

À la découverte du cerveau d'*Homo Sapiens* : son évolution, sa construction, ses pouvoirs, ses mystères

Jean CHAZAL*

À la recherche des indicateurs du schéma évolutif du cerveau

Appliquée à la lignée *Homo Sapiens*, la paléontologie, étude du squelette fossilisé des êtres vivants disparus, est une des principales ressources utilisées pour travailler sur l'évolution de son crâne et dès lors de son contenu, le cerveau.

Un des marqueurs essentiels de cette évolution est la progression du volume de la cavité crânienne et donc du volume cérébral. Aujourd'hui, le point de repère le plus lointain est fixé à environ 3,5 millions d'années avec la découverte de Lucy (Australopithèque *Afarensis*), désignée, malgré de nombreuses controverses comme étant l'un de nos ancêtres, avec un volume crânien estimé à 350 cm³. Lucy vivait en Afrique australe dans une savane tempérée, malheureusement désertifiée par l'apparition de la vallée et des montagnes du Rift, barrant la route aux vents et aux pluies venant de l'Ouest. Astreints à des conditions de vie devenues trop difficiles, ses habitants n'ont pas eu d'autre choix que de s'adapter.

L'élévation du regard à l'horizon, aidé par le passage de la position des 4 pattes à la position érigée, l'utilisation de l'outil (*Homo Habilis*), et finalement la migration vers le nord à la recherche de contrées plus accueillantes, sont décrits comme les éléments déterminants de cette adaptation, expliquant en outre l'augmentation du volume cérébral. L'étude des crânes fossilisés nous apprend d'ailleurs qu'au cours de cette migration, le volume crânien est passé progressivement de 350 cm³ à 900 cm³, ce dernier étant défini comme celui du seuil de l'hominisation.

La migration a ainsi conduit nos ancêtres africains jusqu'à la plaque arabique, passage obligé du continent africain vers l'Eurasie, puis vers la Géorgie où les migrants ont été bloqués par les glaciations. Leur volume crânien avait alors atteint 900 cm³.

* Professeur des universités, anatomiste, neurochirurgien. Doyen honoraire de la Faculté de médecine de Clermont-Ferrand. Communication présentée à l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Clermont-Ferrand le 1^{er} mars 2017. Nous tenons à remercier Madame Françoise MARILLIA pour sa relecture bienveillante du texte.

À une époque considérée par les paléontologues comme contemporaine de l'Homme de Géorgie ou *Homo Erectus* (1 million d'années), Teilhard de Chardin et ses équipes ont découvert, plus à l'Est, l'Homme de Pékin, maîtrisant le feu et la taille d'outils, lui aussi doté d'un volume crânien parvenu au seuil de l'hominisation.

Ce seuil de l'hominisation, fixé à un volume crânien de 900 cm³, a fait l'objet de nombreux débats. L'argument essentiel pour le valider est qu'il n'existe aucun animal, aucun mammifère dont le volume cérébral maximum ou le quotient d'encéphalisation (volume du cerveau rapporté au poids) pour les mammifères de poids égal ou supérieur à celui de l'homme, est comparable à celui de l'Homme de Pékin ou de l'Homme de Géorgie.

Le volume crânien moyen de l'Homme d'aujourd'hui est de 1200 à 1300 cm³ (minimum fixé à 900 cm³ et maximum à 1500 cm³), et il demeure de grandes interrogations sur sa progression. En effet, des crânes d'un volume considérable, jusqu'à 1700 cm³, datés de 80 000 à 100 000 ans ont été découverts en Europe centrale et occidentale et identifiés comme étant ceux de nos ancêtres les plus directs, l'Homme de Cro-Magnon (*Homo Sapiens*) et de l'Homme de Néandertal, dont nous partageons une partie du patrimoine génétique.

La régression observée ces 80 000 dernières années de 1700 cm³ à 1200-1300 cm³, est interprétée logiquement, mais sans certitude absolue, comme le résultat d'une vie plus facile, moins dépendante d'une nécessité d'adaptation permanente.

Ce schéma évolutif est en réalité plus complexe. Des travaux récents permettent en effet d'évoquer la coexistence, à certaines époques, de plusieurs espèces, différentes pour certaines par leurs données génétiques, et pour d'autres par leurs caractéristiques anatomiques (particulièrement leur taille et leur volume crânien).

Ainsi, en 2008, dans le domaine de la génétique, la comparaison des ADN de Cro-Magnon et de Néandertal ainsi que ceux d'une phalange et de dents provenant d'hominidés contemporains (famille de primates à laquelle nous appartenons), datant de 40 000 ans, découverts dans la grotte de Denisova (massif de l'Altai en Sibérie), s'est révélée significativement différente. De même, en 2003, dans le domaine de l'anatomie, la découverte sur l'île de Flores, près de Bali dans le Sud-Est asiatique, de squelettes fossilisés d'hommes de très petite taille (1m environ), dotés d'un massif facial comparable à celui d'*Homo Sapiens*, avec une capacité crânienne de 350 cm³, datant de 80 000 ans, établissaient des différences majeures avec Cro-Magnon et Néandertal, contemporains, et pourtant d'une taille moyenne de 1m70 avec un volume crânien de 1700 cm³.

Ainsi, l'évolution linéaire longtemps admise, issue d'un tronc commun divisé en 2 branches, celle des grands singes et celle de l'espèce *Homo Sapiens*, avec pour cette dernière une seule filiation passant par Cro-Magnon, est largement remise en question. La théorie de l'arbuste aux multiples branches, parmi lesquelles ont été identifiées en l'état actuel de nos connaissances, l'Homme de Flores, de Denisova, de Cro-Magnon et de Néandertal paraît plus vraisemblable. Ces multiples branches représenteraient autant d'espèces différentes, dont une seule aurait survécu, la plus apte selon Darwin, *Homo Sapiens*, porteuse d'un patrimoine génétique issu de Cro-Magnon et de Néandertal, pourtant considérés comme appartenant à deux espèces différentes et néanmoins interfécondes.

Au-delà de ces critères anatomiques et génétiques, le taux d'innovation culturelle constitue aussi un des marqueurs essentiels de notre évolution.

La découverte du feu et sa maîtrise sont considérées comme des étapes essentielles, avec une datation très approximative, de 1 million d'années à 400 000 ans, et une maîtrise qui aurait demandé, quant à elle, entre 100 000 et 150 000 ans. Dans ce contexte de grande imprécision, il est remarquable de constater qu'à cette période de l'évolution, étendue sur plus de 500 000 ans, le volume des crânes fossilisés mis à jour avait déjà atteint le seuil de l'hominisation.

Mais, la progression du taux d'innovation culturelle est difficile à expliquer par le simple fait d'être pourvu d'un gros cerveau. En effet, le squelette crânien découvert en 2017 au Maroc avec le volume et les empreintes du cerveau de l'Homme moderne, *Homo Sapiens*, tel qu'on le connaît aujourd'hui, date de 300 000 ans. La même année 2017, la découverte dans une grotte d'Afrique du sud de poudres de végétaux « fossilisés » a conduit un groupe de chercheurs de différentes nationalités (Afrique du sud, France, Italie, Belgique, Argentine) à publier très récemment, en 2020, une étude montrant que les habitants de la grotte avaient déjà été capables de construire, il y a 200 000 ans, c'est-à-dire beaucoup plus tard, des literies douillettes constituées de matelas complexes de végétaux et de cendres.

