

Les neurosciences cognitives en deux mots

Depuis le début du XIX^e siècle, les concepts fondamentaux et les principales méthodologies des neurosciences ont largement évolué. Grâce au développement de nouvelles méthodes d'imagerie cérébrale, les découvertes se sont multipliées. Une thématique concrète de recherche, la reconnaissance des visages, montre le genre de questions qui se posent et les programmes de recherche mis en œuvre pour y répondre. Les neurosciences cognitives sont aujourd'hui traversées par deux axes de recherche spécifiques, mais néanmoins complémentaires : l'approche descendante qui s'appuie sur une théorie du comportement pour progresser dans l'étude des mécanismes cérébraux sous-jacents et l'approche ascendante qui part de questions dérivées de l'observation du fonctionnement cérébral lui-même. Les perspectives d'avenir concernent les techniques d'action sur le système nerveux, notamment l'essor de la pharmacologie cérébrale, des avancées dans le domaine de la neuro-robotique et l'identification de maladies héréditaires, mais devraient faire l'objet de débats éthiques.

XAVIER SERON ET MARC CROMMELINCK

À l'origine des neurosciences cognitives on trouve un postulat central : les conduites, les émotions et les processus mentaux sont sous-tendus par des événements biophysiques et biochimiques ayant leur siège dans le cerveau. Le projet des neurosciences cognitives est de décrire la cinétique de ces événements physiologiques qui sont responsables de nos actions, de nos perceptions, de nos souvenirs, de nos pensées et de nos divers états conscients.

UN PEU D'HISTOIRE...

Ce projet est ancien et l'histoire des neurosciences est traversée par une évolution progressive des conceptions et des techniques d'analyse du cerveau

et du comportement. Ainsi, dès le début du XIX^e siècle, on considérait que le cerveau était composé de différentes parties, chacune accomplissant une fonction ou « faculté » psychologique particulière. Dans la mesure où il était impossible à cette époque d'observer le fonctionnement des structures cérébrales de manière non invasive, des chercheurs comme Franz Joseph Gall et les phrénologistes à sa suite ont imaginé que l'on devait être en mesure de localiser les facultés psychologiques en examinant de l'extérieur la forme du crâne. Les chercheurs pensaient que plus une fonction était développée, plus la partie du cerveau qui en avait la charge augmentait de volume. On imaginait en outre que cet accroissement de volume exerçait de l'intérieur une pression sur le crâne au point d'y créer une convexité ou « bosse » repérable à la palpation, d'où par exemple l'expression « avoir la bosse des maths ». Cette approche dite « phrénologique » fera progressivement place à des démarches scientifiques plus rigoureuses, mais qui partageront le même objectif : mettre en relation les activations et les structures cérébrales avec les états mentaux afin de comprendre comment le cerveau fabrique la pensée et les émotions.

À la fin du XIX^e siècle, cette enquête s'est appuyée essentiellement sur la pathologie. On tentait d'inférer les fonctions des différentes parties du cerveau à partir de l'observation des troubles résultant de leur lésion. Paul Broca, neurochirurgien à l'hôpital du Kremlin-Bicêtre, inaugure ce courant de recherches en montrant l'existence d'une relation régulière entre une lésion localisée à la partie antérieure de l'hémisphère gauche et un trouble de la production verbale. Par la suite, l'observation des patients deviendra systématique et d'autres rapports réguliers seront observés entre divers troubles mentaux et diverses lésions cérébrales.

Entretemps les travaux des neurobiologistes mettront progressivement à jour la structure interne du cerveau et son extraordinaire complexité. Le neurone est identifié comme unité de base du fonctionnement cérébral. On découvre qu'il est le siège de phénomènes électriques directionnels : l'« influx nerveux ». La structure interne du cerveau révèle un gigantesque réseau composé de milliards de neurones interconnectés entre eux par des jonctions appelées synapses et connectés aux systèmes sensoriels et moteurs de l'organisme. Au cours de cette première période de recherches et pendant les deux premiers tiers du XX^e siècle, un débat opposera ceux pour qui le cerveau est un ensemble indifférencié de parties toutes égales entre elles et d'autres pour qui il est composé de parties fonctionnellement différentes accomplissant des activités spécifiques. Ce débat trouvera un début de résolution lorsque l'on constatera que de multiples aires cérébrales sont activées lors de la réalisation d'une tâche particulière et lorsque les psychologues, avec l'apparition de la psychologie cognitive dans les années soixante, décriront le fonctionnement mental comme le résultat de la mise en œuvre d'une séquence ordonnée d'opérations élémentaires. Les différentes parties du cerveau prennent en charge des opérations mentales partiellement différentes, mais elles travaillent de concert pour réaliser des activités mentales plus complexes. La description de ses activités mentales complexes fait l'objet de recherches en psychologie cognitive.

