



Le cerveau humain et les origines du langage

► Pourquoi parlons-nous ? D'où nous vient cette faculté remarquable et unique qui fait de l'homme le « sommet de l'évolution » ? Pourquoi l'enfant acquiert-il en quelques mois des aptitudes linguistiques qui dépassent largement ce que les ordinateurs actuels les plus puissants sont capables de produire ? Autant de questions qui ont fait l'objet de débats parfois acharnés au cours du siècle qui vient de s'écouler mais n'ont pas encore trouvé de réelle réponse. Une certitude toutefois : c'est dans le cerveau humain qu'il faut chercher les clés du mystère, dans ses circonvolutions que la technologie moderne nous permet de mieux en mieux d'explorer et dans la connaissance de ses pathologies que la médecine décrit avec de plus en plus de précision. Cet article présente ainsi des éléments de réflexion autour de ces deux axes de recherche : la neuroanatomie fonctionnelle et la pathologie du développement du langage. Globalement, les données actuelles convergent pour faire du langage une aptitude complexe, profondément ancrée dans notre patrimoine génétique mais susceptible d'évoluer encore radicalement en fonction des modifications de l'environnement auquel notre cerveau sera exposé. ◀

Depuis l'apparition sur terre de l'homme moderne, *homo sapiens sapiens*, il y a environ 50 000 ans, le langage est devenu la caractéristique par excellence de l'être humain, à la fois ce qui nous différencie des animaux, même de nos plus proches cousins dans l'ordre des primates, et ce qui nous permet d'accroître sans cesse cette différence, en tant qu'instrument indispensable de l'évolution sociale et cognitive de l'espèce humaine. Pour le neurologue, le psychologue et le linguiste, le langage est un ensemble discret de symboles organisés selon plusieurs dimensions, dont la combinatoire permet un nombre suffisamment large d'entités pour fournir une étiquette à chacune des notions, concrètes ou abstraites, que l'esprit humain est capable de concevoir (c'est la fonction lexicale du langage), pour organiser ces entités entre elles selon une logique universelle (fonction syntaxique ou grammairiale) aboutissant à figurer les liens entre elles, à tisser un réseau de relations entre les mots et les concepts qu'ils représentent (fonc-

Michel Habib
Yves Joanette
André Roch Lecours

M. Habib: Assistance publique, Hôpitaux de Marseille et Laboratoire parole et langage, Cnrs ESA 6057, Marseille et Aix-en-Provence et Service de neurologie adultes, CHU Timone, boulevard Jean-Moulin, 13385 Marseille Cedex 5, France. Y. Joanette, André Roch Lecours : Institut universitaire de gériatrie de Montréal et Faculté de médecine, Université de Montréal, 4565, chemin Queen Mary, Montréal, Québec, H3W 1W5, Canada.

tion sémantique). Ainsi défini, le langage a un but principal, celui de permettre la communication entre les individus, mais il a acquis, sans doute secondairement, des propriétés plus vastes le rendant indissociable de l'intelligence humaine et de sa progression à travers les siècles.

Toutes ces caractéristiques et propriétés sont généralement mises en relation avec l'évolution du cerveau, l'organe qui a probablement subi les plus grandes modifications au cours du temps, modifications dont la plus notable se situe précisément lors de l'apparition de l'homme moderne. Que l'apparition du langage ait été la conséquence de cette modification considérable du cerveau, ou au contraire que des contraintes physiques, en particulier celles liées au développement concomitant de l'appareil phonatoire, aient été déterminantes, est encore l'objet d'un débat de spécialistes que nous ne ferons qu'effleurer ici. En revanche, nous voudrions montrer comment les connaissances sur les relations entre le cerveau et le langage, acquises au cours du siècle écoulé et tout particulièrement

au cours de ces dernières années, peuvent nous permettre de mieux comprendre les origines de cette fonction à la fois si banale et si étrange.

Le langage et le cerveau

Tout autour de la profonde scissure de Sylvius, qui coupe d'avant en arrière la face latérale de l'hémisphère gauche, se situe une zone continue de cortex qui possède la particularité d'être spécialisée dans différents aspects du langage (figure 1). Deux noms de cliniciens sont attachés à la description de cette zone du langage, Broca (1865) et Wernicke (1875), chacun des deux ayant donné son nom à la fois à un syndrome clinique et à la région du cerveau dont la destruction provoque ce syndrome.

On pense actuellement que ces deux aires, de Broca et de Wernicke, forment chacune l'épicentre d'un réseau impliqué dans le langage, dont le rôle et probablement l'origine sont différents, rôle moteur ou « pré-moteur » pour l'aire de Broca, zone éminemment récente et nettement moins développée chez le singe [1], rôle « sensoriel » et/ou sémantique pour l'aire de Wernicke, qui elle serait pré-

sente chez le singe voire chez les prosimiens [2].

Depuis les travaux initiaux ayant permis de mettre en évidence la contribution de ces deux aires cérébrales dans le langage, plusieurs autres structures corticales et sous-corticales ont été identifiées dans le contexte d'un réseau complexe tout à la fois intra- et interhémisphérique. En particulier, il a été prouvé qu'une vaste zone de l'hémisphère gauche située tout autour de l'aire du langage est constituée de modules probablement relativement autonomes permettant de relier les régions de production des mots aux différents concepts qu'ils représentent (zones dites de « médiation », [3]) (figure 1). C'est dans ce contexte que la possibilité de visualiser le cerveau en fonctionnement, à l'aide de la TEP (tomographie à émission de positons) ou de l'IRM fonctionnelle (IRMf), s'est avérée un apport précieux, confirmant pour l'essentiel les principales données acquises jusqu'alors. Ainsi, lors de tâches faisant appel à la compréhension des mots, en particulier la compréhension auditive, la zone de Wernicke est systématiquement mise en action, alors que la zone de Broca

semble très spécifiquement activée lorsque le sujet prononce mentalement un mot (par exemple lorsqu'il doit juger si deux mots comme « argent » et « volcan » riment ou non). En revanche, le processus d'articulation lui-même est plutôt sous la dépendance de la partie basse de l'aire motrice, et ce de manière bilatérale, de même que la perception auditive des mots est sous la dépendance des régions moyennes du cortex auditif, de manière également bilatérale.

