

Le cerveau émotionnel

Swan Pichon et Patrik Vuilleumier

La tradition philosophique et religieuse occidentale a durablement marqué notre représentation des affects, longtemps cantonnés aux désordres de l'âme et de la raison. De même, la science a longtemps considéré irréalizable l'étude rigoureuse des processus affectifs. Effectivement, les émotions sont des événements mentaux complexes, qui pourraient paraître trop intimes, denses, parfois inexplicables, pour être l'objet d'études scientifiques. Et pourtant. Grâce à l'étude des lésions cérébrales et au développement de l'imagerie cérébrale, ainsi qu'aux études menées chez l'animal, les scientifiques commencent à comprendre quelles régions cérébrales interviennent dans la genèse des émotions de base et leur régulation. Ces travaux permettent de replacer les émotions dans le champ des sciences de la cognition et la neurobiologie; ce n'est plus un domaine «à part» parmi les fonctions mentales.

Au cours du XX^e siècle, de nombreux psychologues ont tenté de décrire de façon exhaustive les affects. Ainsi, en 1981, après avoir répertorié près d'un siècle de définitions cherchant à caractériser les émotions, les Américains Paul et Anne Kleinginna en

ont proposé une définition simple et relativement consensuelle. Selon eux, une émotion résulte de facteurs subjectifs et objectifs qui interagissent au sein de plusieurs systèmes neuronaux et endocriniens, déclenchent des sentiments de plaisir ou de rejet, modulent divers processus cognitifs tels que la mémoire ou l'attention, causent des modifications physiologiques (rythme cardiaque, sudation), et déclenchent des comportements qui aident l'individu à s'adapter aux situations qui les ont déclenchées.

Les pionniers du cerveau émotionnel

Si les réactions comportementales et physiologiques provoquées par certaines émotions comme la peur ont été beaucoup étudiées, la question du substrat neuronal qui leur est associé est plus récente et reste encore largement ouverte. Quelles aires cérébrales sont impliquées? Existe-t-il des régions distinctes et des mécanismes dédiés aux différentes émotions? Nous ferons ici le point sur nos connaissances du cerveau émotionnel, en rappelant d'abord quels ont été les «pionniers» de ces recherches, puis en décrivant les principales régions cérébrales identifiées.

Charles Darwin (1809-1882), le père de la théorie de l'évolution, a été parmi les premiers à défendre une conception universelle des émotions, en s'attachant à montrer que les émotions «basiques», telles que la colère, la peur ou la tristesse, sont observées chez tous les individus, quelle que soit leur culture, et que des comportements apparemment analogues sont présents chez de nombreuses espèces animales. Pour Darwin, la similitude entre les comportements affectifs observés chez l'animal et l'homme constitue un argument pour étayer sa théorie de l'évolution. Ces travaux influenceront de nombreux courants de pensée, à commencer par le père de la psychologie américaine, William James (1842-1920), qui élabore, avec Carl Lange (1834-1900), la première théorie psychologique des émotions. Pour James, les émotions relèvent d'un

processus central d'interprétation des informations viscérales et motrices. C'est ce qu'illustre la célèbre formule: « Nous ne courons pas parce que nous avons peur, mais nous sentons la peur parce que nous courons. »

Suivront les travaux des physiologistes Walter Cannon (1871-1945) et Philipp Bard (1898-1970). En désaccord avec James et Lange, Bard et Cannon – à qui nous devons aussi la définition de la notion d'homéostasie, l'équilibre des fonctions physiologiques qui régulent le fonctionnement de l'organisme – avanceront que les émotions sont des phénomènes psychologiques centraux qui entraînent des réactions corporelles et viscérales. Ils furent également les premiers à clarifier l'influence de l'hypothalamus sur les états émotionnels en décrivant comment la stimulation de cette structure, chez l'animal, déclenche instantanément des réactions de fuite ou d'agressivité.

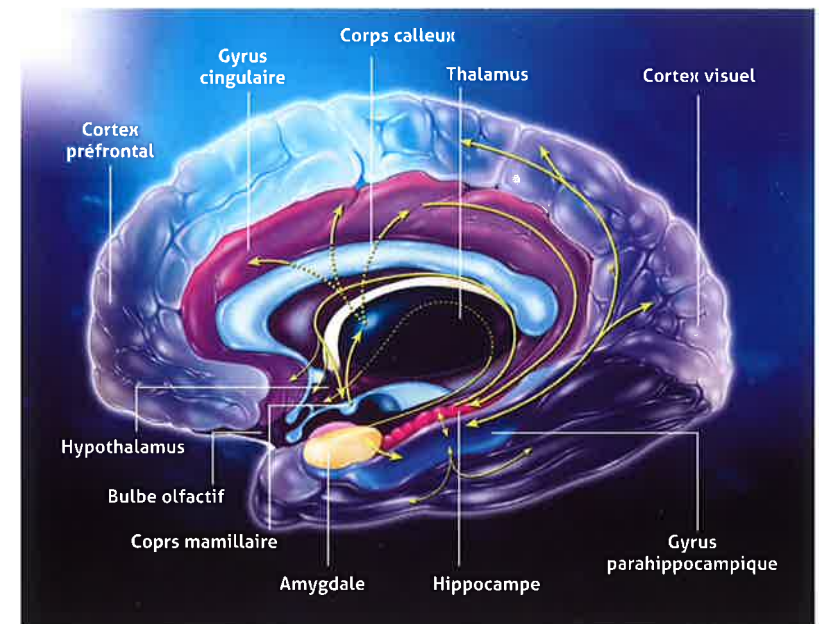
Le système limbique

La fin du XIX^e siècle verra également naître les premières définitions anatomiques du cerveau émotionnel, notamment avec les travaux de Paul Broca (1824-1880). Il est le premier à identifier un réseau d'aires situées sur les « bords » de la surface corticale médiane (le gyrus cingulaire et le gyrus para-hippocampique qui longe l'hippocampe) et qu'il suppose impliquées dans l'analyse affective des informations olfactives. Il forge ainsi le concept de « système limbique », *limbus*, en latin, signifiant « bordure ». La notion de système limbique a par la suite été développée pour y adjoindre d'autres structures.