Le programme des neurosciences cognitives s'inscrit de la sorte à l'interface des sciences du cerveau (neurophysiologie, neuro-anatomie, neurochimie, neurogénétique) et des sciences cognitives (psychologie cognitive, intelligence artificielle, sciences de l'information...). Avec les premières, les neurosciences cognitives participent au projet visant à comprendre les mécanismes neuronaux de base et la connectivité neuronale sous-tendant les activités motrices, perceptives et cognitives; avec les secondes, les neurosciences cognitives rejoignent la psychologie cognitive en contribuant à la compréhension des opérations mentales — ou fonctions cognitives — qu'est capable de réaliser le système nerveux central. Mais alors que dans leur projet d'analyse des caractéristiques anatomiques et neurophysiologiques qui sous-tendent les conduites, les neurosciences peuvent chez l'animal avoir recours aux méthodes classiques de l'expérimentation neurophysiologique (ablations sélectives, enregistrement *in vivo* de l'activité cérébrale grâce à des électrodes implantées, etc.), les neurosciences humaines ont été dans un premier temps limitées à l'étude des désordres cognitifs et comportementaux consécutifs aux lésions cérébrales acquises.

PLUS RÉCEMMENT

Au cours des trente dernières années, les neurosciences cognitives vont cependant connaître un développement considérable à la suite de l'apparition des méthodes d'imagerie cérébrale fonctionnelle. Les premiers travaux chez l'homme remontent aux années quatre-vingt avec Marcus Raichle à la Washington University de Saint Louis. La méthode utilisée est la tomographie par émission de positons (TEP); elle consiste à enregistrer les variations du débit sanguin cérébral régional lorsque le sujet s'adonne à une tâche cognitive. Cette évolution est importante puisque de l'observation des troubles présentés par les patients atteints de lésions cérébrales, on passe à l'observation de l'activité cérébrale de sujets normaux en train d'accomplir une tâche particulière.

Depuis lors, les méthodes fonctionnelles d'observation de l'activité cérébrale se sont diversifiées et améliorées. Chacune présente des avantages et des limites. En schématisant quelque peu, il y a d'un côté des *méthodes d'enregistrement* et de l'autre des *méthodes de stimulation*. Les méthodes électrophysiologiques enregistrent grâce à des électrodes placées sur le scalp les variations d'activité électrique globale à la surface du cerveau (méthodes de l'électroencéphalographie, EEG, et des potentiels évoqués), mais il est aussi possible de recueillir l'activité électrique de cellules nerveuses individuelles grâce à un enregistrement par micro-électrodes (approche nécessitant alors la trépanation). Les méthodes d'imagerie, comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (ou IRMF) ou la TEP, enregistrent des changements physiologiques associés aux modifications du flux sanguin cérébral régional tandis que les méthodes magnétiques (MEG ou magnéto-encéphalographie) enregistrent les propriétés des champs magnétiques liés à l'activité neuronale. Du côté des

méthodes de stimulation, la plus utilisée aujourd'hui est la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) qui peut modifier l'activité d'une zone précise du cerveau en l'activant ou au contraire en l'inhibant de manière temporaire. Certaines méthodes sont très efficaces pour nous indiquer la localisation précise des régions du cerveau concernées par une activité mentale alors que d'autres méthodes fournissent plutôt des informations sur le déroulement temporel des activations, elles indiquent alors avec une précision de l'ordre de la milliseconde à quel moment se produit un événement.

Grâce au développement de ces nouvelles méthodes essentiellement non invasives, le programme des neurosciences s'est amplifié et les découvertes se sont multipliées de manière assez spectaculaire. Mais bien sûr, les travaux de neuroimagerie — qui furent particulièrement médiatisés — ne suffisent pas à eux seuls pour comprendre réellement ce qui se passe au niveau cérébral d'un point de vue structural et fonctionnel. En effet, découvrir à quel endroit se produit un processus mental dans le cerveau ne revient pas à dire que l'on comprend parfaitement la dynamique matérielle des processus en jeu. L'exigence ultime des neurosciences est de comprendre l'ensemble des mécanismes cérébraux responsables de la pensée en partant du niveau des réseaux impliqués pour descendre jusqu'aux structures plus élémentaires de l'architecture cérébrale, les neurones et le codage neurochimique des transmissions synaptiques. À ce propos la neurophysiologie et la neurochimie continuent bien sûr à jouer un rôle essentiel.