L'histoire nous apprend enfin que l'habitat et les sépultures ne sont apparus que 50 000 à 100 000 ans plus tard, il y a donc 150 000 à 100 000 ans, alors que l'agriculture et l'élevage d'animaux domestiques datent seulement de 12 000 ans.

Beaucoup estiment aujourd'hui que les bonds en avant les plus significatifs de l'humanité résultent de la capacité d'*Homo Sapiens* à partager les connaissances et les compétences d'autrui. La construction de villages, de villes et de métropoles, il y a moins de 10 000 ans, s'expliquant par l'augmentation significative du nombre d'êtres humains, a été le véritable point de départ de ce partage. L'instauration

d'une communication permanente entre des individus de plus en plus nombreux a permis la promotion d'une expérience et finalement d'une intelligence collective qui s'est ensuite renforcée au fil des générations.

Des organisations sociétales se sont mises en place, avec des solutions toujours plus nombreuses et diversifiées, allant jusqu'à justifier, pour les rendre efficaces, le déploiement de règles de vie et de lois dont le 1er recueil, le code d'Hammurabi, a été écrit en 1750 av. J.-C. en Mésopotamie.

Des révolutions culturelles telles que la Renaissance au ^{xiv}^e et au ^{xv}^e siècles et de véritables exploits techniques tels que l'industrialisation et la maîtrise de l'électricité au ^{xix}^e siècle ont jalonné notre parcours. Les guerres, les famines, les épidémies, les chocs climatiques, les catastrophes naturelles ou provoquées par l'homme lui-même, sont regardés autant comme des épreuves sollicitant les capacités inventives des communautés humaines, que comme des événements freinateurs.

En l'espace de 120 ans (de 1900 à 2020), parallèlement à l'augmentation considérable du nombre d'habitants sur la terre, passé de 1,7 milliard à plus de 7,6 milliards, les progrès immenses de la médecine, de la biologie et de la génétique ont allongé très significativement la durée de vie des êtres humains. Dans le même temps, très court, la maîtrise du moteur thermique, le développement de l'automobile et de l'aviation, l'invention des ordinateurs et finalement le déploiement incroyablement rapide de la communication (téléphone portable, internet), ont réduit la planète à un espace parfaitement limité et totalement accessible.

Dans ce contexte, d'autres évolutions sociétales se sont évidemment produites, particulièrement entre l'homme et la femme. Le partage des tâches a connu différentes époques. Il y a 150 000 ans, l'homme, musclé, chassait et la femme gardait les petits. Avec l'apparition de l'agriculture et de l'élevage, datant de 12 000 ans, les hommes allaient aux champs, les femmes veillaient sur la progéniture et s'occupaient des petits animaux. Au moment de l'industrialisation, les hommes travaillaient dans les mines et les hauts-fourneaux, les femmes dans les filatures ou les coutelleries, mais avec des salaires inférieurs.

Au ^{xx}^e siècle, l'idée de l'égalité est apparue avec l'instauration pour les femmes du droit de vote, de l'accès à la formation, à l'université et aux grandes écoles. La création des crèches et la promotion de l'allaitement artificiel ont par ailleurs contribué au développement de l'activité des femmes quel qu'en soit le domaine, privé ou professionnel. Le suffrage universel, l'abolition de la peine de mort, l'avortement, le mariage pour tous, la procréation médicalement assistée sont

autant d'évolutions sociétales, résultant de réflexions communes, de discussions et de décisions issues de débats démocratiques.

L'histoire de notre cerveau nous apprend donc que ses capacités d'évolution et d'innovation ne dépendent pas que de sa grosseur, de son intelligence et de son langage, mais aussi de son aptitude à communiquer et à mettre en commun les expériences et les capacités d'autrui. Si bien que certains vont jusqu'à suggérer que les rôles se sont inversés, l'innovation culturelle devenant au fil du temps le moteur des progrès et de l'évolution du cerveau.

Parallèlement à ce que l'on sait de son histoire, l'étude de la construction du cerveau du tout début de la vie jusqu'à son terme, c'est-à-dire de la conception jusqu'à la mort, nous aident à mieux le connaître et à comprendre qu'il est le centre et le régulateur de toute notre vie, que ce soit la vie relationnelle avec le monde extérieur, ou la vie intérieure avec notre système viscéral.

Un génome constructeur et une épigénétique au service d'une perpétuelle structuration

La communauté scientifique évolutionniste s'accorde aujourd'hui pour admettre que depuis le reptile, l'évolution vers l'Homme s'est produite sans véritable continuum régulier.

Dans les années 1950-1960, MacLean, neurobiologiste américain, a modélisé le résultat final qui serait un cerveau de construction modulaire, « triunique », constitué de trois structures essentielles :

- l'archéocerveau, le plus ancien, ou cerveau reptilien, celui de l'instinct et de la préservation de l'espèce (alimentation, reproduction) ;
- le paléo cerveau, apparu avec les premiers mammifères, celui de la mémoire en relation étroite avec la fonction olfactive, celui des émotions et de l'affectivité ;
- le néocerveau, le plus récent, datant de 3,5 millions d'années, celui qui recouvre l'ensemble archéo-paléo cerveau, comme un manteau, le cortex, ou cerveau de la cognition, du raisonnement et du langage.

Ce concept de cerveau « triunique », comparable à l'empilement dans le temps de trois couches géologiques différentes, est considéré par certains neuroscientifiques sinon comme une imposture, du moins comme une simplification à l'extrême.

Les trois cerveaux ainsi décrits forment en réalité un ensemble, théâtre d'interdépendances et d'interactions permanentes, parcouru par un réseau d'une extrême complexité, sans frontières. La théorie de périodes de « céphalisations »

successives n'est cependant pas exclue, les bases fonctionnelles restant l'instinct et la préservation de l'espèce, la mémoire, l'émotion et l'affectif, la cognition, le raisonnement, le langage et la prise de décision.

Au moment de la conception, le cerveau de l'être humain contemporain se construit sur les bases dictées par le génome de notre espèce *Homo Sapiens*, considérée aujourd'hui comme unique. Dans le premier mois de la vie embryonnaire, l'embryon est de sexe indifférencié y compris son cerveau. Par la suite, aux environs de la 6^{ème} semaine, en l'absence du gène SRY (Sexe determining Region on the Y chromosome, découvert en 1990), l'embryon devient féminin. Chez le garçon, le chromosome Y contrôle la différenciation du tissu gonadique en testicules qui vont sécréter la testostérone. Cette hormone masculinise les organes sexuels et se fixe dans le cerveau sur des récepteurs spécifiques, situés essentiellement dans trois régions distinctes, l'hypothalamus, l'amygdale temporale et le cortex préfrontal, dont on sait qu'elles supervisent la vie comportementale, y compris le faim et la reproduction. Ainsi se met en place «l'effet organisateur et régulateur» de la testostérone sur le cerveau embryonnaire masculin.