Ainsi, James Papez (1883-1958), notamment, a ajouté des structures sous-corticales, tel l'hypothalamus, proposant ainsi un circuit qui porte encore son nom. Puis Paul MacLean (1913-2007) y a ajouté le complexe amygdalien, encore nommé amygdale cérébrale (ou amygdale) en raison de sa forme en amande, et qui joue un rôle capital dans la peur, et d'autres structures, telle l'insula. Papez a même proposé d'étendre la

fonction du système limbique: il pensait que ce système était le siège de l'élaboration d'une conscience émotionnelle. Quant à MacLean, il développa une théorie de l'évolution du cerveau (dit triunique) des mammifères en trois « étages »: le cerveau reptilien, l'« étage » le plus primitif, est surmonté du système limbique des paléomammifères, lui-même surmonté du néo-cortex, le plus récent.

Toutefois, aujourd'hui, le terme de système limbique, pratique pour désigner de façon générale les circuits associés aux émotions et à l'homéostasie, est devenu trop vague pour définir précisément les fonctions affectives en termes anatomiques ou fonctionnels. Certains neuroscientifiques, tel le psychologue



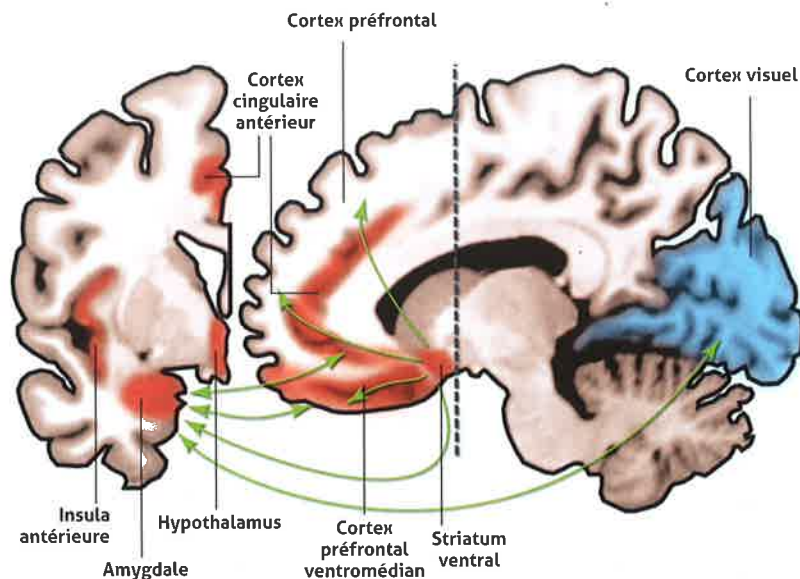
© Virginie Denis

Le système limbique est constitué de nombreuses aires. Ce circuit des émotions a été progressivement élaboré par plusieurs neuroanatomistes qui ont déduit les zones impliquées dans le traitement des émotions, de l'étude des conséquences de lésions cérébrales et d'études sur des animaux. Le circuit de Papez, schématisé ici, est le plus employé. S'il illustre le fait que les aires impliquées sont interconnectées et se projettent à distance, notamment vers le cortex, il n'est pas spécifique des différentes catégories d'émotions.

Joseph Ledoux, qui dirige le Centre de neurosciences de l'Université de New York, insistent pour que l'on abandonne ce terme. Tout d'abord, sa définition repose principalement sur des connaissances anatomiques antérieures aux années 1950.

L'amygdale: pour la peur, mais aussi pour l'attention

Et surtout, il ne prend pas en compte les études fonctionnelles qui relient les structures à leur fonction. Ainsi, la liste des aires définissant le cerveau émotionnel est certainement



© Swann Pichon

Les processus affectifs sont contrôlés par plusieurs structures cérébrales (*en rouge*) interconnectées. Chacune de ces régions contribue à l'évaluation affective des signaux sensoriels ainsi qu'à la régulation des réponses émotionnelles. L'amygdale reçoit des projections (*en vert*) des aires corticales sensorielles (visuelles, auditives, etc.) et se projette sur l'ensemble du lobe temporal et occipital, notamment sur le cortex visuel (*en bleu*). Ces projections favorisent l'interaction des processus affectifs et perceptifs. Les neurones du striatum ventral émettent des projections sur l'ensemble du cortex préfrontal et jouent un rôle majeur dans la prise de décision. On a représenté une coupe médiane du cerveau (*d'avant en arrière, à droite*) et une coupe transverse de l'hémisphère gauche selon les pointillés (*à gauche*).

appelée à évoluer: certaines aires, tels le striatum ventral et le cortex orbitofrontal, devraient en faire partie, d'autres pourraient être éliminées. Qui plus est, mieux vaut ne pas attribuer de façon trop rigide une seule fonction à une aire donnée. L'amygdale, par exemple, joue un rôle essentiel dans la peur, mais intervient aussi dans la prise de décision, l'attention et la mémoire.

L'ensemble constitué de l'amygdale et de l'hippocampe est déterminant dans les réactions de peur et d'anxiété. Sur le plan anatomique, l'amygdale regroupe plusieurs noyaux logés dans la partie antéromédiane du lobe temporal des mammifères, à l'avant de l'hippocampe. L'hippocampe, qui joue un rôle déterminant dans la mémorisation, encode le contexte dans lequel un événement survient.