LA NATURE DES QUESTIONS

Pour appréhender ce que sont les neurosciences cognitives, une des approches les plus parlantes consiste à décrire le genre de questions que l'on se pose et les moyens que l'on met en œuvre pour y répondre. En voici un exemple particulièrement illustratif. Partons d'un constat en apparence simple: les êtres humains disposent d'une capacité visuelle particulière et très puissante celle de reconnaître un grand nombre de visages¹.

La question centrale est alors de savoir comment s'y prend le cerveau pour reconnaître les visages? Par quels mécanismes arrivons-nous à distinguer un vieil ami de notre voisin de palier?

Bien sûr lorsque nous nous posons ce genre de questions, nous savons que les mécanismes en cause sont localisés dans le cerveau; mais, si nous voulons comprendre comment fonctionne le cerveau pour reconnaître les visages, il nous faut établir quelles sont les conduites particulières qui correspondent, chez l'homme, à cette capacité de « reconnaître les visages ». Il est donc nécessaire de réaliser dans un premier temps une analyse fonctionnelle des activités de reconnaissance des visages, c'est-à-dire d'établir un inventaire le plus complet possible des conduites qu'il est possible de ranger sous cette fonction parti-

¹ Nous aurions pu choisir une autre capacité de la cognition humaine, utiliser les nombres, produire du langage, jouer de la musique, etc.

culière. C'est en effet cette analyse fonctionnelle qui déterminera quelles sont les opérations que le cerveau doit être en mesure de réaliser. Pareil descriptif sera pour l'essentiel issu de travaux menés par des psychologues. Ce sont eux qui vont fournir une sorte de cahier des charges des opérations accomplies par le cerveau humain lorsqu'il se montre capable de reconnaître des visages.

Il est ainsi possible de dresser une liste non exhaustive de quelques-unes des principales caractéristiques de cette activité de reconnaissance.

« Reconnaître un visage chez un être humain » c'est :

- davantage que reconnaître un objet, car reconnaître une tasse ce n'est pas reconnaître une tasse en particulier, alors que la reconnaissance d'un visage correspond à la reconnaissance d'un exemplaire singulier,
- reconnaître le sexe de la personne,
- être capable d'identifier l'émotion faciale,
- reconnaître approximativement l'âge,
- reconnaître le groupe ethnique,
- reconnaître plus difficilement les membres des autres groupes ethniques (le fameux « effet de race ») car on perçoit les personnes des autres groupes comme étant plus semblables entre elles,
- être capable de mettre en correspondance un vrai visage en couleur avec une photo en noir et blanc,
- reconnaître la personne de face et de profil,
- reconnaître son propre visage,
- une capacité qui apparaît très tôt chez l'enfant,
- une opération extrêmement rapide (largement moins d'une seconde),
- un processus obligatoire : placé devant le visage de quelqu'un que l'on connaît, il est impossible de décider ne pas le reconnaître,
- une capacité étendue, on évalue de 5 à 10 000 environ le nombre de visages différents mis en mémoire et que l'on est capable de reconnaître,
- un processus robuste dans le temps, on peut reconnaître le visage d'une personne qu'on n'a plus vue depuis dix ans ou plus (cette reconnaissance résiste donc à des changements),
- une reconnaissance qui ne s'appuie pas sur le langage (on est très mauvais pour décrire le visage de quelqu'un verbalement), etc.

La description fonctionnelle de cette capacité permet ainsi de dresser les propriétés du système de reconnaissance dont on cherche la trace dans l'activité et la structure du cerveau.

Les démarches que les chercheurs vont ensuite accomplir pour décrire et identifier les structures nerveuses capables de remplir ces fonctions définissent des programmes de recherches très étendus qui mettent en œuvre des méthodes spécifiques. Illustrons ces programmes sous la forme de questions de recherche.