Chez la fille, le tissu gonadique se différencie en ovaires, sécrétant les œstrogènes, proches chimiquement de la testostérone, et dont les effets masculinisants sont inhibés par des processus enzymatiques complexes. Les œstrogènes assurent le développement, le maintien et le fonctionnement des organes génitaux et des seins, alors que la progestérone a un rôle plus spécifique : sécrétée par le corps jaune de l'ovaire après l'ovulation chez l'adolescente et la femme, son rôle est de préparer la conception et la grossesse. Ces hormones féminines, comme la testostérone chez le garçon, ont un effet organisateur et régulateur du cerveau féminin.

Leurs mécanismes d'action sont d'une grande complexité, les régions impliquées étant plus diffuses, impliquant comme chez l'homme l'hypothalamus, mais aussi au-delà du cortex préfrontal et de l'amygdale (dont le rôle chez la femme est moins bien connu), l'hippocampe situé dans la région temporale interne, très impliqué dans les processus de mémorisation.

Ainsi, il semble que les différences entre individus et particulièrement entre le cerveau de chacun des deux sexes ne soient pas inscrites dans les gènes assurant spécifiquement la construction initiale du cerveau, mais qu'elles résultent d'une restructuration secondaire des circuits neuronaux sous une influence hormonale, dont le développement est par contre génétiquement déterminé.

Au terme de sa formation et de son développement jusqu'à la naissance, le tissu cérébral d'*Homo Sapiens* est une structure d'une extrême complexité composée de deux types de cellules, les neurones et les cellules gliales.

Les neurones au nombre de cent milliards, sont organisés en un réseau extrêmement dense, assurant les différentes fonctions cérébrales, des plus simples aux plus complexes, qu'il s'agisse de la vie relationnelle avec le monde extérieur (sensibilité, sensorialité, motricité, langage, mémoire, raisonnement, comportement, affectivité, prise de décision...), ou de la vie viscérale et végétative correspondant au fonctionnement de chacun de nos viscères, aucun d'eux n'échappant au contrôle cérébral et à sa régulation.

Les neurones comportent des corps cellulaires, regroupés en centres qui constituent la substance grise cérébrale, ainsi dénommée en raison de sa grande densité et de la richesse de sa vascularisation. Ces centres, qui regroupent les corps cellulaires neuronaux, sont reliés entre eux par des prolongements courts, les dendrites, au sein d'un même centre, ou par des prolongements longs, les axones, d'un centre à un ou plusieurs autres distants. Ces voies de communication entre les centres constituent la substance blanche, parfaitement distincte de la substance grise, les axones étant au terme de leur maturation entourée d'une gaine (la myéline) de couleur blanche.

Le nombre d'interconnexions possibles pour chaque neurone est considérable. Estimé à dix mille en moyenne pour chacun d'eux, un million de milliards d'interconnexions pourrait ainsi se construire.

Les cellules gliales, de trois types (les astrocytes, les oligodendrocytes et la microglie) composent le tissu dit de soutien, ou glie signifiant «glue» en grec. Plus qu'un tissu de soutien, c'est en réalité un environnement indispensable au fonctionnement du réseau neuronal, par son rôle protecteur, nourricier et régulateur.

Le nombre estimé de cellules formant le tissu cérébral est variable d'une publication à l'autre. Des écarts de 20 à 40 % pour le nombre de cellules neuronales sont observés et les cellules gliales semblent être 5 à 10 fois plus nombreuses que les neurones. Des réactualisations sont publiées régulièrement, et à l'échelle d'un demi-siècle, les progrès dans le domaine des neurosciences ont fait passer l'estimation du nombre de cellules neuronales de cinq à cent milliards !

La construction du réseau neuronal et donc l'apparition des interconnexions seraient déterminées par un programme génétique propre à chaque individu, de la période fœtale jusqu'à l'âge de 11 ans environ. Ces interconnexions se construisent, se modifient, voire se détruisent durant toute cette période, et au-delà, jusqu'à la fin de la vie, par l'influence et les stimulations de l'environnement.

Ainsi, si la biologie et la génétique décident en partie de notre destin, un consensus est apparu sur l'influence fondamentale du contexte sur le

développement et l'avenir de l'être humain. Tous les domaines sont concernés, celui de l'affectif, de la santé, de l'éducation, du projet professionnel, des activités de loisirs et sportives... avec une période de plus grande vulnérabilité, celles des 1 000 premiers jours. Cette période, comprise entre le 4^{ème} mois de grossesse et l'âge de 2 ans a été mise en avant par le ministère actuel des Solidarités et de la Santé, avec l'appui d'une commission d'experts, dont les compétences, le plus souvent de haut niveau universitaire, relèvent du domaine de la néonatalogie, de la pédiatrie, des sciences cognitives et de l'organisation cérébrale du nourrisson, de la gynécologie-obstétrique, de la psychiatrie, de la psychologie, de l'éducation, de l'accompagnement, de l'adoption.

Depuis près de 20 ans, des IRM réalisées chez des nouveau-nés par des équipes japonaises, ont montré que la naissance doit être considérée comme un traumatisme important, en raison notamment de la découverte d'hémorragies intracrâniennes, le plus souvent développées à la surface du cerveau, particulièrement chez le prématuré. Leur fréquence est encore mal connue mais pourrait concerner 50 % des naissances pour certains pédiatres. Considérées comme bénignes et sans suites dans la majorité des cas, leurs conséquences sont en réalité incertaines à long terme mais pourraient expliquer les difficultés ultérieures de développement, tels que le retard à l'acquisition de la marche, du langage ou les difficultés scolaires.

Dans ce contexte, au sein d'une population de prématurés, choisis pour leur fragilité et l'importance de leur maturation en cours, des équipes suédoises ont montré en 2015 que l'allaitement maternel et le contact «peau à peau» avec les parents jouaient un rôle déterminant dans la maturation de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien, indispensable au contrôle du stress et plus globalement de l'équilibre biologique, humoral et viscéral de l'enfant.

Chez le nouveau-né, comme chez l'enfant, l'adolescent et l'adulte, le milieu intérieur ou viscéral est le siège de variations physiologiques incessantes, en même temps qu'il est exposé à des troubles de son fonctionnement. Par un mécanisme de «feed-back» et donc d'interdépendance, le cerveau est informé et intervient en permanence dans le contrôle de ces phénomènes, à la condition qu'il ait pu acquérir une maturité suffisante dans le domaine concerné.

Ainsi, on peut considérer que le développement de chaque être humain, ainsi que les différences observées entre les individus et les deux sexes sont les conséquences de la structuration des circuits neuronaux par l'influence du milieu biologique et particulièrement hormonal, du contexte de vie, de l'éducation et des expériences vécues, à partir d'un socle commun, le génome *Homo Sapiens*, présidant en début de période embryonnaire à la construction d'un cerveau initial «indifférencié». Les variations inter-individuelles comme les variations

intra-individuelles, chez un même individu selon les périodes de sa vie, illustrent les capacités du cerveau humain à se modifier et à évoluer, indépendamment de son génome constructeur, en fonction de l'expérience vécue et de l'apprentissage quel que soit son époque dans l'histoire de l'humanité.

Ainsi apparaît le concept de l'épigénétique dont on reconnaît aujourd'hui toute l'importance dans le développement de l'être humain et donc du cerveau.