L'amygdale joue un rôle primordial dans le conditionnement aversif et dans le déclenchement des réponses qu'il entraîne. Dans les expériences fondées sur ce conditionnement, on associe un stimulus très désagréable à un autre stimulus neutre (un son par exemple, ou un objet). Après quelques expositions, la simple perception du stimulus initialement neutre engendre une réaction de peur. Le rythme cardiaque de l'animal s'accélère, sa tension artérielle augmente, il fuit instantanément – ou s'il ne peut s'échapper, il adopte un comportement caractéristique de la peur: il s'immobilise. Quand l'amygdale est lésée, l'animal n'est plus en mesure d'apprendre ces associations et ne montre plus aucune réaction de peur. Il en va de même chez l'homme adulte, chez qui la lésion bilatérale de l'amygdale entraîne une absence de peur. Le revers de la médaille est que le sujet est également incapable d'évaluer les situations de danger.

Chez l'homme, l'IRM fonctionnelle (IRMf) a montré que la perception de stimulus négatifs ou qui déclenchent des phobies, mais aussi d'indices sociaux tels qu'un visage exprimant la peur, un geste menaçant ou un cri d'alerte, activent fortement l'amygdale. Celle-ci intervient également dans les processus de décision et dans les choix économiques. Son activité

augmente d'autant plus que l'on doit prendre une décision dont l'issue est risquée. De surcroît, les individus dont l'amygdale est lésée n'éprouvent plus l'aversion naturelle que l'on ressent normalement pour les pertes monétaires. Par ailleurs, d'autres études ont montré qu'elle est impliquée dans la confiance que l'on accorde à un inconnu ou encore dans la régulation de son espace social péripersonnel, c'est-à-dire la distance minimale avec un individu inconnu que l'on tolère instinctivement sans se sentir menacé. Ces résultats illustrent comment l'évolution semble avoir intégré des fonctions élémentaires (la peur d'une menace immédiate) au profit de fonctions cognitives plus élaborées (la peur du risque).

Toutefois, le rôle de l'amygdale ne se limite pas au traitement des émotions négatives. Elle joue également un rôle dans les processus attentionnels et mnésiques. De par ses connexions, l'amygdale influe sur un grand nombre de systèmes cérébraux, tels que le cortex sensoriel pour la perception, l'hippocampe pour la mémoire, l'hypothalamus pour les hormones de stress (par exemple le cortisol). Elle interviendrait ainsi dans les processus d'orientation attentionnelle involontaires (ainsi, on détourne spontanément la tête vers un cri ou une lumière intense). Lorsqu'un événement émotionnellement marquant survient, les connexions que partage l'amygdale avec le lobe temporal et le système visuel lui permettent d'augmenter l'activité des régions sensorielles impliquées dans la perception des stimulus marquants. Cette modulation sensorielle est abolie chez des patients dont l'amygdale a été lésée par un accident vasculaire cérébral. Impliquée dans la mémoire à long terme, l'amygdale favorise également la consolidation des souvenirs marquants ou traumatiques. L'amygdale et l'hippocampe sont en effet très interconnectés, ce qui facilite l'encodage des événements émotionnels.

Plus récemment, les scientifiques ont découvert que certains neurones de l'amygdale jouent un rôle dans le conditionnement appétitif : chez l'animal, la lésion de l'amygdale diminue l'effet

de satiété, de sorte que l'animal n'est jamais rassasié. Chez l'homme, l'amygdale réagit également aux stimulus positifs. Et à l'humour ! L'amygdale contribuerait à représenter la valeur d'un stimulus, c'est-à-dire sa valence, et en particulier son importance pour les besoins de l'organisme, qu'il soit positif ou négatif.

Les émotions positives

L'amygdale est connectée avec de nombreuses aires cérébrales, telles que l'aire tegmentale ventrale et le striatum ventral. Ce sont deux structures sous-corticales essentielles pour l'apprentissage par renforcement, l'addiction, la représentation de l'aspect motivationnel d'un stimulus et les émotions positives. Les neurones de l'aire tegmentale ventrale et du striatum ventral libèrent de la dopamine, le neurotransmetteur souvent qualifié de molécule du plaisir (mais dont la fonction n'est pas limitée à ce système).

L'électrophysiologie et l'imagerie cérébrale fonctionnelle ont révélé que l'activité dans ces régions augmente quand le sujet reçoit une récompense (surtout si elle est inattendue ou incertaine), mais s'amenuise et disparaît à mesure que sa prédictibilité s'accroît (c'est le phénomène d'habituation). À l'inverse, cette activité est inhibée lorsqu'une récompense attendue manque. Ces signaux jouent un rôle déterminant dans les processus de décision. Les neurones modulés par la dopamine dans le striatum ventral se projettent directement sur le cortex préfrontal – le cerveau qui planifie nos actions – et influent sur cette activité corticale. Par conséquent, le système dopaminergique joue un rôle important dans l'apprentissage et la prise de décision. Chez l'homme, l'IRMf a montré que diverses situations activent le striatum : l'écoute d'une musique plaisante, le visage d'une personne aimée, ou encore une décision altruiste ou charitable.

Ainsi, les émotions sont intimement liées à la prise de décision (voir le chapitre 12). La décision, processus souvent considéré comme rationnel, est en fait fondamentalement liée aux

processus affectifs. La partie orbitale du cortex préfrontal, très connectée à l'amygdale et au striatum ventral, est un acteur majeur de la prise de décision. C'est un carrefour permettant l'intégration de la valeur émotionnelle liée aux informations sensorielles qui lui parviennent. Cette zone corticale nous permet de faire des choix, car elle est sensible à la valeur relative des récompenses en jeu.

Par conséquent, le cortex orbitofrontal joue aussi un rôle important dans la régulation des affects et des conduites sociales, notamment parce qu'il anticipe les émotions associées aux différentes actions possibles. Il intervient dans la sélection de nos actions, mais aussi dans la régulation des émotions et l'inhibition de certains choix. Ainsi, les études en IRMf ont montré que cette région réagit à la perception de signaux sociaux positifs ou négatifs, tels que la colère d'autrui, la violation des normes ou encore la culpabilité. Les processus affectifs contrôlés par cette région sont indispensables au développement d'une conduite sociale adaptée au contexte.