Enfin, le rôle des parties de la zone du langage autres que les aires de Broca et de Wernicke elles-mêmes a pu être précisé par diverses expériences. La figure 2 résume une expérience proposée à des volontaires sains par l'équipe de J.F. Démonet (Inserm U.455, Toulouse) [3bis]. Il s'agissait de deux conditions expérimentales conçues pour être les plus comparables possible, l'une explorant les processus phonologiques, l'autre les processus sémantiques. Pour chacune de ces conditions, le sujet devait réaliser un jugement sur un mot entendu, soit quant à son contenu sonore (« appuyer sur la souris lorsque vous entendez un mot qui contient le son /b/ précédé du son /d/ dans la syllabe précédente ») ou son sens (« appuyez lorsque vous entendez le nom d'un animal de petite taille précédé d'un adjectif positif », tel que « gentille souris » mais non « aimable éléphant » ou « affreuse punaise »). Les deux types d'épreuves activaient une vaste zone hémisphérique gauche incluant les principales zones périsylvienne. Grâce à un artifice technique (appelé « soustraction cognitive »), les auteurs ont pu apporter une double information intéressante: la soustraction « sémantique – phonologique », destinée à mettre en évidence les zones plus fortement activées par la tâche sémantique, a montré plusieurs foyers situés autour de l'aire classique du langage: frontal supérieur, pariétal postérieur et temporal moyen, confirmant le rôle de ces zones « de médiation » dans l'accès au lexique et la recherche en mémoire à long terme des attributs sémantiques des mots entendus. A l'opposé, la soustraction inverse, « phonologique – sémantique », a révélé les zones plus franchement activées par la tâche phonologique,

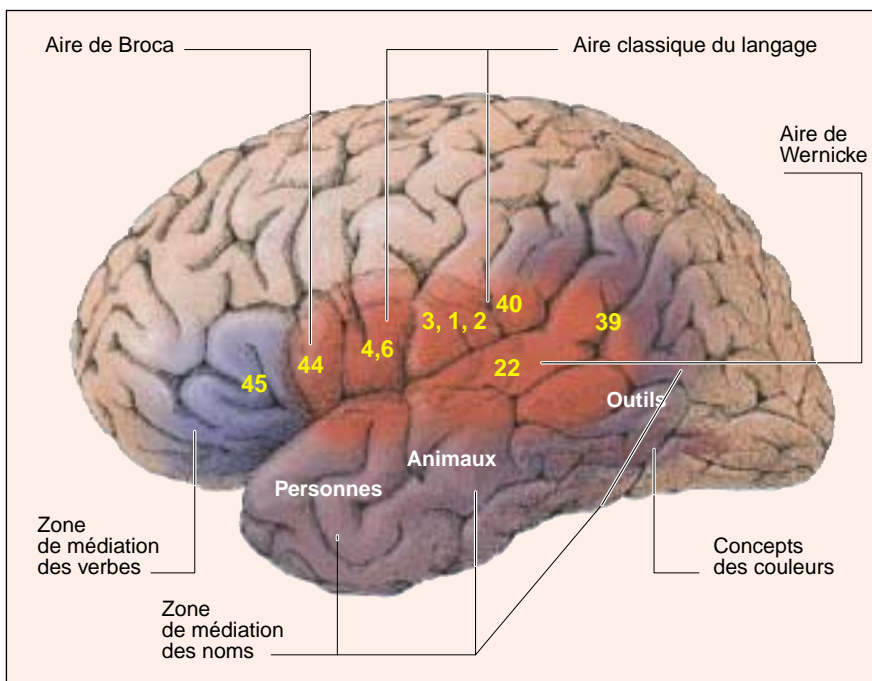


Figure 1. Schéma de l'hémisphère gauche du cerveau humain. La zone classique du langage a été indiquée (en rouge), entourée par les zones dites de médiation, comportant la représentation de différentes catégories de mots. (D'après [3].)

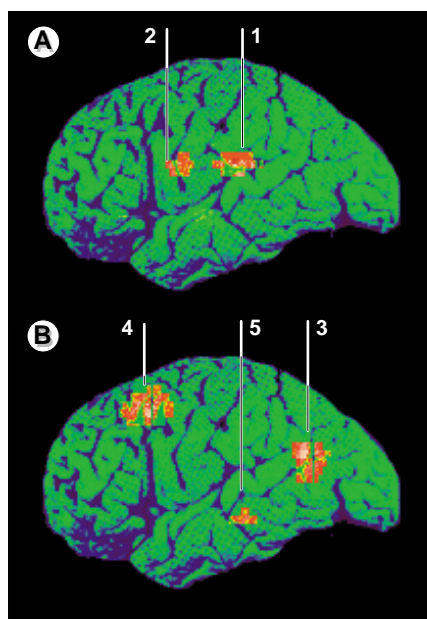


Figure 2. **L'imagerie fonctionnelle du cerveau permet d'activer séparément les parties phonologiques (A) et sémantiques (B) de l'aire cérébrale du langage** (superposition de zones activées en tomographie à positons sur la reconstitution tridimensionnelle en IRM d'un hémisphère gauche). 1: opercule pariétal; 2: cortex sensori-moteur inférieur; 3: gyrus supra-marginal; 4: cortex fronto-latéral supérieur; 5: cortex temporal latéral. (D'après [3bis].)

située à l'intérieur même de l'aire du langage, spécialement la région précentrale inférieure (aire motrice, juste en arrière de l'aire de Broca) et pariétale antérieure (opercule pariétal). Cette dernière zone est considérée comme un lieu de stockage à court terme (quelques secondes) des informations sonores afférentes aux mots qui doivent être maintenus en mémoire immédiate pour réaliser la tâche phonologique.

Asymétrie des aires du langage : un marqueur anatomique de l'évolution

Depuis la publication initiale de Geschwind et Levitsky [4], démontrant que le planum temporal est plus vaste à gauche chez environ 2/3 des individus (figure 3), de nombreux travaux ont été réalisés afin de mieux comprendre la signification et la portée de

cette constatation, en particulier de déterminer si, comme le suspectaient ces auteurs, l'asymétrie de l'aire du langage était le substrat, voire la base, de l'écrasante prépondérance de l'hémisphère gauche pour le langage. La majorité de ces études a consisté à étudier les asymétries du cortex sur des examens en IRM du cerveau de sujets volontaires et à mettre en rapport les résultats de cette analyse avec divers indices du degré de supériorité (ou de dominance) de l'hémisphère gauche pour le langage. Elles ont démontré un lien statistique avec la latéralité manuelle, prise comme témoin de la latéralisation du langage* (voir pour des revues récentes: [5-8]).