Les progrès constants de la connaissance des différentes fonctions cérébrales, sources de nouvelles interrogations

La connaissance du cerveau a été longtemps entravée par des barrières philosophiques, politiques, religieuses, sociologiques, scientifiques et techniques.

350 ans av. J.-C., Aristote faisait du cœur le siège de l'esprit. Cette idée a survécu dans certains milieux pratiquement jusqu'au Moyen Âge, malgré des travaux antérieurs de grands médecins comme Avicenne qui, au début des années 1000, a pratiqué les premières ponctions lombaires pour établir le diagnostic de méningite ou d'encéphalite, donnant ainsi naissance à une spécialité médicale, la neurologie.

Dans le domaine de l'anatomie descriptive, de véritables avancées ont été accomplies à la fin des années 1400 par Michel-Ange et Léonard de Vinci, à la lumière semble-t-il (les documents de l'époque authentifiés manquent ou sont difficilement accessibles) d'autopsies réalisées avec la complicité du clergé qui tolérait ces «pratiques», à la condition qu'elles aient lieu la nuit et discrètement.

Au début du XIX^e siècle, Gall, anatomiste allemand, a établi une sorte de cartographie fonctionnelle du cerveau en montrant des bosses à la surface du crâne, chacune d'elles pouvant correspondre à une activité précise. C'est ainsi qu'étaient identifiées la bosse des mathématiques, la bosse de l'émotion, ou la bosse de la mémoire. À partir d'observations cliniques, Gall affirmait : «celui-ci a reçu un coup sur la tête et il a perdu la mémoire, car c'est la bosse de la mémoire qui a été frappée».

En 1860, Broca neurologue à la Pitié Salpêtrière, pratiquait l'autopsie de l'un de ses patients atteint de troubles du langage, et après avoir trouvé une lésion cérébrale au contour précis, définissait le centre cérébral du langage moteur ou d'expression, dénommée «aire de Broca».

Par la suite, dans la première moitié du XX^e siècle, Brodman a établi, à partir de travaux anatomiques et électro physiologiques rigoureux, une véritable cartographie fonctionnelle du cerveau.

Ce neurophysiologiste allemand a ainsi décrit des surfaces ou aires sensibles et sensorielles (tact, vision, audition, olfaction, gustation) et des aires motrices. Entre celles-ci, s'interposent des aires associatives, plus complexes, qui schématiquement sont chargées d'établir une relation et une coordination entre le système sensitif et moteur. Chacune des aires ainsi définies a reçu un numéro (52 au total) correspondant à une fonction propre, avec une localisation précise, invariable et identique pour tous les individus.

Ainsi, «l'aire de Broca» a été divisée en deux, numérotée 44 et 45, dédiées au langage moteur et localisées dans la région frontale postérieure et inférieure. Les aires 41 et 42 représentent le cortex auditif et sont situées dans chacun des lobes temporaux. Elles sont contiguës à l'aire 22, découverte à la suite de Broca par le neurologue allemand Wernicke à la fin du XIX^e siècle, et dédiée au langage sensitif ou de compréhension.

Pendant des décennies, il a été admis que le langage, sous ses deux aspects, sensitif (réception et compréhension) et moteur (expression) était la spécialité exclusive de l'hémisphère gauche (hémisphère dominant) du droitier et de l'hémisphère droit (devenant alors dominant) du gaucher, en précisant que les aires du langage sensitif sont accolées aux aires auditives, comme d'ailleurs les aires du langage moteur sont accolées à celles de l'appareil de la phonation (cavité buccale, larynx, pharynx).

Les aires 1, 2 et 3 représentent le cortex somato-sensoriel, situé dans la région pariétale antérieure ; elles reçoivent et traitent toutes les informations sensibles (tact, température, douleurs, taille, forme, position...) en provenance de la surface du corps et des structures sous-jacentes. On parle ainsi de sensibilité superficielle ou extéroceptive, et profonde ou proprioceptive.

Les aires 4 et 6 correspondent au cortex moteur, situé dans la région frontale postérieure, juste en avant du cortex somato-sensoriel précité. Elles sont chargées respectivement de l'exécution du mouvement, et de la planification des mouvements complexes et de leur coordination.

Les différentes parties de notre corps, y compris le revêtement cutané, s'intègrent par ailleurs dans une autre forme de cartographie cérébrale, très précise, proportionnelle à la complexité de leurs fonctions. Tel est par exemple le cas de la main qui a une surface de représentation beaucoup plus étendue que celle de l'avant-bras ou du bras. Cette représentation concerne aussi chacun de nos organes. À titre d'illustration, la rétine et ses quatre champs de vision (nasal supérieur et inférieur, temporal supérieur et inférieur), comme la cochlée, organe récepteur de l'audition, ont une représentation d'une extrême précision

dans le cortex visuel et auditif, mais aussi dans l'ensemble du réseau véhiculant les informations en provenance de la périphérie c'est-à-dire des récepteurs visuels (la rétine) ou auditifs (la cochlée).

Cette organisation ajoutée à la représentation cérébrale d'un hémicorps dans l'hémisphère controlatéral (hémi-visage droit, membres supérieur et inférieur droits dans l'hémisphère gauche et inversement) est dénommée la somatotopie. Une lésion dans l'hémisphère gauche, touchant la représentation corticale motrice de la main droite se complique donc d'une paralysie de celle-ci, la même conséquence étant observée si la lésion atteint la partie des voies motrices ou des centres relais dédiés à cette même main.

Toutes les aires corticales sensibles, motrices et associatives sont en interaction permanente entre elles et avec d'autres structures nerveuses, comme le cervelet et les noyaux gris, dit centraux en raison de leur localisation profonde et également nommés ganglions de la base (thalamus, noyau lenticulaire, noyau caudé, noyaux du tronc cérébral...). Le rôle de ces différentes structures est schématiquement le tri, la sélection et la coordination des messages, qu'ils soient sensitifs cheminant de la périphérie vers le cerveau, ou moteurs cheminant du cerveau vers la périphérie, ou encore associatifs fonctionnant en boucle. Cet ensemble est parcouru par un véritable trafic neuronal qui se révèle être d'une complexité extrême.

La description de ces cartographies cérébrales a donc été la première grande étape dans la compréhension du fonctionnement du cerveau humain, avec toutefois l'adjonction d'une règle absolue, c'est que rien ne lui est possible sans informations venant de son environnement.

Les travaux scientifiques ont ainsi mis en exergue que la réalisation et le contrôle d'un acte moteur, l'expression d'une idée par le langage oral ou écrit, la construction d'un raisonnement et l'élaboration d'un concept obéissent à un enchaînement d'évènements qui surviennent toujours dans le même ordre et ce de façon quasi invariable.

Dès lors, le cerveau reçoit des informations, les analyse, les interprète, les stocke, avant de les restituer, pour éventuellement les transmettre et conceptualiser. Le stockage et la restitution sont les éléments constitutifs des processus de mémoire. La transmission est le fondement de l'éducation de l'homme par l'homme, et la conceptualisation caractérise plus que le langage l'originalité, sans équivalent, du cerveau d'*Homo Sapiens*.

