadavre humain, et possédait par-là ses limites. Paul Broca, peut-être découragé, délaissa la question des centres du langage pour se consacrer à l'anthropologie. Pour localiser les fonctions cérébrales, il fallait avoir recours à d'autres méthodes, expérimentales celles-là.

Au XIXe siècle, le recours aux études sur l'animal était encouragé par les perspectives transformistes et l'idée générale d'une progression graduelle de l'animal à l'homme. Malgré cela, l'utilisation de modèles animaux, si elle pouvait paraître peu problématique en ce qui concerne l'étude des phénomènes élémentaires, essentiellement à l'époque la nature et la propagation du « fluide nerveux » et celle des réflexes, s'avérait de plus en plus délicate à mesure que l'on approchait les fonctions supérieures.

[5] Wernicke C. *Der aphasische Symptomenkomplex*. Breslau : M. Cohn & Weigert, 1874 ; Bastian HC. On different kinds of aphasia, with special reference to their classification and ultimate pathology. *British Medical Journal*, 1887, 2 : 985-90.

La topographie des circonvolutions humaines[6], achevée dans les années 1860, rendait alors envisageable l'expérimentation physiologique, mais il fallait retourner au modèle animal et à des fonctions plus élémentaires. C'est ainsi que dans un premier temps, le passage à l'expérimentation animale étendra la théorie des localisations corticales, du langage humain au contrôle de la motricité animale. Chez le chien, les travaux de stimulation et d'ablation corticale de l'anatomiste Gustav Fritsch (1838-1927) et médecin psychiatre Eduard Hitzig (1838-1907) vont permettre de mettre en évidence l'organisation somatotopique du cortex moteur[7]. Selon ces auteurs, le cortex moteur recevait aussi des informations en provenance des muscles, ce qui en faisait une région à la fois motrice et sensorielle.



E. Hitzig and G. Fritsch, *Brain of a monkey,* 19th c. Les points stimulés sont marqués.
© Wellcome Collection.

Le neurologue écossais David Ferrier (1843-1928) ira plus loin en identifiant d'autres aires motrices et confirmant la théorie de John Hughlings Jackson (1835-1911) sur l'épilepsie motrice : les mouvements de la main, de la jambe et de la face observés durant les crises épileptiques pouvaient résulter de l'activation de zones corticales adjacentes[8]. Mais David Ferrier parvint aussi avec plus ou moins de succès à identifier chez le singe des régions sensorielles dans le cortex pariétal et temporal (auditives, gustatives, de la sensibilité cutanée). Quant à la zone frontale, elle était considérée comme intervenant dans les fonctions supérieures : Gustav Fritsch et Eduard Hitzig en avaient fait la zone de la pensée abstraite, David Ferrier la considérait comme la zone de l'attention. Les observations de l'Italien Léonardo Bianchi (1848-1927) chez le singe cérébrolésé, les observations cliniques du fameux cas Phineas Gage par le médecin américain John Martyn Harlow (1819-1907) confortaient l'idée que les lésions du lobe frontal révélaient des troubles de la socialisation, de l'émotion et de la personnalité[9].

Ces ébauches de cartographies vont donner à la neurologie, malgré certaines protestations des partisans de l'unité cérébrale comme le neurologue français Pierre Marie (1853-1940)[10], une orientation franchement localisationniste et associationniste. La notion de centre nerveux connaît une impulsion nouvelle, conduisant à concevoir les activités mentales complexes comme résultant d'une association de différents centres interconnectés, concourant à leur réalisation. Elles rendaient envisageable l'intervention humaine, et la neurochirurgie des tumeurs cérébrales connut alors quelques succès notamment en Grande-Bretagne[11].

---

6 Les lobes cérébraux se révèlent posséder des circonvolutions délimitées par les sillons qui dessinent à la surface du cortex des figures constantes. Cf. Gratiolet LP, Leuret F. *Anatomie comparée du système nerveux considéré dans ses rapports avec l'intelligence*, Paris : JB Baillière, 1839-1857.

7 Fritsch G, Hitzig E. Über die elektrische Erregbarkeit des Grosshirns. *Archiv für Anatomie und Physiologie*, 1870, 37: 300-32. La somatototopie est la position relative dans le système nerveux des structures correspondant à différentes parties du corps. Elle fut admise chez l'homme suite aux apports de Jackson et de Charcot sur l'épilepsie.

8 Ferrier D. Experiments on the brain of monkeys. N° I. *Proceedings of The Royal Society of London*, 1875, 23: 156-63. Voir aussi *Selected writings of John Hughlings Jackson*. London: Hodder and Stoughton, 1931.