Ainsi : quelles sont les parties du cerveau qui sont actives lorsque l'on reconnaît un visage ? Sont-elles identiques à celles qui reconnaissent les objets ? Lors d'une activité de reconnaissance, quelle est l'information qui est extraite du visage et qui aide à son identification (est-ce le nez, les yeux, la bouche, ou encore l'ensemble de ces éléments-là, ou les rapports spatiaux entre ces éléments) ? Sont-ce les mêmes informations qui sont extraites du visage pour définir son âge, son sexe ou son identité ? Quel est le rôle du mouvement dans la reconnaissance des visages ? Quels sont les éléments exagérés par les caricaturistes lorsqu'ils dessinent un visage et qu'on le reconnaît ? À quel âge apparaît la reconnaissance des visages ? La reconnaissance des visages est-elle présente chez d'autres espèces que la nôtre, notamment chez les espèces qui ont une vie sociale structurée ? Quelles sont chez ces espèces les structures cérébrales concernées et ont-elles des propriétés proches des nôtres ? Peut-on créer des machines qui reconnaissent les visages et qui auraient les mêmes capacités que l'être humain ? Et dans l'affirmative, les programmes utilisés par ces machines sont-ils des candidats possibles pour la compréhension des mécanismes utilisés par le cerveau ?

Y a-t-il des sujets qui ne reconnaissent pas les visages dès leur naissance, leur cerveau présente-t-il des caractéristiques fonctionnelles ou structurales particulières ? Y a-t-il des maladies génétiques qui prédisposent à un trouble de la reconnaissance des visages ? Les sujets autistes reconnaissent-ils les visages comme les sujets normaux et discriminent-ils les émotions faciales ? Les mécanismes en jeu pour reconnaître les émotions sur un visage sont-ils les mêmes que ceux qui permettent la reconnaissance de l'identité de la personne ? La reconnaissance des émotions est-elle la même dans tous les groupes humains ou ces mécanismes sont-ils influencés par la culture ou par certaines habitudes sociales ? Comment se trouvent stockés dans notre mémoire visuelle les 5 000 à 10 000 visages que nous connaissons ? Comment sont représentés ces visages en mémoire, a-t-on une seule représentation par personne et si oui laquelle (face, profil ou encore de trois quarts) ou bien avons-nous au contraire plusieurs représentations différentes par personne ?

Voilà autant de questions qui deviennent pertinentes dans le cadre des recherches en neurosciences cognitives. Les méthodes mises en œuvre pour tenter d'y répondre sont très diverses, nous les avons énumérées plus haut : observation minutieuse de patients cérébraux lésés souffrant de troubles de la reconnaissance des visages (prosopagnosie) ; analyse structurale et fonctionnelle des cerveaux de ces patients par les différentes techniques d'imagerie déjà mentionnées ; mise en place de paradigmes de recherche chez des sujets sains engagés dans des activités de reconnaissance de visages ; enregistrement par micro-électrodes chez l'animal, des réponses de neurones appartenant à différentes aires du système visuel spécialisées dans les traitements de l'information liée aux visages, etc. La moisson est abondante et les programmes de recherche ne cessent encore de s'enrichir et se diversifier.

DE HAUT EN BAS *VERSUS* DE BAS EN HAUT

Au-delà de cet exemple, ce qu'il est important de souligner c'est que le type de recherches illustré dans les paragraphes précédents est conduit au départ de modèles psychologiques. Ils concernent notamment la perception, la mémoire, l'émotion, l'attention, l'apprentissage, le contrôle moteur... : ce sont eux qui fournissent le cadre au sein duquel les hypothèses fonctionnelles deviennent pertinentes. Cette approche est parfois qualifiée de « descendante » dans la mesure où elle s'appuie sur une théorie du comportement et des états mentaux pour progresser dans l'étude des mécanismes cérébraux sous-jacents.

Au contraire, d'autres recherches en neurosciences partent de questions dérivées de l'observation du fonctionnement cérébral lui-même, à un niveau global ou à un niveau beaucoup plus élémentaire. Ainsi, au cours des dernières décennies, les approches cellulaire et moléculaire ont fait des progrès considérables. Il serait hors de propos ici d'en donner un aperçu d'ensemble. Citons seulement parmi bien d'autres les thématiques suivantes : étude du métabolisme des molécules constituant les neurotransmetteurs ; études physiologique et pharmacologique des récepteurs ; étude de la structure et du fonctionnement des protéines formant, au niveau des membranes cellulaires, les canaux ioniques ; étude des voies de signalisation intracellulaire liée à l'activité de protéines spécifiques au sein du cytoplasme ; étude de la physiologie des jonctions synaptiques ; étude de la régulation des facteurs de transcription génétique au sein des cellules nerveuses... Tous ces travaux représentent les efforts conjoints de la biochimie, de la biophysique, de la pharmacologie, de la physiologie cellulaire et moléculaire, de la génétique moléculaire... pour comprendre la structure et le fonctionnement cellulaires. La tâche est immense étant donné l'extrême complexité de cette unité centrale de traitement qu'est le neurone. Cette approche est parfois qualifiée d'« ascendante », elle s'appuie en effet sur la compréhension des éléments de base du réseau nerveux dans l'espoir de pouvoir remonter progressivement du niveau élémentaire vers le niveau des fonctions globales.