Assez curieusement, les asymétries observées dans la partie postérieure de l'aire du langage ne se retrouvent pas de façon aussi nette dans les régions antérieures, c'est-à-dire l'aire de Broca [9]. En outre, il apparaît que le planum n'est pas la seule partie de la région postérieure du langage à posséder une asymétrie fonctionnellement significative. Sur la berge opposée de la scissure sylvienne se trouve l'opercule pariétal dont l'asymétrie

* Les liens entre langage et manualité sont complexes, et ne seront pas envisagés en détail ici. Le lecteur pourra se reporter à une revue récente de cette question [47].

semble encore plus nettement liée à l'asymétrie de fonction que ne l'est celle du planum temporal [10].

Des équivalents animaux de l'aire du langage ?

Dès la fin du siècle dernier, une asymétrie de la fissure sylvienne avait été décrite sur les cerveaux des grands primates non humains, le chimpanzé, le gorille et l'orang-outang. LeMay [11], entre autres auteurs, a confirmé cette curieuse analogie entre le cerveau humain et celui d'autres primates. De telles constatations, jointes à des découvertes similaires sur des crânes fossiles vieux de plusieurs dizaines de milliers d'années, semblent témoigner d'une prédisposition évolutive à l'éclosion de systèmes latéralisés dont le langage humain serait l'aboutissement moderne.

Récemment, le débat a connu un nouveau regain d'intérêt avec la publication de deux travaux dans lesquels des mesures du planum chez des grands primates ont permis de mettre en évidence une asymétrie étrangement superposable à celle de l'homme [12, 13]. Sur 18 chimpanzés examinés, 17 présentaient ainsi une nette asymétrie en faveur du planum gauche. Les auteurs de ces travaux en concluent qu'il s'agit là d'un très probable précurseur biologique du langage humain.

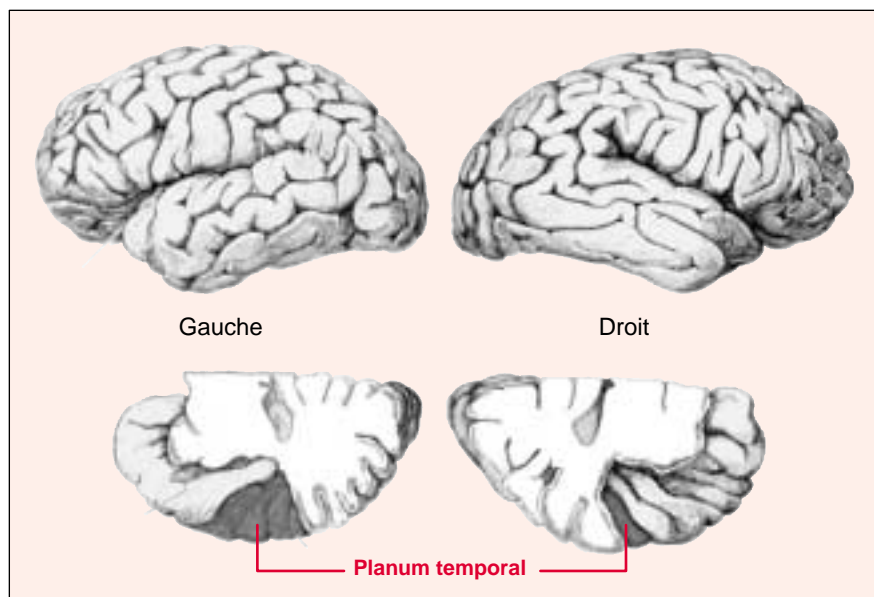


Figure 3. **Le planum temporal (partie de l'aire de Wernicke) et son asymétrie typique en faveur de l'hémisphère gauche.**

Les primates non humains sont capables de produire et de discriminer des sons ayant une fonction qui peut être considérée comme analogue à la fonction de communication humaine. Bien que de répertoire réduit, ces vocalisations possèdent des caractéristiques acoustiques qui les rendent spécifiques à une signification donnée. Il est connu, par exemple, qu'il existe chez le singe vervet, des cris d'alarme différents selon le danger qui se présente, l'un signalant la proximité d'un léopard, amenant les autres animaux à monter dans les arbres, un autre avertissant de la présence d'un aigle et incitant les congénères à regarder vers le ciel. Chez le macaque, il existe deux cris différents en fonction de la localisation temporelle d'un pic de fréquence fondamentale, l'un utilisé par les femelles en phase d'œstrus pour solliciter le mâle, l'autre qui est plus généralement un cri de recherche du contact. Peterson *et al.* [14] ont montré, en utilisant un paradigme d'écoute dichotique*, que l'hémisphère gauche (oreille droite) du macaque est supérieur dans la discrimination de ces cris. En revanche, l'oreille gauche est supérieure s'il s'agit seulement de discriminer la hauteur de deux sons sans signification sociale. Reprenant ces résultats, Heffner et Heffner [15] ont montré que seules les lésions du cortex temporal auditif gauche altéraient la capacité de discrimination des singes, et que les lésions bilatérales supprimaient définitivement cette aptitude. Enfin, chez diverses espèces, une latéralisation a été démontrée pour la discrimination de sons de parole humaine, en particulier dans des épreuves de catégorisation de syllabes s'opposant soit par leur degré de voisement (/ba-/pa/) soit par leur place d'articulation (/ba-/ga/) [16, 17].