9 Bianchi L. The functions of the frontal lobes. *Brain*, 1895, 18: 497-522; Harlow JM. Recovery from the passage of an iron bar through the head. *Publications of the Massachusetts Medical Society*, 1868, 2(3) : 327-47. Phineas Gage avait subi un traumatisme majeur au lobe frontal gauche, une barre de fer lui ayant accidentellement perforé le crâne en le traversant complètement.

10 Marie P. Révision de la question de l'aphasie : la troisième circonvolution frontale gauche ne joue aucun rôle spécial dans la fonction du langage. *Semaine Médicale*, 1906, 26: 241-47.

11 Voir Ormond DR and Hadjipanayis CG. The history of neurosurgery and its relation to the development and refinement of the frontotemporal craniotomy. *Journal of Neurosurgery*, 2014, 36(4): E12.

Cependant les expériences d'ablations et stimulations ne pouvaient être réalisées « au mieux » que chez les singes anthropoïdes. La transposition à l'humain semblait alors autorisée par l'évolution qui semblait presque identique du cerveau humain et des primates supérieurs. Telles furent celles élaborées par Albert Grünbaum (1869-1921) et Charles Scott Sherrington (1857-1952) chez le gorille par exemple[12]. Certains neurochirurgiens comme l'Américain Harvey Cushing (1869-1939) tenteront bien d'élaborer des cartes motrices chez l'homme, mais ces cartes étaient plus riches que ne l'autorisaient les découvertes expérimentales[13]. Pour d'autres, l'histologie devait aider la physiologie et la clinique dans la recherche sur les fonctions corticales. La myéloarchitectonie et la cytoarchitectonie[14], complétant les études anatomiques comparatives chez l'homme et le singe et les études de stimulation chez ce dernier conduiront à une parcellisation du cortex humain exprimée dans les fameuses cartes de neurologues comme Korbinian Brodmann (1868-1918), et plus encore dans l'entre-deux-guerres dans les synthèses d'Oskar (1870-1959) et Cécile Vogt (1875-1962), et de Constantin von Economo (1876-1931)[15].

L'expérimentation et la modélisation du cerveau humain

Mais pour s'affranchir définitivement des données simiesques, il fallait pouvoir appliquer directement au cerveau humain les microstimulations électriques. Le neurochirurgien canadien Wilder Penfield (1891-1976) réalisera cette prouesse chez des sujets épileptiques éveillés en cours d'intervention. L'homoncule de Penfield est une représentation graphique précise de l'organisation du cortex humain moteur et sensoriel où chaque point de la surface corporelle est représenté, c'est-à-dire de l'organisation somatotopique du cortex. La spécificité anatomique et physiologique du cerveau humain est alors directement abordée. Elle restera cependant difficile avant l'apparition de techniques non invasives de cartographie cérébrale[16].

Le modèle de cerveau prôné est alors localisationniste et associationniste, mais il est aussi sensori-moteur. Jusqu'aux années 1980, les études les plus poussées ayant été réalisées dans le domaine de la sensori-motricité, les descriptions fonctionnelles du cortex se fondaient encore plus ou moins implicitement sur la notion d'arc réflexe étendu au niveau cortical. Dans le cortex, on distinguait des zones primaires, secondaires et associatives de gestion des informations. Les aires sensorielles étaient subdivisées en aire primaire, une pour chaque modalité sensorielle d'organisation topographique et dans laquelle l'information parvenue des divers récepteurs sensoriels de l'organisme est analysée caractéristique par caractéristique – et en aire secondaire dans laquelle sont intégrées toute l'information d'une même modalité sensorielle et la synthèse des sensations élémentaires, réalise la construction de l'image mentale. Ces aires étaient dites visuo-psychiques, tacto-psychiques, auditivo-psychiques… Les aires sensorielles étaient bien circonscrites dans des régions corticales déterminées qui, seules, devaient avoir la fonction d'analyser une modalité sensorielle spécifique (par exemple

---

12 Grünbaum ASF, Sherrington CS. Observations on the physiology of the cerebral cortex of some of the higher apes (preliminary communication). *Proceedings of The Royal Society of London*, 1902, 69: 451-58.

13 Cushing H. Surgery of the head. In Keen WW ed. *Surgery, its principles and practice*. Philadelphia, Saunders, 1908 : vol. 3: 17-276.

14 La myéloarchitectonie met en évidence la topographie des fibres nerveuses et la cytoarchitectonie la répartition des différents types cellulaires au sein du cortex. Elles représentent une description neuroanatomique plus fine que celle des circonvolutions et des sillons.

15 Brodmann K. *Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde*. Leipzig : Barth, 1909 ; Vogt C, Vogt O. Die vergleichend-architektonische und die vergleichend-reizphysiologische Folderung der Grosshirninde unter besonderer Berücksichtigung der menschlichen. *Die Naturwissenschaften*, 1926, 14 : 1190-94 ; von Economo C, Koskinas GN. *Die Cytoarchitektonik der Hirninde der erwarchenen Menschen*. Wien & Berlin : J. Spinger, 1925.