Régulation émotionnelle

Si l'absence d'émotions est délétère pour la prise de décision et le comportement social, leur profusion... l'est tout autant. D'où l'importance des processus permettant leur régulation. D'autres aires voisines du cortex orbitofrontal participent également à ce contrôle : le cortex préfrontal ventromédian et le cortex cingulaire antérieur, qui exercent un contrôle inhibiteur direct sur l'activité de l'amygdale.

Par ailleurs, le cortex préfrontal ventromédian est relié directement à d'autres noyaux sous-corticaux, tels que la substance grise périaqueducule et l'hypothalamus, ce qui en fait un centre de contrôle de l'humeur et des réactions viscérales et motrices. Rappelons que la substance grise périaqueducule participe au contrôle de la douleur et des réactions de défense, tandis que l'hypothalamus régule le système nerveux

autonome, c'est-à-dire la faim, les fonctions respiratoire et cardiaque, le rythme circadien, la température corporelle ou encore la reproduction. De surcroît, l'hypothalamus module la libération de diverses hormones, dont le cortisol.

L'insula, étroitement connectée aux régions du système limbique, joue un rôle clé dans la représentation corticale de ces états somatiques. Par exemple, tandis que sa partie postérieure représente la qualité sensorielle d'un stimulus douloureux, sa partie antérieure est davantage liée à l'évaluation subjective de la douleur. L'insula antérieure est également activée par l'observation de la douleur d'autrui, ce qui a conduit de nombreux chercheurs à proposer un lien privilégié avec les capacités d'empathie. L'insula est aussi activée par des stimulus évoquant le dégoût ou par la vision du dégoût d'autrui. De même, la stimulation électrique de cette région provoque une réaction de dégoût prononcée du sujet et sa lésion rend le sujet incapable de reconnaître le dégoût. La fonction de l'insula reste à préciser, car elle est associée à un large spectre d'états émotionnels, y compris la tristesse.

Ce tour d'horizon des principales aires cérébrales impliquées dans le traitement des émotions soulève une question : un même système neuronal sous-tend-il toutes les émotions, ou certaines régions privilégient-elles le traitement de telle ou telle émotion ? Ces deux alternatives comportent sans doute chacune une part de vérité, mais les neuroscientifiques ne sont pas tous d'accord sur le modèle à privilégier. Certaines régions semblent davantage dédiées au traitement d'émotions particulières (par exemple, l'amygdale pour la peur, le cortex insulaire antérieur pour le dégoût), tandis que d'autres, tels le cortex orbitofrontal et le cortex cingulaire antérieur, seraient sensibles à tous les états affectifs.

Pourquoi la compréhension de ces mécanismes constitue-t-elle un enjeu important pour la recherche médicale ? La pathogenèse de nombreux troubles mentaux – dépression, schizophrénie, autisme ou anxiété – implique entre autres une

altération des fonctions émotionnelles et sociales. Quand on saura mieux décrire les circuits anatomiques, fonctionnels et neurochimiques liés à ces fonctions, on comprendra sans doute mieux comment leur dysfonctionnement entraîne des troubles psychiques, et cette description devrait être plus précise que celle fournie par l'analyse des symptômes cliniques et les observations post mortem.

Des émotions « normales » aux émotions pathogènes

Certains résultats ont déjà permis de mieux comprendre les interactions anatomo-fonctionnelles à l'œuvre dans la dépression ou les troubles anxieux. Les études d'IRMf ont révélé que le cortex préfrontal ventromédian et l'amygdale de patients déprimés sont toujours hyperactivés. Ces observations ont incité des neurochirurgiens à leur implanter des électrodes, afin de moduler l'activité de leur cortex préfrontal ventromédian : l'état des malades s'est amélioré de façon remarquable, alors qu'ils n'étaient soulagés par aucun des traitements disponibles.

L'enjeu de ces recherches est d'établir une cartographie détaillée des circuits cérébraux impliqués dans les émotions, mais aussi de mieux définir la contribution de chaque région, leur modulation par des facteurs expérimentaux ou cliniques, et leur lien avec les différences de comportement ou de personnalité entre individus. On espère identifier des marqueurs fonctionnels qui pourraient être utilisés comme aide au diagnostic, mais aussi pour le suivi thérapeutique, l'évaluation de l'efficacité des psychothérapies, ou le pronostic de l'efficacité d'un traitement pharmacologique chez tel ou tel patient.

Chapitre 14

Les émotions au cœur du cerveau

Sylvie Berthoz

Les émotions ont longtemps été les laissées-pour-compte des neurosciences cognitives. Elles étaient considérées comme trop périlleuses à étudier du fait de leur caractère tellement subjectif, ne se prêtant pas à une approche expérimentale en laboratoire, par opposition au noble domaine de recherche que constitue l'étude de la « raison ». En outre, la recherche sur les bases cérébrales des émotions a pâti de la conception cartésienne, dualiste, selon laquelle le cerveau est le siège de « l'esprit » et le corps celui des émotions, le premier étant le propre de l'homme, tandis que les émotions seraient communes à tous les mammifères.

C'est presque fortuitement que l'étude scientifique des bases neuronales des émotions chez l'homme a vu le jour. À mesure de l'avancement des connaissances sur les mécanismes cognitifs et cérébraux mis en jeu dans l'attention, la mémoire, ou encore le raisonnement, neuroscientifiques et psychologues ont progressivement constaté combien les émotions peuvent influencer sur les processus cognitifs. Ainsi, Antonio Damasio raconte à propos d'un patient dont le comportement a radicalement changé à la

suite de lésions cérébrales : « Je me suis aperçu que je m'étais beaucoup trop soucie des capacités intellectuelles d'Elliot, et des facteurs mentaux sous-tendant sa faculté de raisonnement, mais que, pour diverses raisons, j'avais complètement négligé de m'intéresser à sa réactivité émotionnelle. [...] Il était capable de raconter sa tragédie avec un détachement qui contrastait avec la gravité de ce qui lui arrivait. Il ne laissait percer aucune émotion, racontant toujours les événements comme s'il en était un spectateur non personnellement engagé et impartial. » Par la suite, A. Damasio et ses collègues ont montré que la composante émotionnelle du psychisme façonne le comportement, notamment certains processus de prise de décision.