Afin de documenter le rôle essentiel de l'information dans le fonctionnement cérébral, l'exemple du défaut d'acquisition du langage par un enfant atteint de surdité à la naissance peut utilement être présenté. Pour une telle expérimentation,

les voies auditives doivent être intactes, dans toutes leurs composantes, des récepteurs les plus périphériques, c'est-à-dire de l'oreille externe, jusqu'aux centres de l'audition situés dans le lobe temporal.

L'oreille externe, constituée du pavillon et du conduit auditif externe collecte, amplifie et envoie les vibrations sonores sur le tympan, derrière lequel se trouvent l'oreille moyenne et les osselets chargés de transmettre le signal acoustique à l'oreille interne. C'est à ce niveau que les cellules sensorielles de la cochlée transforment le signal vibratoire en signal électrique codé. Par l'intermédiaire du nerf acoustique branché sur la cochlée et pénétrant dans le cerveau, puis de voies et de relais totalement dédiés, le signal sonore parviendra dans chacun des lobes temporaux où se trouvent l'aire auditive primaire 41, l'aire secondaire 42 et l'aire associative 22. Schématiquement, l'aire primaire 41 reçoit directement les données du signal sonore, correspondant dans le cas présent, au langage de la mère et de l'entourage, et les transmet à l'aire secondaire contiguë 42 qui les analyse et les interprète. L'aire 22 de l'hémisphère dominant (gauche chez un droitier), située au contact des deux précédentes, est dite associative, car chargée de la compréhension du langage et de la mise en place de la mémoire du sens des mots, ou mémoire sémantique. Ces deux aires, 42 secondaire et 22 associative, sont en connexion avec de multiples autres structures par l'intermédiaire du réseau neuronal déjà évoqué, bien au-delà des lobes temporaux. Leur parfaite fonctionnalité est le préalable à la mise en œuvre de l'expression du langage oral par les aires de Broca, 44 et 45, qui bien qu'intriquées, semblent avoir chacune une fonction particulière. L'aire 44 est impliquée dans le traitement phonologique, c'est à dire l'organisation des sons de la langue maternelle ainsi que dans la production articulée, alors que l'aire 45 est plutôt chargée des aspects sémantiques.

Il en est de même pour l'apprentissage de la marche qui n'est possible que si les voies de la sensibilité superficielle (ou extéroceptive) et profonde (ou proprioceptive), sont intactes, les récepteurs se trouvant respectivement dans le revêtement cutané et dans le système ostéo-articulaire, tendineux et musculaire. Leur rôle est en effet de renseigner le cerveau et plus précisément les aires de la motricité sur les caractéristiques du support de la marche et sur la position dans l'espace du corps et des différents segments des membres et plus particulièrement des membres inférieurs.

Les deux fonctions précédemment exposées sont ancrées dans notre cerveau depuis des millénaires, comme d'autres, telles que la vision, la gustation, l'olfaction ou encore l'apprentissage et l'acquisition d'une qualification (la pêche, la chasse, l'agriculture ou plus proche de nous la pratique du vélo, de la conduite automobile ou d'un métier...).

Mais il est important de souligner que, si elles font partie du programme génétique d'*Homo Sapiens*, elles ne sont effectives que si elles sont activées, nous l'avons vu, par un système sensitif et sensoriel intact, et la présence d'un milieu favorable, dont le tout premier chaînon est le lien parental, particulièrement maternel.

Certaines de ces fonctions deviendront procédurales, automatiques et réflexes (la course, la pratique du vélo, la conduite automobile...), d'autres resteront déclaratives et feront donc appel à la restitution consciente de ce qui a été appris et à la répétition éventuelle de l'apprentissage.

Malgré les progrès considérables des neurosciences en l'espace d'un demi-siècle, ce schéma de mise en place de la construction et du fonctionnement du cerveau n'est pas remis en question. Pendant la période embryonnaire et fœtale, les neurones acquièrent des spécificités fonctionnelles - motricité, sensibilité, vision, audition, olfaction, gustation, mémoire, langage - et leurs corps cellulaires se regroupent selon un schéma génétiquement déterminé dans des zones fonctionnelles spécifiques. Ainsi, le lobe frontal est le lobe de la motricité, le lobe pariétal de la sensibilité, le lobe occipital de la vision, le lobe temporal de l'audition...

D'autres fonctions plus complexes, comme le langage, la mémoire, la vie sociale qui génère l'émotion, le comportement, le raisonnement, la prise de décision, l'affectivité... répondent à une organisation d'une complexité infinie. Les centres, les relais et plus globalement les réseaux neuronaux, supports de ces fonctions, sont difficiles à systématiser par les méthodes exploratrices actuelles, même s'il est admis que le cortex dit préfrontal (en raison de sa localisation à la partie antérieure du lobe frontal), est impliqué dans la régulation de la vie sociale.

D'autres régions sont aussi concernées mais restent encore la source de grandes interrogations, compliquées d'une part par le nombre considérable et la diversité des informations alimentant ces fonctions, et d'autre part par le mode de cheminement de ces informations, conscient ou inconscient. Le mode conscient est assez facile à définir. Il s'agit schématiquement de la réception volontaire, attentive et consciente d'informations et de leur stockage sur le même mode. Le stockage peut se faire pour le court terme ce qui constitue la mémoire de travail, dont la durée de vie est limitée. Lorsqu'il intervient éventuellement sur le long terme, il laisse dans le cerveau des traces «rappelables», comme la mémoire de travail, mais aussi potentiellement «oubliables» ou déformables. Ce mode conscient est typiquement celui de l'éducation à l'école et à l'université, de l'apprentissage et de l'acquisition d'une compétence.

Le mode inconscient a fait l'objet de nombreuses controverses, en particulier quand Freud a fait de l'inconscient un phénomène immatériel, virtuel, tout en

décrivant à son propos la survivance de sentiments éprouvés de la petite enfance, et leur impact sur le développement à long terme. Aujourd'hui, les psychiatres, les neurobiologistes et les imageurs font de l'inconscient une affaire de réseau neuronal, ce qui n'est d'ailleurs pas incompatible avec les travaux de Freud qui ont eu le mérite de pointer les premiers l'importance déterminante des événements de la vie affective de la petite enfance pour l'avenir.

En dehors des périodes de réception d'informations sur le mode conscient et de la phase de sommeil profond (pendant lequel la conscience est éteinte), notre cerveau est exposé au recueil permanent de messages venant de son environnement, qu'il s'agisse du milieu viscéral de l'organisme qu'il contrôle, ou du milieu extérieur à cet organisme. À notre insu, et c'est là le mécanisme du mode inconscient, ces messages, dont la somme au cours de toute une vie ne peut être que considérable, laissent des traces qui s'impriment dans nos circuits neuronaux.

Un des mystères non encore élucidé est le mécanisme de restitution de ces traces, éventuellement déformées ou modifiées ainsi que le processus selon lequel ces empreintes déterminent le mode de déroulement de notre vie sociale. On évoque aujourd'hui le concept d'une «assemblée de neurones» qui maintiendrait entre eux des interconnexions fortes afin de réaliser une même action, la plus adaptée, qui peut du reste entrer en compétition avec d'autres assemblées, le tout conduisant à l'émergence d'une idée par la porte étroite de la conscience.