S'il est vrai qu'aujourd'hui les programmes de recherches mis en œuvre par chacune de ces approches sont relativement spécifiques, on peut néanmoins penser qu'à terme ils convergeront en vue d'un même objectif. Un exemple assez remarquable de cette convergence est le travail de Eric Kandel, prix Nobel de médecine en 2000, et de son équipe. En un mot, l'objectif de cette recherche est de rendre compte des mécanismes de consolidation et de stockage des contenus mnésiques en termes de modifications à plus ou moins long terme des constituants de base du neurone et du fonctionnement synaptique. Pareille approche a privilégié l'étude d'organismes élémentaires sur lesquels un modèle expérimental réductionniste peut être mis en place. Les études de Kandel se sont portées sur un gastéropode marin, l'aplysie, qui a l'avantage de présenter des comportements d'apprentissage et de mémoire à court et à long terme relativement élaborés. Par ailleurs, les mécanismes nerveux qui sous-tendent ces comportements sont implémentés dans des réseaux nerveux

relativement élémentaires (quelques dizaines de neurones de grande taille interconnectés par des liaisons mono ou di-synaptiques et pouvant faire l'objet d'enregistrement unitaire).

Sans entrer dans le détail des résultats expérimentaux, faisons-en ressortir en quelques mots les principales conclusions. La mémoire semble être très intimement liée à des modifications à plus ou moins long terme de l'efficacité et de la densité des connexions synaptiques au niveau des réseaux nerveux impliqués dans les conduites qui font l'objet de l'apprentissage et d'une mémorisation. L'intérêt des travaux de Kandel est de mettre en évidence les mécanismes cellulaires de la création et de l'inscription, dans un réseau de neurones, des traces des interactions de l'organisme avec le milieu. Un souvenir serait ainsi représenté dans le cerveau par un ensemble de neurones formant une assemblée grâce à des liens synaptiques (appelés parfois « poids synaptiques ») spécifiques. Ce qui est fascinant dans ces travaux c'est que les mécanismes sous-tendant ces apprentissages élémentaires chez un petit mollusque sont très probablement du même type que ceux intervenant dans la consolidation et le stockage des traces mnésiques chez l'homme.

CERVEAU-FICTION ?

Les méthodes et les techniques d'observation et de stimulation du cerveau connaissent un rythme de croissance d'une telle rapidité qu'il serait bien hasardeux de prédire quels seront les développements futurs. On voit néanmoins apparaître un certain nombre de développements techniques et appliqués qui vont modifier singulièrement la capacité des générations futures à « agir » sur le cerveau. On assiste dès à présent à un nouvel essor de la pharmacologie cérébrale (stimulants, neuroleptiques, drogues agissant sur les récepteurs, etc.) liés aux progrès de la neurochimie. On voit se développer des techniques de stimulation des fonctions cérébrales par l'implantation d'électrodes en profondeur chez les patients parkinsoniens, mais aussi dans le cas de maladies psychiatriques graves. On voit également des avancées spectaculaires dans le domaine de la neuro-robotique: pilotage à partir de signaux cérébraux de dispositifs artificiels, couplage entre le cerveau et des dispositifs sensoriels matériels (rétine artificielle, implants cochléaires...). On assiste également à des tentatives d'autogreffe et au guidage chimique des proliférations neuronales spontanées. Enfin, la recherche en neuro-génétique conduit à l'identification de maladies héréditaires et les progrès en génie génétique pourraient conduire à leur éradication progressive.

Il nous paraît évident que ce formidable pouvoir d'action et de transformation devra faire l'objet de débats éthiques car de la même manière que la manipulation du génome engage l'identité de notre espèce, l'action sur le cerveau risque à son tour d'en modifier les contours. ■