Le cerveau émotionnel

Grâce à l'essor des techniques de neuro-imagerie non invasives, et parallèlement au développement des méthodologies expérimentales des neurosciences cognitives, l'étude des structures cérébrales impliquées dans la réponse émotionnelle a acquis ses lettres de noblesse et constitue aujourd'hui un domaine de recherche à part entière : les neurosciences des affects (*Affective Neuroscience*, en anglais). Les toutes premières études d'imagerie cérébrale fonctionnelle sur le traitement de stimulus émotionnels ont été menées chez des patients déprimés, anxieux ou victimes de lésions cérébrales. Néanmoins, il se peut qu'il n'y ait qu'un recouvrement partiel entre un état dépressif majeur et un état transitoire de tristesse, qui fait partie du vécu émotionnel du sujet en bonne santé. Ces deux états peuvent être sous-tendus par des réseaux neuraux en partie communs, quoique distincts. Ce n'est qu'en multipliant les études sur des personnes malades, d'une part, et chez le sujet sain, d'autre part, que nous avons pu progresser dans la caractérisation du réseau cérébral responsable de nos comportements émotionnels.

Aujourd'hui, on dispose d'un nombre important d'études de neuro-imagerie qui permettent de comprendre avec une

précision croissante quelles structures du cerveau nous font ressentir la peur, la joie, mais aussi des émotions plus complexes, telles que l'embarras, la culpabilité ou l'empathie. Ces études ont révélé des circuits complexes de structures interconnectées responsables de l'analyse des événements émotionnels. Mais avant tout, comment fait-on pour étudier les émotions en laboratoire ?

Pour pouvoir identifier les bases neuronales des réactions émotionnelles, il est nécessaire de les disséquer en opérations mentales élémentaires. En effet, une réaction émotionnelle comporte différents processus, notamment la formation d'une émotion, son expression, l'expérience subjective qui lui est associée et l'adaptation du comportement au contexte émotionnel. Ces différentes opérations mettent en jeu des processus de complexité croissante, au cours desquels les mécanismes de représentation mentale évoluent. C'est pourquoi émotion et cognition impliquent des systèmes cérébraux en partie communs.

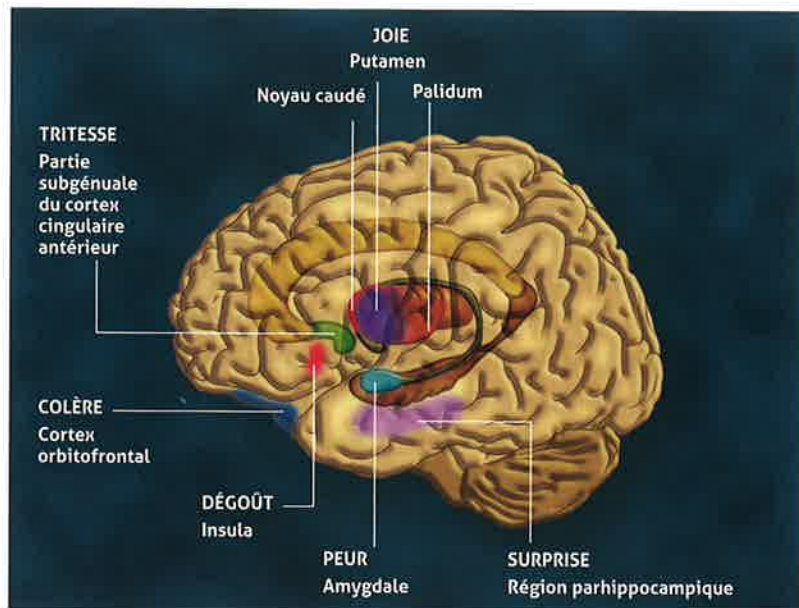
Pour étudier les émotions grâce à la neuro-imagerie fonctionnelle, on cherche à mettre en correspondance des changements transitoires d'état émotionnel avec les variations d'activité des systèmes neuronaux associés. En comparant les activités correspondant à des états émotionnels contrastés (la peur par rapport à la joie, par exemple), il est possible de quantifier et de localiser les variations d'activité. Dans cette perspective, on recourt à des modèles dits « d'activation émotionnelle ». Deux approches permettent de tester la façon dont le cerveau traite une émotion.

L'induction externe consiste à exposer le sujet à un stimulus déclenchant une émotion, qui peut être visuel (on lui présente des photos de visages exprimant des émotions, des images ou des films dont l'aspect émotionnel a été préalablement validé) ou auditif. Dans ce dernier cas, on lui fait écouter des sons émotionnels, tels des pleurs ou des rires, ou des récits émotionnels, par exemple : « Ce matin, son médecin m'a téléphoné pour m'annoncer que ma mère est atteinte d'un cancer en phase terminale » ou « Hier soir, ma femme m'a annoncé qu'elle est enceinte ».

Par opposition à l'induction externe, où l'on présente au sujet un stimulus réel, l'induction interne consiste à lui demander de se remémorer des événements personnels, des situations qu'il considère chargées affectivement. Le stimulus est alors produit mentalement, de l'intérieur. À partir de ces deux sortes d'induction, les neuroscientifiques peuvent ensuite étudier ce qui se passe dans le cerveau quand on ressent passivement une émotion, mais aussi quand on se focalise sur elle, en lui donnant une résonance affective plus profonde, en lien avec son histoire personnelle.

À chaque émotion son «centre» cérébral ?