Nous entrons toutefois là dans un nouveau mystère du fonctionnement cérébral, celui de l'inconscient, de la pensée et de l'émergence des idées. Au-delà des mécanismes mal connus, le rôle des stimulus semble essentiel. Schématiquement, ils peuvent intervenir de deux façons :

- brutalement, en mettant en jeu le cerveau de l'émotion (lobes temporaux), peu consommateur d'énergie et conduisant à une réponse rapide voire brutale et inattendue, a priori sans conséquence déterminante à long terme ;

- lentement, par des processus plus complexes, plus explicatifs, mettant en jeu le cerveau de la cognition, centré sur les lobes frontaux ainsi que l'ensemble du réseau neuronal, consommateur d'énergie, impliqué dans les mécanismes de réflexion, de raisonnement, de prise de décision voire de constitution du cerveau de l'opinion, ce dernier évoluant sans cesse du fait de sa plasticité et de la répétition des stimulus.

Des découvertes inattendues liées aux derniers progrès technologiques

Ces vingt dernières années, le bond en avant prodigieux des technologies, notamment dans le domaine de l'imagerie cérébrale, a entraîné une véritable révolution dans la compréhension du fonctionnement cérébral, avec une remise en question de données pourtant validées et utilisées par la communauté neurologique et neurochirurgicale pendant des décennies.

À cet effet, l'un des exemples le plus topique est très certainement celui de la redéfinition de la cartographie proposée par Brodman, s'agissant notamment de la localisation des aires numérotées de 1 à 52, et à un moindre degré de la spécialisation de chacune d'elle. C'est en effet l'IRM fonctionnelle qui a conduit à ces bouleversements en permettant la visualisation directe du fonctionnement du cerveau au moment même de la réception d'un message parlé ou écrit, au cours du développement d'une pensée ou de la réalisation d'une tâche, l'une et l'autre pouvant être spontanée ou imposée.

Il est ainsi apparu que les aires les plus complexes, qualifiées d'aires associatives, ont une localisation variable non seulement selon les individus mais encore, chez une même personne, selon les différentes périodes de sa vie. Parmi elles, et à titre d'exemple, il a été montré que les aires du langage, motrices 44-45 localisées jusque-là dans la partie postérieure et inférieure du lobe frontal et sensitive 22 dans le lobe temporal de l'hémisphère gauche d'un droitier (et de l'hémisphère droit d'un gaucher) peuvent avoir une représentation très à distance de la localisation pourtant considérée jusque-là comme invariable, et cela dans chacun des deux hémisphères, que le sujet soit droitier ou gaucher.

L'importance fonctionnelle et la spécialisation des aires a par ailleurs été rediscutée. Elles sont aujourd'hui considérées comme partie intégrante d'un réseau d'une très grande complexité qui constitue la véritable armature du fonctionnement cérébral, comprenant en son sein des interactions et des interdépendances multiples.

Il a ainsi été démontré que l'activité d'un réseau, quel que soit sa fonction, est indissociable de l'activité d'autres réseaux, dont le nombre et la spécificité dépendent de la nature des stimulus reçus.

Un des exemples le plus significatif est celui qui est déclenché lors du partage d'un repas gastronomique entre amis. Un véritable embrasement de multiples régions cérébrales est alors observé sur l'IRM fonctionnelle. Cette imagerie permet en effet de mettre en évidence le réseau neuronal de la fonction gustative qui entre en jeu et qui agit aussi en interaction avec le réseau de la fonction

olfactive, de la fonction visuelle, de la fonction auditive, de la fonction tactile, de la mémoire, de l'émotion, de l'affectivité... Les grands restaurants, en particulier dans notre pays où la gastronomie constitue un véritable patrimoine culturel, sont des lieux de plaisirs gustatifs, mais aussi des endroits de rencontre entre amis, entre amoureux, ou encore de négociations entre acteurs du monde économique et social. De nombreuses fonctions apparaissent ainsi en total éveil, bien au-delà de la simple gustation, jusqu'à la mise en jeu de toutes les composantes de la vie sociale.

Dans ce contexte de neurosciences en pleine évolution, de récents travaux d'importance majeure ont révélées l'existence de neurones jusque-là méconnus, les neurones miroirs. Se situant au-delà des fonctions neuronales «de base» du cerveau d'*Homo Sapiens*, ces neurones sont capables d'intervenir dans le domaine de l'apprentissage et de la performance.

Cette découverte, dans les années 1990 par une équipe de chercheurs italiens, constitue ainsi une avancée essentielle. Les applications de ces travaux sont en effet innombrables pour l'acquisition de nouvelles compétences ou le perfectionnement de celles déjà acquises, de la naissance à la fin de l'adolescence, et même au-delà, à l'âge adulte. Il est ainsi démontré que ces neurones s'activent quand un sujet effectue un acte moteur, mais aussi lorsqu'il observe un autre sujet exécuter le même geste. À titre d'illustration, le neurone miroir visuo-moteur d'un joueur de golf est activé de la même façon quand il frappe la balle lui-même avec son club, que quand il observe un autre joueur réaliser le même geste. Les travaux ont permis de démontrer que ces neurones mais aussi leurs réseaux sont spécialisés, c'est-à-dire qu'ils ne s'activent que pour un seul mouvement, par exemple la rotation du corps vers la droite avant la frappe de la balle.

L'un des aspects fondamentaux de la découverte des neurones miroirs est qu'ils s'activent lorsque le sujet exécute, observe, mais aussi lorsqu'il entend ou même imagine une action. C'est finalement tout un système de contrôle de l'action motrice et de sa compréhension qui est ainsi réalisé et qui en outre permet d'améliorer la rapidité d'exécution d'une action grâce au déclenchement, par anticipation, de l'activité des neurones chargés de réaliser l'action.

Des travaux plus récents montrent également que les réseaux de neurones miroirs sont pleinement impliqués dans les mécanismes d'empathie et de compréhension d'autrui. Ce même système s'active en effet lorsqu'une personne souffre d'une douleur, éprouve du dégoût ou simplement l'exprime.

La découverte de nouveaux réseaux neuronaux, les neurones sociaux et les neurones asociaux, constitue très certainement une autre avancée déterminante.

Jusqu'à présent, leur existence et bien évidemment leur localisation n'étaient qu'hypothétique. Mais aujourd'hui, les recherches menées chez le singe, transposables chez l'homme, révèlent que dans la plupart des cas, lorsqu'un animal réalise une tâche donnée (par exemple, le fait d'associer sur un écran une image à l'une des quatre cibles présentées aux quatre coins du même écran), des neurones distincts des neurones exécutants s'activent de manière tout à fait singulière en présence d'un congénère. Ces neurones distincts sont qualifiés de neurones «sociaux» ou facilitants, alors même qu'un autre type de neurones ne s'active qu'en l'absence de congénères, ces derniers étant ainsi qualifiés de neurones «asociaux». Il apparaît alors que plus les neurones sociaux s'activent en présence du congénère, plus le singe est performant dans la réalisation de la tâche imposée. A contrario, si les neurones sociaux s'activent en l'absence de congénères, ou si les neurones asociaux s'activent en sa présence, ce qui est rare mais possible, la performance de l'animal est plus faible.