La production de la parole : le fossé entre le singe et l'homme

Si les mécanismes perceptifs semblent donc intervenir chez le singe selon une analogie très troublante

* Le test d'écoute dichotique est une épreuve réalisée de manière courante en neuropsychologie clinique qui consiste à présenter par des écouteurs des paires de mots différents, et de demander au sujet de les répéter. L'avantage de l'oreille droite est considéré comme un témoin indirect de la dominance de l'hémisphère gauche pour le langage.

avec ceux du langage humain, en particulier de par l'implication de structures corticales latéralisées, il n'en va pas de même pour la production vocale de ces animaux. Ploog [18] a réalisé une investigation systématique des corrélats anatomiques de différents cris produits par le singe-écureuil par le biais de stimulations électriques cérébrales. Différents types de vocalisations ont pu être ainsi provoquées par la stimulation de divers sites cérébraux, mais les seuls sites capables de provoquer ces vocalisations furent retrouvés dans les régions sous-corticales et limbiques. En d'autres termes, la communication chez le singe est sous la dépendance exclusive de structures archaïques et en aucun cas de structures néocorticales comme chez l'homme. Chez l'homme, le contrôle exercé par l'aire motrice supplémentaire, en connexion avec les structures limbiques, est essentiellement constitué de productions émotionnelles et probablement une capacité résiduelle des vocalisations des autres primates. Les capacités étonnantes de compréhension du langage chez le singe Bonobo, par exemple, [19] suggèrent à certains spécialistes que les capacités de compréhension du langage auraient précédé de plusieurs millions d'années les capacités d'expression. Leurs capacités d'apprentissage de règles quasi linguistiques prouveraient pour leur part que, bien avant les premières productions vocales organisées d'*homo sapiens*, le cerveau des hominidés était prêt à appliquer certaines règles symboliques et des combinaisons élémentaires. En aucun cas, cependant, les plus érudits des singes n'atteignent les capacités de « générativité » des enfants humains même en tout début d'acquisition de la parole.

De la latéralisation à la parole : plusieurs hypothèses

Toutes ces données obtenues chez l'animal sont un support indéniable à la recherche sur la latéralisation cérébrale humaine. En particulier, à chaque fois qu'on identifie une homologie entre un comportement ou un résultat expérimental chez le primate et chez l'homme, on est autorisé à en déduire qu'un ancêtre commun à l'homme et à ce primate

devait posséder la même particularité. Par exemple, une caractéristique commune à l'homme et au chimpanzé peut être datée à environ 10 millions d'années, alors qu'une caractéristique présente aussi chez un babouin peut être datée avant 40 millions d'années. L'existence d'une préférence pour la main droite est attestée par des peintures rupestres datant de 2 à 4 millions d'années. Donc la caractéristique humaine d'un biais de population pour la main droite est déjà présente depuis plusieurs millions d'années. Qu'en est-il alors de l'apparition du langage ? Plusieurs hypothèses ont été avancées. L'une des plus populaires est celle qui fait du langage une conséquence de l'utilisation d'outils et qui stipule que la communication gestuelle préexistait à la communication par la parole. Selon Leroi-Gourhan [20], « il y a possibilité de langage à partir du moment où la préhistoire livre des outils, puisque outils et langage sont neurologiquement liés et puisque l'un et l'autre sont indissociables de la structure sociale de l'humanité ». Corballis [21] a proposé un lien entre les propriétés cognitives présidant à la manufacture d'un outil et l'utilisation du langage pour la communication. La capacité, par exemple, d'extraire un outil d'un bloc de pierre serait une propriété commune avec certains aspects grammaticaux et syntaxiques de la langue. Ce système se mettant en place avant l'apparition probable de vocalisations, volontiers considérées comme prémices du langage humain, laisse penser que la dominance gauche pour les praxies gestuelles est une caractéristique plus ancienne que le langage et a pu être à l'origine de la localisation gauche de ce dernier chez l'homme. Selon un autre point de vue, la communication par la parole et par les gestes nécessitent toutes deux une organisation séquentielle et temporelle des mouvements, et l'évolution a pu favoriser la latéralisation des deux fonctions dans un hémisphère, le gauche en l'occurrence, sans pour autant faire dériver le langage humain des vocalisations animales [22]. A cet égard, les données issues de l'étude de sujets congénitalement sourds peuvent être d'un apport précieux. En effet, le langage des signes utilisé (bien que de manière très

variable d'un milieu à un autre) par les sourds-muets est organisé dans le cerveau de manière très similaire à une langue parlée. Poizner *et al.* [23] ont montré que dans cette population spéciale, l'aphasie pour la langue des signes survenait également après une lésion de l'hémisphère gauche. De même, leur aptitude à comprendre la langue des signes pouvait être perdue alors que la signification de gestes non linguistiques était préservée [24]. Enfin, des études en champ visuel divisé chez des sourds au cerveau intact ont montré un avantage de l'hémisphère droit pour la reconnaissance de gestes non signifiants et de l'hémisphère gauche pour les signes à valeur linguistique [25]. Ainsi, la spécialisation de l'hémisphère gauche pour le langage ne serait pas spécifique à la modalité auditivo-verbale, mais existerait de manière intrinsèque

quel que soit le support utilisé pour la communication. Une étude récente en imagerie fonctionnelle [26] a cependant montré que des sujets unilingues pour la langue des signes activaient leurs aires du langage de manière différente à des sujets bilingues (sujets normo-entendants nés de parents sourds, donc ayant appris les deux langages). Les unilingues activaient de manière symétrique l'aire de Broca et le cortex auditif temporal droit et gauche, alors que les bilingues « anglais/langue des signes » activaient les deux régions temporales mais seulement l'aire de Broca gauche (*figure 4*). Ainsi, il semble que le décodage de la langue des signes chez le sourd congénital implique les zones classiques du langage, mais aussi leur contrepartie droite. En revanche, le fait d'avoir également appris un langage parlé

fait que les bilingues « anglais/langue des signes » n'activent que l'aire de Broca gauche dans la même tâche.

Le développement du langage et son substrat cérébral

L'apparition du langage chez l'enfant est sans doute l'un des phénomènes les plus fascinants qui puissent être donnés à l'observation scientifique.

L'acquisition du langage est un processus « naturel », réalisé sans effort, grâce à l'interaction entre l'enfant et son environnement, mais à l'évidence selon des étapes largement précablées et indépendantes de la nature de ces interactions. Seules de graves insuffisances de cet environnement ou des pathologies neuro-cognitives et sensori-motrices du développement peuvent entraver l'émergence de cette activité.