Il importe ensuite de confronter les résultats de telles études au sein de ce qu'on nomme des méta-analyses, qui consistent à centraliser de nombreuses études consacrées par exemple à la



Une anatomie des émotions. Les grandes émotions primaires sont traitées par des centres cérébraux spécialisés.

peur, à la joie, à la tristesse. Il s'agit de comparer les résultats de ces études, et d'en extraire les résultats les plus saillants. C'est ainsi que l'on peut aujourd'hui localiser certaines régions du cerveau qui semblent plus particulièrement impliquées dans la perception de telle ou telle émotion.

En 2002, nous avons mis en correspondance les résultats d'un grand nombre d'études d'imagerie cérébrale. Nous avons ainsi mis au jour plusieurs notions importantes. Tout d'abord, il ne semble pas exister de dominance de l'hémisphère droit dans le traitement des émotions, ni une spécialisation des zones antérieures dans les émotions positives ou des zones postérieures dans les émotions négatives, ou *vice versa*. Ce constat est en désaccord avec ce qui avait été suggéré dans les modèles précédents issus de la neuropsychologie.

En revanche, les émotions primaires semblent relativement localisées dans des aires spécifiques. En ce qui concerne la joie, seule émotion positive, plus de la moitié des études confrontées révèlent des activations des noyaux gris centraux, structures nerveuses localisées dans la profondeur du cerveau, et qui régulent notamment les mouvements.

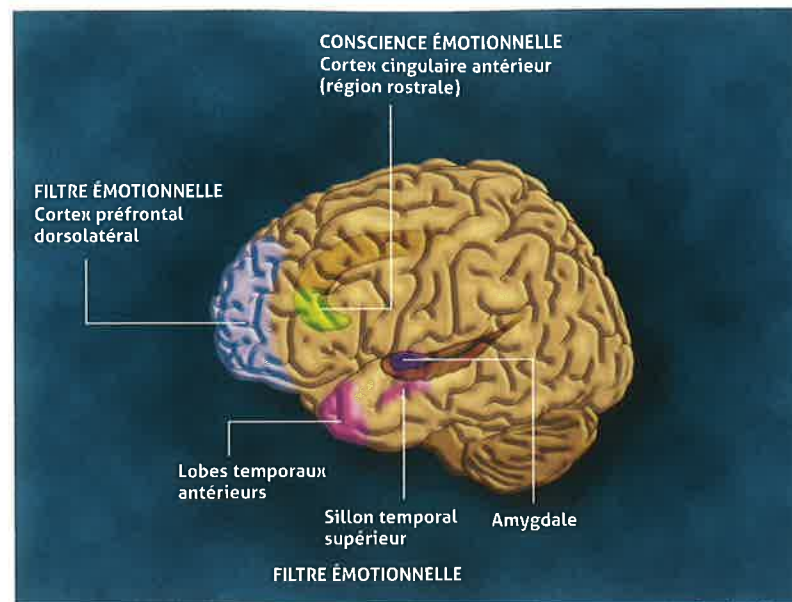
Pour les émotions négatives, il existe tout d'abord un lien étroit entre l'induction de la peur et l'activation de l'amygdale, une zone en forme d'amande, proche des noyaux gris centraux. Cette activation s'observe aussi bien lorsqu'on présente à une personne des photographies de visages exprimant la peur, que si on lui fait lire des mots effrayants, ou si elle entend des sons inquiétants. Tout se passe comme si l'amygdale fonctionnait comme un système d'alarme à l'égard des menaces potentielles, ou, plus généralement de tout signal émotionnel saillant dans l'environnement. Chez certaines personnes, il arrive que l'amygdale s'active au moment de faire une présentation en public, ou même à l'idée de cette présentation. Ces personnes souffrent de ce que l'on nomme une phobie sociale, peur d'apparaître en public. Peur, angoisse et stress sont globalement liés à l'activation de l'amygdale.

Venons-en à la tristesse: cette fois, les résultats convergent vers l'activation de l'aire dite subgéniale du cortex cingulaire antérieur. C'est également dans cette région que l'on a observé une diminution de l'activité chez des personnes déprimées. Par ailleurs, les traitements antidépresseurs en augmentent l'activité. Il y a donc une correspondance entre les activations cérébrales associées à l'induction transitoire d'un état de tristesse chez le sujet sain, et les variations d'activité observées dans les troubles de l'humeur. Enfin, bien que la colère et le dégoût aient été moins fréquemment étudiés, il semblerait que le dégoût soit particulièrement associé à l'activation de l'insula (notamment antérieure), et la colère à l'activité du cortex orbitofrontal latéral.

Quand émotion et cognition se conjuguent

Toutefois, si certaines activations cérébrales régionales semblent dépendantes de la nature de l'émotion, d'autres ne le sont pas. Ainsi, les méta-analyses ont également révélé que, quelle que soit l'émotion induite, qu'elle soit plaisante ou déplaisante, et indépendamment de la méthode d'induction (interne ou externe), une structure cérébrale située dans le lobe frontal – le cortex préfrontal dorsomédian – est systématiquement activée. Cette région cérébrale jouerait un rôle clé dans «l'intégration émotionnelle», lors de l'évaluation cognitive des caractéristiques émotionnelles des stimulus en fonction du contexte.

Ce phénomène d'intégration des émotions et de la cognition est parfois qualifié de métacognition. La métacognition est à l'œuvre dans la plupart des situations émotionnelles. C'est elle qui fait que l'on n'est pas effrayé quand on voit un animal sauvage en cage, alors qu'on le serait en l'absence de barreaux: l'évaluation (cognitive) de la situation module en partie le déclenchement de l'émotion. Il existe donc un filtre cognitif posé sur l'émotion brute, qui serait produit par le cortex préfrontal dorsomédian.



Le traitement des émotions fait intervenir des circuits de traitement élaborés. Ainsi, la profondeur avec laquelle nous savourons un ressenti émotionnel (la conscience émotionnelle) fait intervenir le cortex cingulaire antérieur. Le contexte est pris en charge par le filtre émotionnel, localisé dans le cortex préfrontal dorsolatéral: des paroles prononcées sur son lieu de travail peuvent être choquantes, mais devenir drôles dans un spectacle comique. Enfin, nous parvenons à nous représenter l'état émotionnel d'autrui grâce aux lobes temporaux antérieurs, au sillon temporal supérieur et à l'amygdale.