Ces travaux confirment l'importance du contexte, particulièrement social, sur le fonctionnement du cerveau, sur ses réponses comportementales et sur ses performances. Ils montrent aussi que la localisation des neurones sociaux et asociaux et de leurs réseaux ne se limiteraient pas aux régions cérébrales réputées dévolues à la vie sociale, c'est-à-dire le cortex préfrontal, mais concerneraient l'ensemble des hémisphères affectés à la réalisation de différentes tâches, par exemple à la suite d'un stimulus visuel reçu dans le lobe occipital, ou d'un stimulus auditif reçu dans le lobe temporal.

L'imagerie statique (ou morphologique) et fonctionnelle permet de plus d'explorer et de préciser un des pouvoirs et des mystères du cerveau les plus fascinants, sa plasticité.

La plasticité est d'autant plus performante que le sujet est jeune et qu'elle est stimulée par les expériences vécues, l'apprentissage ou le développement d'une activité spécifique. L'IRM fonctionnelle a ainsi permis de mettre en évidence l'existence de cerveaux hyperspécialisés, comme celui du joueur, différent de celui du musicien, celui du pianiste, différent de celui du violoniste...

L'IRM morphologique nous apprend de plus que l'hyperspécialisation peut se concrétiser par de véritables modifications anatomiques.

Une publication récente sur l'étude morphologique du cerveau de chauffeurs de taxi londoniens, ayant exercé leur métier avant l'ère du GPS, a clairement montré une hypertrophie significative de la partie postérieure de l'hippocampe, petite région se trouvant à la face interne des lobes temporaux, impliquée dans le réseau neuronal des processus de mémorisation et de l'attention-concentration.

Cette hypertrophie est interprétée comme étant le résultat des deux années d'apprentissage auxquelles est soumis le chauffeur de taxi pour mémoriser la topographie exacte des rues londoniennes, les sens de circulation et les numéros d'adresse, cet apprentissage devant être ensuite entretenu par la pratique.

L'IRM fonctionnelle a enfin permis de démontrer que le fonctionnement du cerveau d'un même individu est variable d'une période à l'autre, en fonction des informations reçues, des modifications liées à l'âge, des représentations mentales différentes selon les époques de la vie et selon les stimulus. Un des exemples le plus cité est celui de Pascal qui a été à la fois philosophe, mathématicien et physicien, agnostique et mystique, musicien et poète, vivant en famille ou isolé.

Cette plasticité est aidée par la présence d'une réserve de neurones, nichée à la profondeur du cerveau dans la région de l'hippocampe. Ces neurones sont mobilisables par des exercices intellectuels, mais aussi capables d'apoptose, c'est-à-dire de suicide, s'ils ne sont pas mobilisés. Cette découverte tout aussi majeure a permis de mettre en évidence que le déterminisme de cette réserve est d'atténuer ou même d'éviter les effets du vieillissement, à la condition du maintien d'activités diversifiées, intellectuelles et physiques.

Dans le domaine de la pathologie et de la vie sociale, la plasticité constitue la base fondatrice des possibilités de rééducation d'un déficit, quel qu'en soit sa nature, mais aussi de réadaptation dans le contexte d'un changement de situation ou d'activité.

Là encore, l'IRM apporte la preuve de la capacité du cerveau à s'adapter dans son fonctionnement et sa morphologie en fonction du contexte. Ainsi s'il est possible d'identifier par l'imagerie le cerveau du pianiste ou celui du violoniste, il est aussi possible d'identifier le cerveau d'un individu chez qui des mains ont été greffées suite à une amputation. En effet, l'IRM fonctionnelle de l'homme amputé des deux mains et greffé ces dernières années à Lyon montrait, avant la greffe, une représentation corticale de chacune de ses deux mains de très petite surface et donc atrophique. Après la greffe et la rééducation, ces zones se sont hypertrophiées avec une surface trois à quatre fois supérieure à ce qu'elles étaient initialement. Le cerveau de cet individu a, de fait, reconnu des mains qui n'étaient pas les siennes et les a utilisées comme un outil, tout comme le pianiste, le violoniste utilise son instrument.

De la même manière, il est frappant d'observer la plasticité cérébrale générée par la reconversion du réseau neuronal visuel du lobe occipital en réseau tactile chez un sujet voyant, devenu non-voyant, et ayant fait l'acquisition du braille, au prix de performances tactiles extrêmement développées.

En définitive, la plasticité cérébrale, qui est génétiquement programmée, n'est en réalité efficace que si elle est activée par un apprentissage conscient, mais aussi par la réception inconsciente ou à notre insu d'une multitude d'informations provenant de l'environnement. En fait, cette réception inconsciente permet de nous affranchir de notre bagage génétique pour finalement construire un cerveau qui est unique, sans équivalent, puisque propre à chacun de nous.

Le rôle essentiel de la chimie dans le fonctionnement du cerveau

Le cerveau actuel d'*Homo Sapiens* est une masse organique, d'un poids moyen de 1 200 à 1 300 grammes, ne représentant que 2% de la masse corporelle, et consommant dans les conditions basales 30 % de l'énergie circulante dans l'ensemble de l'organisme.

Composé de cellules et de réseaux neuronaux en nombre quasi infini, parcouru par un signal électrique ou potentiel d'action, déclenchant la libération de neuromédiateurs ou neurotransmetteurs, nous avons vu qu'il s'agit d'une structure d'une extrême complexité, sans aucun équivalent dans le monde actuel.

Les substances chimiques sécrétées par les neurones et certaines par les cellules gliales, jouent un rôle essentiel dans la transmission des messages dans le réseau neuronal, d'un neurone à l'autre par l'intermédiaire d'une synapse. Leur nombre est estimé aujourd'hui à plus de cinquante, mais six d'entre eux sont considérés comme plus importants.

Le plus connu et le plus ancien, présent chez les premiers êtres vivants datant de 300 000 millions d'années et encore présent chez l'homme aujourd'hui, est l'acétylcholine. Les cinq autres sont la dopamine, la noradrénaline, l'acide gamma aminobutyrique ou Gaba, la sérotonine et le glutamate. Au-delà de la transmission synaptique, chacun d'eux remplit des fonctions qui lui sont spécifiques. À titre d'exemple, l'acétylcholine est chargée de la stimulation musculaire et intervient dans les réseaux neuronaux de l'apprentissage, de la mémoire, de l'attention-concentration, du passage de l'état de veille à celui de sommeil. La dopamine est considérée comme le neurotransmetteur du plaisir, de la récompense, de l'addiction, de la prise de décision, mais elle intervient aussi dans la régulation du système moteur, son manque étant un des mécanismes de la maladie de Parkinson. Il serait ici fastidieux de décrire les fonctions multiples, complexes, et intriquées de chacun des neuromédiateurs. Ils sont indispensables aux innombrables fonctions cérébrales, des plus simples comme la contraction musculaire aux plus complexes, comme la prise de décision, l'humeur, l'émotion, le plaisir ou le ressenti du stress...