L'acquisition du langage se fait selon des étapes successives, commençant par le babillage, vers 6-8 mois, pour arriver progressivement vers 4 ans à une parole parfaitement intelligible et une grammaire globalement constituée de manière définitive (pour une revue détaillée, voir [27]). Le point important pour notre propos est que la chronologie de ces étapes est curieusement fixe d'un individu à un autre, et même entre des enfants de différentes langues maternelles. Tel est le cas, par exemple, du nombre et du rythme d'acquisition des mots du vocabulaire qui ont été retrouvés de façon très similaires chez des enfants de différentes langues maternelles. Il en va de même des erreurs de syntaxe qui prouvent l'universalité de l'utilisation, même encore maladroite, d'un système de règles préétablies, manifestation d'un équipement génétique puissant qui permettrait et contraindrait le développement linguistique.

Finalement, tout laisse à penser que les étapes de l'acquisition du langage correspondent à des étapes du développement des zones cérébrales qui sous-tendent ces fonctions. Diverses approches ont tenté une investigation des bases cérébrales de cette acquisition. L'une des plus célèbres est sans doute l'étude de la myélinogenèse.

Myélinogenèse, un précieux indicateur

La substance blanche qui occupe la majeure partie du volume des hémisphères

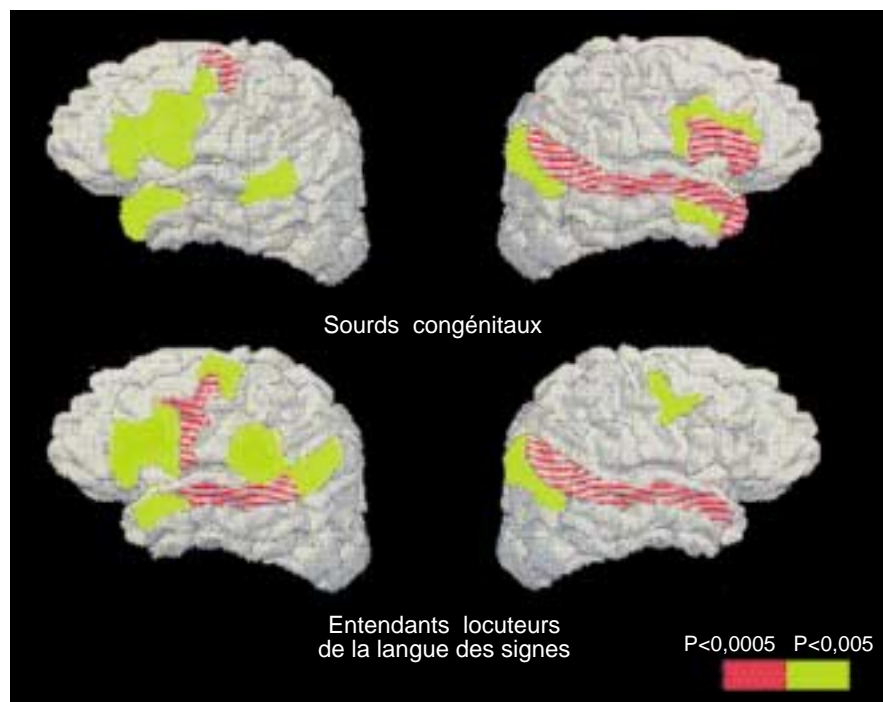


Figure 4. **Résultats d'une étude d'imagerie fonctionnelle (IRMf) comparant la compréhension du langage des signes chez des sourds congénitaux et des individus entendants bilingues (ayant appris la langue des signes pendant l'enfance).** L'aire de Broca est activée de façon bilatérale chez les premiers, mais seulement de façon unilatérale gauche chez les seconds. Ce résultat montre (1) que le langage des signes implique les mêmes zones du cerveau que le langage parlé, y compris l'aire de Broca, à laquelle on attribue traditionnellement un rôle d'articulation orale de la parole (2), que des zones hémisphériques droites sont également impliquées pour cette forme particulière de langage, et (3) que le fait d'avoir également appris un langage parlé « latéralise » à l'aire de Broca gauche les mécanismes en jeu dans le décodage de la langue des signes. (D'après [26].)

sphères cérébraux, est constituée de multiples faisceaux d'axones des neurones corticaux projetant soit vers d'autres régions corticales (faisceaux dits d'association, comme le corps calleux) soit vers des régions sous-corticales (faisceaux de projection). Au cours de leur croissance, ces axones s'entourent d'une gaine protectrice de substance grasseuse, la myéline, dont l'épaisseur est très variable d'une région à une autre et détermine, entre autres, la vitesse à laquelle s'effectue la progression de l'influx électrique dans la fibre. L'étude du développement de ces gaines, ou myélinogenèse, fournit un témoin du degré de maturation fonctionnelle des faisceaux et de leur région corticale d'origine qui a été proposé comme indicateur temporel de la mise en place des fonctions corticales. En effet, chacun de ces faisceaux possède son propre rythme de développement, réalisant un cycle myélinogénétique qui peut être apprécié grâce à des colorations spéciales effectuées sur des cerveaux de fœtus et d'enfants d'âge différent. On peut ainsi dater avec précision le moment où telle ou telle région a terminé sa myélinisation, donc commence à fonctionner de manière mature. Il est même possible d'apprécier la myélinogenèse intracorticale, c'est-à-dire de définir quand une aire corticale elle-même a terminé sa maturation.