16 Penfield W, Boldrey E. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, 1937, 60: 389-443.

l'aire 17 pour les stimuli visuels). L'information devait passer à travers des voies spécifiques ascendantes pour un traitement séquentiel : de l'organe des sens par les structures sous-corticales jusqu'au cortex sensoriel correspondant. Les aires associatives sont responsables de l'intégration des informations des différentes modalités sensorielles élaborées dans les différentes aires sensorielles. Les aires motrices subdivisées elles-mêmes en aires motrices primaires (aire de projection motrice) et prémotrices (psychomotrices) contrôlaient la programmation et l'exécution d'une réponse en relation avec ces informations sensorielles.

La neuroimagerie anatomique et fonctionnelle

Les débuts de l'imagerie cérébrale : de l'anatomie à la fonction

L'imagerie d'absorption volumétrique, ou la conquête de la troisième dimension de l'organe cérébral, est quant à elle fascinante. Le premier dispositif était un tube de rayons X réalisant un seul cliché dans un seul plan d'orientation. La période d'entre-deux-guerres est marquée par la recherche d'incidences crâniennes appropriées destinées à la mise en évidence convenable des canaux et orifices crâniens. L'image radiologique est une projection en deux dimensions d'un volume tridimensionnel, d'où la superposition gênante des structures. Pour dissocier les ombres superposées de différents plans, on peut mobiliser le patient ou bouger le tube. La recherche de la troisième dimension commence dès 1896 avec la radiologie stéréoscopique (*Stereoscopic Roentgen Picture*) de l'ingénieur américain Elihu Thompson (1853-1937) consistant en un simple déplacement du tube. Le médecin militaire belge Étienne Henrard (1870-1941) développe dès 1902 une technique radiologique à lecture stéréoscopique destinée à la localisation des corps étrangers[17]. Étienne Henrard mettra au point en 1917 une autre technique pour extraire des corps étrangers métalliques par un dispositif électromagnétique. Mais les méthodes stéréoscopiques restaient peu précises. Il faudra attendre les années 1970 pour voir le développement des techniques de scanographies permettant l'étude en coupe des différents tissus organiques du corps humain. La tomodensitométrie (TDM) d'abord, l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) ensuite, ont permis d'obtenir des images anatomiques du cerveau d'une finesse extraordinaire, acquises dans des temps de plus en plus courts et dans les trois dimensions de l'espace, avec leurs applications médicales considérables.

Ces méthodes sont, cependant, au départ, essentiellement morphologiques ; elles renseignent sur les structures anatomiques et pathologiques du cerveau, non sur son fonctionnement. Une vraie « révolution » dans l'exploration du cerveau survient quand l'imagerie de structurale se fait fonctionnelle. La mesure du degré d'oxygénation du sang dans le cas de l'imagerie par résonance magnétique (IRMf) ou du débit sanguin dans le cas de la tomographie par émission de positons (TEP) indique quelles zones du cerveau sont plus irriguées lors de l'accomplissement d'une certaine tâche par le sujet. Pour la première fois avec ces techniques pionnières, l'occasion fut donnée de voir fonctionner pratiquement en temps réel le cerveau humain. L'organisation somatotopique du cortex sensori-moteur ayant été confirmée, il a ensuite semblé possible d'appliquer ces méthodologies à l'étude de la topologie des ensembles neuronaux mis en jeu lors des processus cognitifs. On assiste alors à partir des années 1990 à une véritable inflation des études d'imagerie cérébrale fonctionnelle se couplant avec la psychologie expérimentale, voulant isoler des zones du cerveau responsables de telles ou telles facultés, ou plutôt de telles ou telles activités humaines.

[17] D'autres méthodes furent employées comme le compas de Hirtz. Pour les références de ce paragraphe et l'histoire des techniques de la neuroimagerie, voir Dupont J-C. Histoire des techniques d'exploration neuroradiologique : de l'anatomie à la physiologie cérébrale. In Dupont J-C, Cherici C éd. *L'exploration cérébrale. Histoire récente et nouveaux outils*. Paris : Hermann, 2015 : 77-97.