En parallèle des neuromédiateurs, le cerveau produit d'autres substances chimiques, les neurohormones, également sécrétées par les neurones, mais dont le mécanisme d'action est double. L'un est comparable à celui d'un neuromédiateur avec des récepteurs cibles dans le cerveau lui-même, l'autre agit comme une hormone sur des cellules périphériques, après un passage dans le sang. Un des exemples les plus cités est celui de l'ocytocine, synthétisée par l'hypothalamus, qui agit en central dans le cerveau pour la régulation des émotions et des comportements, et à distance en périphérie sur la glande mammaire pour la lactation et la contractions des muscles lisses de l'utérus pendant l'accouchement. Dans les années 1990, les premiers travaux sur l'ocytocine ont été menés chez deux espèces de campagnols du Middle West américain, ceux des plaines aux phénotypes mâle et femelle identiques, et ceux des montagnes avec une masse corporelle plus importante chez le mâle. Les campagnols des plaines forment des couples monogames et stables, alors que les campagnols des montagnes sont volages et mauvais parents. La différence entre les deux populations est que ces derniers n'ont que très peu de récepteurs à l'ocytocine, alors que les rats des plaines en sont largement pourvus. Le blocage des récepteurs de l'ocytocine (sécrétée par le noyau accumbens cérébral et activant les récepteurs dans les conditions normales) rend cette population des plaines volage. Ainsi, chez les mammifères rongeurs, l'ocytocine a été désignée comme la neurohormone de la monogamie ! De même, il a été montré que l'ocytocine est nécessaire à un comportement maternel adapté et protecteur de la femelle vis-à-vis de ses nouveau-nés, le blocage des récepteurs aboutissant en effet à l'abandon de petits qui ne sont repris que si les récepteurs sont rétablis. L'ocytocine est alors apparue comme la neurohormone de l'amour maternel et de l'attachement.

Chez l'Homme d'aujourd'hui, l'IRM fonctionnelle a mis en évidence l'activation de certaines structures cérébrales, en particulier l'amygdale temporale et l'insula, qui constituent en fait de véritables carrefours régulateurs du fonctionnement du réseau neuronal des liens sociaux, de la peur, du sentiment d'appartenance, de l'empathie et de la générosité.

Si les travaux sur le sujet sont encore trop récents pour proposer le traitement des troubles du comportement social et de l'humeur par l'ocytocine, il est raisonnable d'attendre de la neurobiologie, c'est-à-dire de l'étude des neuromédiateurs et des neurohormones chez l'animal et chez l'Homme, de considérables progrès dans leur maîtrise, leur régulation et leur utilisation thérapeutique.

Cependant, de nombreux problèmes restent encore à résoudre, notamment celui des interactions multiples, activatrices ou inhibitrices entre ces différentes substances chimiques à tropisme cérébral.

Les perspectives limitées des cellules souches

Les cellules souches sont présentes initialement chez l'embryon. Elles ont été identifiées comme indifférenciées, mais se spécialisent progressivement pour la construction d'organes aux fonctions différentes. Encore présentes chez l'adulte dans certaines structures (moelle osseuse, foie, muscles...), elles contribuent au renouvellement naturel des tissus et à leur réparation en cas de lésions.

Les cellules souches n'existent toutefois pas dans le cerveau. La seule réserve cellulaire est en effet constituée par les neurones précédemment évoqués, qui sont situés dans la région de l'hippocampe, en attente d'être activés, et les cellules engainantes olfactives, récemment découvertes, abusivement assimilées à des cellules souches. Il s'agit en réalité de cellules situées à la profondeur de notre cerveau dans les couches sous-ventriculaires (les ventricules sont les cavités liquidiennes du cerveau contenant le liquide cérébro-spinal), capables de migrer le long du nerf olfactif (nerf transportant le signal olfactif des fosses nasales à la face interne du lobe temporal et inférieure du lobe frontal), « à rétro » pour aller dans les fosses nasales, dans la muqueuse olfactive, réparer les seuls neurones de notre cerveau situés à l'extérieur du crâne et exposés aux effets toxiques de l'environnement.

À la fin du xx^e siècle, dans le domaine de la pathologie et de la réparation du cerveau, de grands espoirs ont été fondés sur l'injection dans une région cérébrale lésée, atteinte de dysfonctionnement, de neurones embryonnaires non spécialisés et capables de se différencier dans une fonction quelle qu'elle soit (vision, tact, audition, motricité, sensibilité ...). Mais des abus ayant été commis dans la réalisation de ces études cliniques réalisées sans rigueur et sans respect des règles de l'éthique, aucun résultat crédible et scientifiquement exploitable n'est aujourd'hui validé.

Conclusion

Le cerveau de « l'Homme moderne », aujourd'hui appelé *Homo Sapiens*, existe depuis 300 000 ans dans sa forme morphologique actuelle avec un volume moyen de 1 200 à 1 300 cm³, toujours supérieur à 900 cm³, et inférieur à 1 500 cm³.

Un certain nombre de découvertes archéologiques et paléontologiques montrent cependant que la filiation, de cette époque lointaine jusqu'à nos jours, est encore la source de nombreuses incertitudes. Si le seuil de l'hominisation fixé à 900 cm³ (corrélé au quotient d'encéphalisation) n'est pas remis en question, il reste à expliquer la présence sur terre il y a 50 000 à 100 000 ans de crânes d'un volume de 1 700 cm³ ou de 350 cm³ dans des lieux de vie évoquant l'Homme

moderne en cours d'évolution. Cette découverte suggère la co-existence à certaines époques de plusieurs espèces voisines, pourvus de génomes différents, et pourtant potentiellement interfécondes. En témoigne la présence sur terre aujourd'hui d'individus porteurs de gènes de Cro-Magnon et de Néandertal, identifiés pourtant comme étant deux espèces différentes, et dont nous sommes la preuve de leur interfécondité.

Une autre interrogation à propos de notre évolution est la progression de l'autre marqueur, le taux d'innovation culturelle. Cette évolution d'une extrême lenteur pendant une période dont la durée est estimée à 290 000 ans, est ensuite caractérisée par une formidable accélération, sujet de controverses et d'interrogations, dont les réponses ne se trouvent ni dans l'augmentation de la grosseur du cerveau, ni dans une modification significative de son génome. Construit à partir du socle génétique commun d'*Homo Sapiens*, chaque cerveau est aujourd'hui unique, doué d'une grande plasticité avec des variations inter- et intra-individuelles considérables. Cette plasticité, d'autant plus performante que le sujet est jeune, est activée par l'épigénétique, c'est-à-dire l'influence du contexte, de l'environnement, particulièrement la vie en groupe et en société organisée. Ces sources d'influence et donc d'information sont devenues de plus en plus nombreuses grâce à la communication qui par ailleurs contribue à mettre l'intelligence et le savoir de chacun au service de l'intelligence collective, le véritable moteur de notre évolution. Malheureusement, et notre histoire en est jalonnée d'exemples, l'absence ou la suspension de l'intelligence de certains peut favoriser, du fait de l'hypercommunication, le développement d'une bêtise collective dont les formes d'expression sont multiples, pouvant aller de la violence à la sauvagerie jusqu'au crime, de l'agressivité jusqu'à la guerre. Mais, les plus optimistes d'entre nous concluons que la suspension de l'intelligence, consciente ou inconsciente, se termine généralement par l'ouverture d'un nouveau débat pour la réhabilitation de l'intelligence collective au service d'une évolution culturelle finalement favorable.