D'autres équipes de recherche se sont intéressées au déroulement temporel de ces processus cérébraux, c'est-à-dire à leur évolution dans le temps. Une telle analyse repose sur la méthode dite des potentiels évoqués ou magnétoencéphalographie: il s'agit de mesurer les courants magnétiques produits par les différentes zones du cerveau au cours du temps, au moyen d'électrodes posées à la surface du crâne. En 2007, des neuroscientifiques tels que Amanda Holmes et Martin Heimer, de l'Université de Roehampton en Angleterre, se sont demandé si le cerveau réagissait suivant une dynamique différente, quand on présentait à une personne des expressions faciales chargées émotionnellement ou neutres. Il a ainsi été établi

que, comparativement à des visages neutres, la perception de visages émotionnels est associée à des modifications précoces de l'activité corticale, atteignant leur maximum dès 120 millisecondes après l'apparition des visages. Ces résultats, obtenus sans qu'il soit demandé aux sujets de réaliser une évaluation consciente du contenu émotionnel des visages, suggèrent que notre cerveau réalise une analyse différentielle automatique, très précoce, des stimulus sociaux émotionnels.

En outre, Jonas Olofsson et ses collègues, de l'Université d'Umea en Suède, ont constaté que la visualisation de scènes déplaisantes suscite des ondes cérébrales plus intenses (encore nommées positivités) que les scènes plaisantes. Cela suggère que les stimulus aversifs (désagréables ou dangereux) sollicitent davantage la focalisation rapide de l'attention. Cela explique-t-il la prédominance des émotions négatives (cinq émotions négatives de base, pour une seule positive) dans le registre émotionnel humain? Dans cette perspective, les émotions négatives auraient le pouvoir de mobiliser les ressources attentionnelles pour se soustraire aux dangers, et auraient rempli tout au long de notre évolution un rôle dans notre survie...

Dans le monde de l'affect, il n'y a pas que les émotions de base. Chaque personne a sa façon bien à elle de ressentir l'émotion, de lui donner une résonance, d'en prendre conscience ou au contraire de la subir de façon distante et relativement passive. La conscience émotionnelle est l'intensité avec laquelle nous apprécions notre propre ressenti émotionnel, afin d'en évaluer les conséquences et le sens, mais aussi notre capacité à attribuer des émotions à autrui. Là encore, les études de neuro-imagerie ont permis de mieux comprendre les bases neuronales de ce phénomène. Par exemple, le psychologue américain Richard Lane a comparé les modifications de l'activité neuronale de volontaires, selon qu'ils avaient pour consigne de se concentrer sur leur propre ressenti devant des scènes émotionnelles, ou qu'on leur demandait de se concentrer sur certains aspects des mêmes scènes (l'heure indiquée par une horloge, etc.).

Lorsque les sujets devaient porter leur attention sur des aspects particuliers, la région du cortex pariéto-occipital s'activait, ce qui est logique, car on sait que cette zone intervient dans l'attention spatiale. En revanche, lorsqu'ils se concentraient sur leur propre émotion, c'est la région rostrale du cortex cingulaire antérieur, ou aire de Brodmann BA32, qui s'activait. D'autres études, notamment celles de Neil MacRae en 2008, ont confirmé le rôle particulier du cortex cingulaire antérieur dans la représentation subjective de la réponse émotionnelle. C'est cette zone du cerveau qui nous permet de prendre pleinement conscience des émotions que nous ressentons, qu'il s'agisse de la peur, de la joie ou de la tristesse...

L'émotion, un chemin vers l'autre

Honte, fierté, culpabilité... Les émotions sociales sont ressenties en présence d'un tiers, en public, ou en relation avec autrui. Plusieurs équipes ont étudié la culpabilité et l'empathie. Elles ont examiné quelles structures cérébrales sont sollicitées quand on demande, par exemple, à un sujet de se représenter ce qu'une autre personne éprouve dans une situation donnée. Certes, il n'est pas facile d'étudier une réaction empathique dans un environnement expérimental souvent éloigné des conditions de vie réelles. Mais certaines techniques permettent de reproduire assez fidèlement les processus empathiques spontanés, par exemple en demandant à des volontaires de lire la consigne suivante: « Imaginez que vous êtes assis à côté de quelqu'un d'inconnu sur un banc dans un parc, et que vous réalisez que cette personne pleure. Représentez-vous pourquoi cette personne pleure. Racontez. » De fait, une telle consigne fait appel à des mécanismes proches de ceux auxquels recourent les cliniciens pour prendre en charge des patients souffrant de troubles psychiatriques.

Dans l'ensemble, les études des mécanismes de l'empathie ont montré qu'en plus de structures préalablement associées aux émotions primaires (dont le cortex cingulaire antérieur, le

cortex orbitofrontal et l'insula), le circuit neural de la «mentalisation», grâce auquel nous nous représentons l'état mental d'autrui, est activé et notamment le cortex préfrontal, le sillon temporal supérieur, les portions antérieures des lobes temporaux et l'amygdale. L'orchestration de ces zones cérébrales est altérée dans certains troubles psychiatriques, comme nous l'avons montré avec Julie Grèzes, directeur de recherche à l'INSERM, dans le cas de l'autisme.