Les nouvelles modélisations

Avec l'imagerie, le modèle prôné devient celui du cerveau modulaire. Le cadre anatomo-fonctionnel classique et rigide du cerveau sensori-moteur avait d'abord été profondément modifié par la découverte, grâce aux techniques électrophysiologiques, de l'organisation en colonnes du cortex sensoriel, et dans le cas de la vision des voies parallèles de transmission à partir de la rétine et de l'implication de multiples aires visuelles[18]. Les voies afférentes des structures sous-corticales ne conduisant pas l'information seulement au cortex sensoriel primaire, mais à de nombreuses autres aires disséminées dans le cortex cérébral (en particulier dans les régions postérieures), la transmission de l'information doit se produire en parallèle à travers ces voies. En plus du trajet séquentiel du signal visuel à travers chaque niveau hiérarchique d'organisation du système visuel, de nombreuses voies de traitement de l'information fonctionnent aussi en parallèle, formant un réseau de circuits d'une grande complexité. Pour chaque modalité sensorielle existent différentes représentations cartographiques dans le cortex cérébral. Ces cartes privilégient l'analyse de caractéristiques spécifiques du stimulus et respectent l'ordonnancement du monde perceptif. Relativement au modèle sensori-moteur et au traitement séquentiel, cette conception du cerveau sensoriel est plus intégrée, reposant sur la distribution et le traitement parallèle de l'information. Cette tendance à l'intégration va être encore renforcée par l'étude des fonctionnements cognitifs, lorsqu'un modèle modulaire du fonctionnement cérébral issu de la psychologie cognitive, de l'approche computationnelle (IA) et de l'interprétation des premières expériences de neuroimagerie sera proposé[19]. Les comportements et les perceptions ne correspondent pas à une région unique du cortex, mais à de multiples aires situées dans de nombreuses parties de cerveau. L'activité du réseau des régions et donc le traitement parallèle et interactif de l'information entre les aires seraient donc à la base des fonctions mentales. Chaque région peut ainsi avoir des propriétés fonctionnelles, mais une activité cognitive émerge d'un réseau de régions et non d'une région unique. Cette organisation en réseau reste compatible avec la rigidité des câblages, et éventuellement avec un strict déterminisme génétique de la corticogenèse.

L'imagerie a ensuite conduit à encore rectifier quelque peu cette représentation du cerveau humain en intégrant la plasticité, c'est-à-dire la labilité des réseaux, dans un cadre développemental ou adaptatif. Un réseau verra ses propriétés, donc la fonction qu'il incarne, se modifier selon la région qu'il incorpore. Des régions supplémentaires peuvent s'adjoindre à un réseau de base selon le type de stimulus, le type de tâche à effectuer et le contexte neural. Au cours de l'apprentissage, les traces mémorielles seraient formées au sein de réseaux de neurones fortement interconnectés, cohésion modifiable par l'expérience (variation des types de synapses, de la force des connexions synaptiques). Les réseaux se chevauchent, une même cellule ou ensemble cellulaire pouvant appartenir à plusieurs réseaux, chacun représentant une carte cognitive (un souvenir) spécifique.

Les îlots de plasticité au sein d'un environnement neural plus stable et les réseaux neuronaux distribués succèdent ainsi à un modèle d'organisation modulaire plus rigide. D'un point de vue historique, le remplacement de la conception modulaire abusivement qualifiée de « néophrénologique » (une fonction correspondant à une région ou une aire) pour une architecture en réseaux distribués opère un dépassement de la vieille querelle entre localisationnistes et antilocalisationnistes.

---

[18] Mountcastle VB. Modality and topographic properties of single neurons of cat's somatic sensory cortex. *Journal of Neurophysiology*, 1957, 20: 408-34 ; Hubel D, Wiesel T. Anatomical demonstration of columns in the monkey striate cortex. *Nature*, 1969, 221: 747-50.

[19] Posner MI, Raichle ME. *L'esprit en images*. Bruxelles : De Boeck Université, 1998.

Conclusion

Les exemples tirés de l'histoire contemporaine confirment que, tout comme dans les temps plus anciens, les techniques d'exploration et les représentations évoluent en parallèle et que ces dernières expriment la culture scientifique de leur temps. Ce qui caractérise cependant la période plus récente est que les technologies sont devenues agentes, en générant par elles-mêmes des représentations. Par ailleurs, les méthodes d'exploration de la recherche fondamentale sont aussi devenues des outils d'exploration médicale. L'indissociation de la clinique et de la recherche fondamentale est particulièrement manifeste dans le cas de la neuroimagerie, qui a, depuis le début du XXe siècle, à la fois rendu des services cliniques et perfectionné l'anatomie cérébrale, et qui a depuis ces trente dernières années, permis des explorations fonctionnelles concernant le métabolisme, la diffusion de l'eau, le débit sanguin et la perfusion, la neurotransmission, ou les structures moléculaires du cerveau. Enfin, les techniques de neuroimagerie révèlent un atout majeur en médecine, celui de permettre au niveau cérébral le développement d'actes qui sont plus simplement diagnostiques, mais aussi thérapeutiques, sous contrôle de l'image. L'exploration du cerveau humain normal et pathologique est désormais un chantier considérable sur des plans indissociables, cliniques, fondamentaux et thérapeutiques.