Ce type d'études a permis à André Roch Lecours et Paul Yakovlev de tracer un véritable « indicateur horaire » du développement des différentes zones potentiellement impliquées dans le langage et de les mettre en relations avec les étapes du développement du langage chez l'enfant. La *figure 5* résume les résultats de ces recherches. Les régions dont le développement est le plus précoce sont sans conteste les régions sous-corticales, c'est-à-dire les noyaux du tronc cérébral et les noyaux gris centraux. En ce qui concerne le langage, on remarque la précocité de la maturation des fibres auditives sous-thalamiques, c'est-à-dire de la portion sous-corticale des voies cérébrales auditives, qui débute dès avant la naissance, et celle un peu plus tardive des voies visuelles. En revanche, la maturation des fibres auditives post-thalamiques, c'est-à-dire des

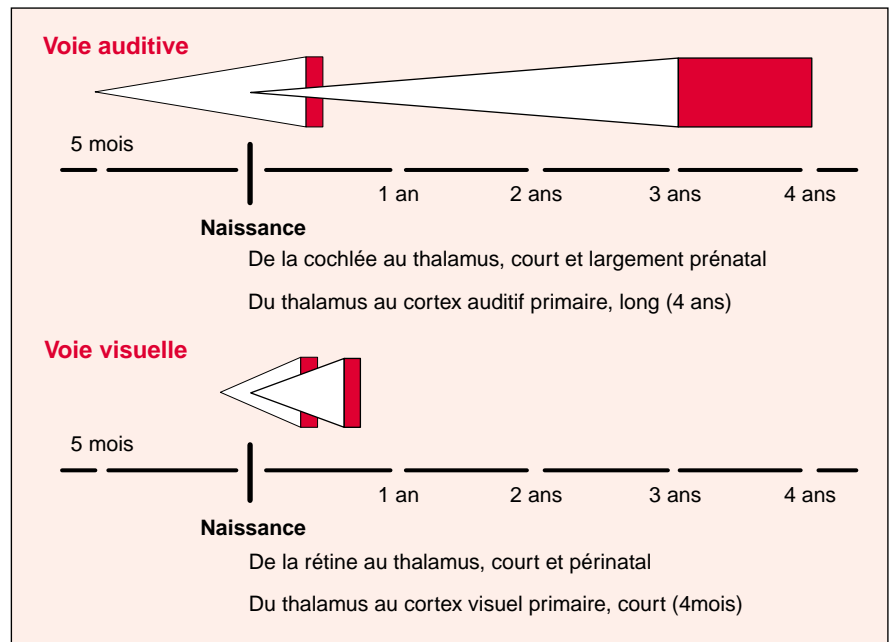


Figure 5. **Comparaison des cycles myélogénétiques pré- et post-thalamiques au cours du développement des voies auditive (en haut) et visuelle (en bas).**

afférences du cortex auditif et de l'aire de Wernicke, se prolonge sur une grande partie de l'enfance, contrairement au système perceptif visuel qui a terminé son développement au bout de quelques mois de vie. Cette maturation tardive du système auditif est sans doute à mettre en relation avec le perfectionnement des habiletés linguistiques et peut-être aussi de l'apprentissage tardif du langage écrit qui est étroitement dépendant du traitement des sons du langage. Enfin, il faut noter le caractère tardif de la maturation d'une part des aires associatives, en particulier du gyrus angulaire impliqué dans l'acquisition du langage écrit, et d'autre part du corps calleux, dont nous verrons ci-dessous l'importance cruciale dans le développement cognitif.

Développement des asymétries corticales

Un des éléments les plus importants pour la compréhension des phénomènes de latéralisation du langage a été la démonstration que l'asymétrie du planum, probablement un des facteurs, on l'a vu, déterminant l'asymétrie du langage, est déjà présente sur des cerveaux de fœtus à peine âgés de 30 semaines, c'est-à-dire dès que

sont reconnaissables les sillons qui délimitent les régions fonctionnelles du cortex [28, 29]. Cette date correspond également, du point de vue de la corticogenèse, à la fin de la période de migration et au début de la phase de synaptogenèse. Lors de cette période, qui s'étend depuis la deuxième moitié de la grossesse et se poursuivrait plus ou moins longtemps après la naissance, se produit une élimination massive, génétiquement déterminée, de neurones corticaux, phénomène qui pourrait par ailleurs être influencé ou modifié par des facteurs d'environnement.

Parmi ces facteurs, on a beaucoup insisté sur le rôle des hormones sexuelles, dont l'importance potentielle a été initialement suggérée par Geschwind et ses collaborateurs [30, 31]. La testostérone, l'hormone mâle, sécrétée en excès lors d'une période critique soit par le placenta maternel, soit par le fœtus lui-même, agirait ainsi comme un véritable « facteur de croissance », inhibant la perte cellulaire et pouvant modifier l'établissement des asymétries corticales. Un tel effet de la testostérone a été mis en évidence sur divers modèles animaux, mais est beaucoup plus difficile à prouver chez l'homme. Une étude intéressante à cet égard [32] a analysé la manualité et la latéralisa-

tion du langage en écoute dichotique chez des enfants dont la mère avait subi une amniocentèse pendant la grossesse. Les enfants dans le liquide amniotique desquels les taux prénatals de testostérone étaient élevés étaient significativement plus latéralisés (plus fort avantage de l'oreille droite) mais seulement chez les filles. Par des mesures effectuées plus simplement dans la salive [33] il a pu être retrouvé chez l'adulte des taux de testostérone significativement plus bas chez les gauchers des deux sexes, avec des taux plus bas chez ceux ayant un avantage de l'oreille droite en écoute dichotique. Enfin, les mêmes auteurs [34] ont montré que les taux de testostérone salivaire étaient corrélés à la surface d'une région postérieure du corps calleux.

Le corps calleux : une fenêtre ouverte sur le développement du cerveau

L'une des structures les plus souvent étudiées dans le cadre de recherches sur les facteurs du développement cérébral est le corps calleux, cette masse de millions de fibres qui unissent principalement les régions corticales homologues de chaque hémisphère. La raison de cet intérêt est double : d'une part, c'est une structure aisément mesurable car toutes ses fibres sont rassemblées sur la ligne médiane entre les hémisphères sous la forme d'un arc de cercle caractéristique. D'autre part, il peut être aisément visualisé *in vivo* chez l'homme, dès le plus jeune âge, grâce à l'IRM qui en donne une image très nette et contrastée (figure 6).

Les travaux réalisés chez l'adulte ont ainsi permis de montrer que d'une part la taille du corps calleux est corrélée avec certains indices de latéralisation hémisphérique fonctionnelle, en particulier la manualité, mais aussi et surtout que cette corrélation est fortement dépendante du facteur sexe, puisque l'effet est inversé lorsqu'on croise les deux facteurs [35]. En outre, il a été prouvé que les mesures réalisées sur la surface sagittale du corps calleux reflètent bien le nombre et la densité des fibres qui le composent, en particulier les fibres de petit calibre [36].