Abordons la question de la régulation émotionnelle : que se passe-t-il dans votre cerveau pour qu'en quelques secondes vous réalisiez en voyant un matin la mine défaite de votre meilleur ami que ce n'est pas le moment de lui annoncer que vous avez gagné au loto ? Cette question a été abordée avec succès grâce à une nouvelle méthode d'analyse du fonctionnement cérébral : l'analyse de connectivité fonctionnelle. De quoi s'agit-il ? Lorsqu'une personne réalise une tâche mentale, ou ressent des émotions en lisant un texte ou en regardant des images, les scanners enregistrent l'activité de différentes zones cérébrales. La connectivité fonctionnelle consiste à observer quelles zones sont activées et les liens entre elles : pour ce faire, on examine si l'augmentation de l'activité dans une zone particulière s'accompagne de l'augmentation de l'activité dans d'autres régions du cerveau. On établit ainsi des corrélations d'activités entre différents sites cérébraux, qui permettent en quelque sorte de reconstruire la façon dont le cerveau s'organise pour percevoir certaines situations, pour réguler son activité, notamment quand des émotions sont en jeu.

La régulation émotionnelle

La méthode d'analyse de connectivité fonctionnelle a permis d'établir un modèle anatomo-fonctionnel des stratégies de régulation émotionnelle, qu'elles soient volontaires ou automatiques. Ce qui signifie que l'on commence à avoir une idée des zones du cerveau qui entrent en jeu lorsque nous régulons

une émotion, qu'il s'agisse de refréner sa colère ou de tempérer sa tristesse, ainsi que de la façon dont ces différentes aires cérébrales s'activent, successivement ou simultanément, et interagissent. Le résultat de ces travaux, notamment ceux de la psychologue américaine Louise Phillips en 2008, est assez étonnant : notre capacité à produire un comportement émotionnel approprié impliquerait l'orchestration de plusieurs circuits comprenant deux grandes voies et entretenant des relations de rétrocontrôle. Il existerait ainsi, premièrement, une voie ventrale sollicitant des structures sous-corticales, telles que l'amygdale, l'insula, le striatum et l'hippocampe, ainsi que les régions ventrales du cortex préfrontal latéral et médian, du cortex cingulaire antérieur et du cortex orbitofrontal.

Cette voie serait plus particulièrement impliquée dans les processus automatiques de la régulation émotionnelle, qui œuvrent sans que nous n'en prenions conscience : c'est ce qui permet par exemple à une peur de s'estomper progressivement. Ainsi, un enfant voyant un chien pour la première fois peut avoir peur de lui, mais, petit à petit, il constate qu'il n'y a pas de danger, et sa peur est atténuée par des mécanismes internes de régulation dits automatiques.

Deuxièmement, une voie dorsale incluant à la fois les régions dorsales du cortex préfrontal (dorsolatéral et médian) et le cortex cingulaire antérieur. Cette voie serait davantage impliquée dans la régulation volontaire et contrôlée de la réponse émotionnelle et l'adaptation du comportement à la situation. C'est ce circuit cérébral qui vous permet, si un individu vous double dans une file d'attente, de ne pas l'agresser directement, mais de lui signifier poliment que vous attendiez là depuis déjà plusieurs minutes...

Les gènes en question

Mais en quoi la connaissance des zones du cerveau qui contrôlent nos réactions émotionnelles peut-elle nous aider

à mieux maîtriser nos élans affectifs? Une discipline en plein développement (même si l'on manque encore d'études pour en évaluer l'efficacité) est la régulation de sa propre activité cérébrale, ou neurofeedback. Le principe est simple: on observe l'activité de son cerveau pendant que l'on vit des émotions, et l'on s'efforce par exemple de diminuer l'activité de la zone responsable de la colère, en fixant son attention sur un écran.

Le neuroscientifique américain Christopher deCharms a ainsi montré, par des nouvelles techniques de neuro-imagerie (notamment l'imagerie fonctionnelle en temps réel, ou real time fMRI), qu'un individu peut apprendre à faire varier en direct l'activité de son cerveau, et que plus il fait diminuer l'activité de la zone du cerveau associée à une émotion (par exemple, pour la douleur, le cortex cingulaire antérieur), plus il peut atténuer le ressenti affectif associé (ici la douleur). Ainsi, des résultats particulièrement prometteurs ont été obtenus par Holger Gevensleben et ses collègues, de l'Université de Göttingen en Allemagne, chez des enfants atteints de trouble de l'attention et de l'hyperactivité: on a constaté chez les enfants ayant suivi de telles séances de régulation cérébrale une amélioration de leurs symptômes. Cette méthode de «rééducation cérébrale» est donc prometteuse, mais la mise en évidence d'un effet durable de ce type d'entraînement cérébral reste à établir.

Ainsi, des avancées dans la caractérisation des bases cérébrales de nos comportements émotionnels ont été réalisées, mais d'autres sont à venir. Actuellement, des études d'envergure sont menées chez l'adolescent pour comprendre les bases neurales de l'attachement, ou les différences interindividuelles d'affectivité. À ce propos, la rencontre avec la génétique a permis de mettre en correspondance une personnalité anxieuse avec un gène qui intervient dans le cycle de la sérotonine (un neuromédiateur clé de l'affectivité) et avec le degré de connectivité entre le cortex préfrontal et l'amygdale.

Le psychologue et neuroscientifique Turhan Canli, de l'Université Stony Brook aux États-Unis, et le psychiatre Klaus-Peter

Lesch, de l'Université de Würzburg en Allemagne, ont ainsi étudié des personnes dont certaines étaient porteuses d'une variante courte d'un gène modulant la production de sérotonine, et d'autres d'une variante longue. Ils ont constaté que les porteurs de la variante courte sont plus anxieux; en outre, leur amygdale s'active davantage à la vue de visages menaçants ou apeurés. Enfin, chez ces personnes, le couplage entre l'activation de l'amygdale et celle des régions ventrales du cortex préfrontal est plus marqué lors de la visualisation d'images déplaisantes.

De tels travaux fondamentaux montrent toute l'importance du lien entre les gènes, le fonctionnement du cerveau et des émotions telles la peur ou l'anxiété. Il est important, dès lors, de considérer les émotions comme un mélange d'une prédisposition génétique, et du fonctionnement cérébral, lui-même fruit des gènes, de l'expérience et de l'éducation... C'est certainement une des plus importantes directions de recherche pour l'avenir.