Le corps calleux est présent à la naissance chez la majorité des espèces,

bien que non encore myélinisé chez la plupart d'entre elles, y compris l'homme. Il a été démontré qu'une perte importante de projections calleuses survient au cours de la période post-natale précoce, perte en rapport avec un processus d'« élagage » neuronal physiologique ayant pour conséquence l'élimination de projections calleuses transitoires au cours d'une période critique précédant la phase de myélinisation. Chez l'homme, cette période d'élagage des axones calleux s'étendrait depuis les dernières semaines de gestation jusqu'à la fin du 3^e mois de la vie extra-utérine. On conçoit ainsi que cet événement, aboutissant à une perte massive d'axones (jusqu'à 70%), puisse considérablement influencer le type de connectivité intra- et interhémisphérique. Des facteurs hormonaux pourraient également agir au cours de cette phase du développement et donner au corps calleux sa morphologie définitive. Ainsi, l'injection de testostérone au cours de la période périnatale chez le rat peut modifier la morphologie du corps calleux. Par la suite, la surface calleuse continue à croître tout au long de la période de myélinisation qui se prolonge pendant toute l'enfance, probablement jusqu'à l'adolescence. Il est probable que l'environnement et « l'expérience » au

sens large interviennent à ce moment de manière prioritaire. Il a ainsi été prouvé que l'exercice intensif d'une activité bimanuelle avant l'âge de 7 ans était encore capable de modifier la taille du corps calleux [37]. De même, l'absence de contact avec le langage écrit semble également modifier la taille du corps calleux [38]. Les liens entre développement du corps calleux et acquisition du langage sont mal élucidés, mais il est probable que la mise en place des relations interhémisphériques joue un rôle fondamental dans l'établissement de la dominance hémisphérique gauche du langage. Les recherches les plus fructueuses à ce propos, comme du reste celles concernant la signification des asymétries morphologiques des aires du langage, sont celles qui portent sur les sujets souffrant de troubles de l'apprentissage du langage, oral et écrit.

Les troubles de l'apprentissage du langage : un modèle d'étude privilégié

Au cours de ces dix dernières années, des progrès considérables ont été réalisés dans la compréhension des mécanismes cérébraux sous-jacents à certains troubles d'apprentissage,

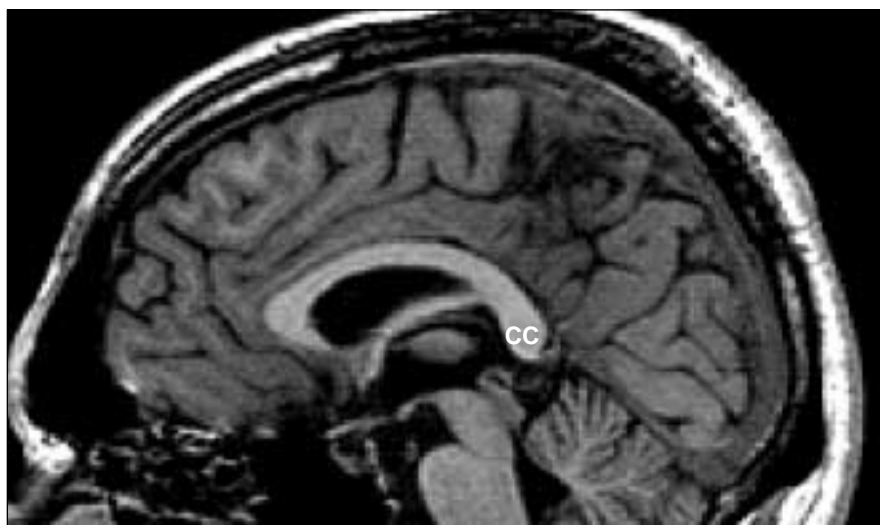


Figure 6. Apparence du corps calleux (CC) sur une coupe sagittale médiane du cerveau en IRM. La mesure de la surface calleuse reflète l'intervention des différents facteurs capables d'influencer la mise en place des connexions cortico-corticales. Par exemple, il a été démontré que cette surface est plus vaste chez les hommes gauchers, chez les musiciens ayant eu un entraînement intensif pendant la petite enfance et chez les adultes anciens dyslexiques.

naguère considérés comme des troubles « fonctionnels », voire pour certains comme de simples conséquences de carences éducatives. Les progrès réalisés l'ont été sur trois principaux points : (1) la reconnaissance par les deux principales classifications des maladies mentales (celle de l'OMS et le DSM-IV) d'entités sémiologiques distinctes à part entière dénommées troubles spécifiques d'acquisition du langage oral, de la lecture et de l'orthographe, du calcul, etc., autant d'entités correspondant à des réalités cliniques que les neurologues avaient de longue date rapprochées de pathologies cérébrales* ; (2) l'attribution de ces troubles à un défaut spécifique du développement du cerveau [39], dont l'origine génétique, bien que non encore identifiée de façon certaine, est devenue au fil des années plus que probable [40] ; et (3) la mise en évidence, grâce aux avancées de la neuropsychologie, du mécanisme développemental à l'origine de la plupart de ces troubles, à savoir un déficit du traitement des sons du langage (trouble dit phonologique), qu'il y ait ou non anomalie évidente du langage oral**.

Les progrès récents de l'imagerie cérébrale ont trouvé dans ces troubles un de leurs domaines de prédilection, permettant du reste, à travers l'étude de sujets ayant ces difficultés, d'accroître significativement notre compréhension des mécanismes cérébraux sous-tendant la parole et la lecture normale, de même que leurs liens réciproques [41, 42]. Ainsi, les sujets adultes ayant souffert de dys-

lexie de l'enfance ont tout à la fois des particularités morphologiques et neurofonctionnelles. Du point de vue morphologique, il a été démontré à plusieurs reprises une plus forte incidence d'asymétrie atypique (absente ou inversée) du planum temporal chez les dyslexiques. De même, la taille du corps calleux a été retrouvée plus vaste que chez des témoins appariés [43]. Enfin, une corrélation entre la taille de la région postérieure du langage et les aptitudes métaphonologiques a été retrouvée à plusieurs reprises [44]. Cette dernière constatation prouve que les particularités morphologiques constatées sont bien en relation avec le déficit du langage. En revanche, il est toujours possible, comme du reste pour le corps calleux, que les anomalies décrites ne soient pas causalement reliées aux troubles (en étant par exemple la conséquence d'un mode d'apprentis-

sage particulier ou encore l'effet de la rééducation intensive).

L'imagerie fonctionnelle, quant à elle, apporte des informations plus précises, mais à la fois plus complexes. Lorsqu'on demande à un sujet de lire une série de mots, deux régions hémisphériques gauches s'activent principalement. La première est située dans la zone frontale inférieure, donc dans la partie la plus centrale de la zone instrumentale du langage et correspond certainement à la nécessité, plus ou moins importante selon les mots (et probablement aussi selon les lecteurs) de prononcer mentalement les mots lus. La seconde se trouve dans la zone temporale inférieure, à la partie la plus basse de l'hémisphère donc dans la partie toute périphérique de la zone de médiation qui entoure l'aire centrale du langage (aire 37 de Brodmann). Par comparaison aux sujets témoins,

* Par exemple, dès le début du xx^e siècle, Hinshelwood, en 1917, avait remarqué la similitude entre le trouble de la lecture d'un adolescent dyslexique et celui de sujets souffrant d'alexie après une lésion du lobe occipital gauche.

** Il est usuel, au moins en France de désigner sous le terme de dysphasie les troubles sévères de l'apprentissage du langage oral, réservant le terme de dyslexie aux sujets présentant des difficultés spécifiques à l'apprentissage de l'écrit. En fait, la fréquence des dyslexies consécutives aux dysphasies, de même que la mise en évidence de troubles métaphonologiques chez pratiquement tous les dyslexiques, incitent actuellement à regrouper les deux types d'affections sous un même vocable. Celui de Specific Language Impairment est largement utilisé aux États-Unis. Le terme de dyslexie (du grec *lexis*, mot) s'appliquerait tout aussi bien aux troubles de l'oral qu'à ceux de l'écrit.

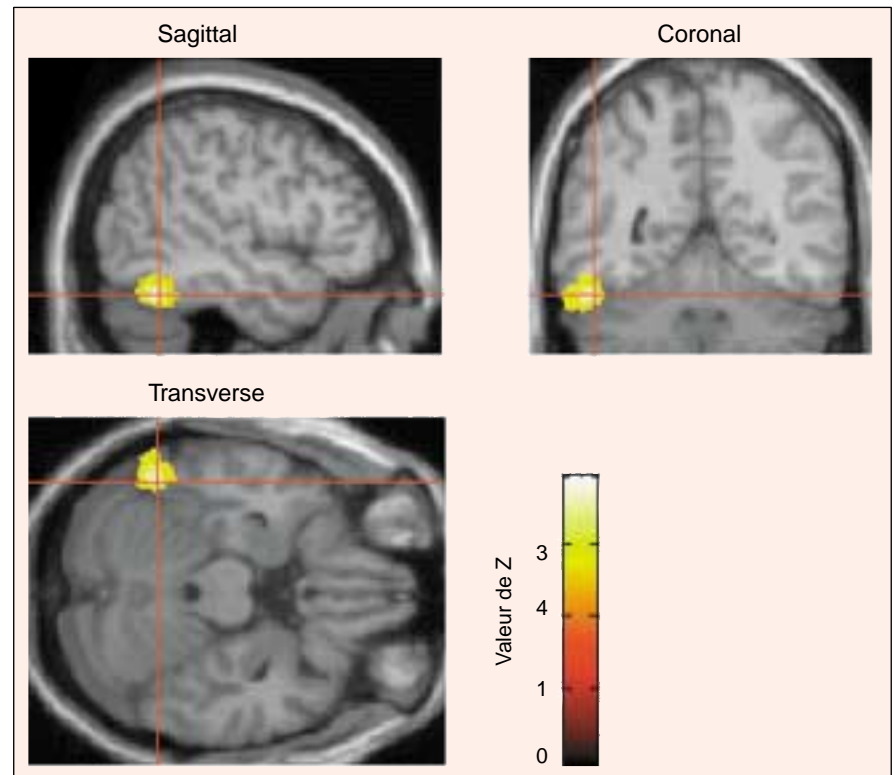


Figure 7. **Représentation de la différence maximale d'activation en tomographie à positons entre des adultes anciens dyslexiques et des témoins lors d'une tâche de lecture.** C'est au niveau du cortex inféro-temporal, dans la partie toute inférieure de l'aire 37, que les deux populations diffèrent le plus significativement l'une de l'autre. Cette région est présumée jouer un rôle déterminant dans les processus d'accès à l'orthographe des mots.

les sujets dyslexiques activent significativement moins cette zone (figure 7), ce qui suggère qu'une partie de leur déficit pourrait être liée au dysfonctionnement de cette zone. La topographie de cette zone, une aire de cortex associatif stratégiquement placée entre l'aire du langage et les aires auditives et visuelles, en fait un bon candidat pour les fonctions de représentation orthographique des mots*. De là à dire qu'au même titre que les aires du langage préexistent à l'apparition de la parole, cette région de cortex est déjà prête, ontologiquement et phylogénétiquement, pour l'apparition de la lecture, il n'y a qu'un pas, que les données pour le moment disponibles ne permettent cependant pas encore de franchir.

Conclusions

Cette qualité si proprement humaine qu'est le langage n'a pas fini de susciter débats et controverses. Au sein de ces débats, aux côtés des linguistes, psychologues, paléontologues et philologistes, le neurologue a plus que jamais son mot à dire: en décrivant avec de plus en plus de précision les soubassements cérébraux des diverses facettes du langage humain; en analysant finement les perturbations de patients souffrant de difficultés acquises ou constitutionnelles du langage; en recherchant les origines phylogénétiques et ontogénétiques de ses observations; et enfin en posant les questions fondamentales telles que celles des liens du langage avec l'esprit [45] ou encore plus généralement avec la conscience [46] ■

* Grâce à la magnéto-encéphalographie (MEG), une méthode d'imagerie moins précise anatomiquement, mais ayant une meilleure résolution temporelle, il a été démontré que cette zone se met en activité lors de la lecture quelques 200 millisecondes après la présentation du mot écrit, ce qui suggère son rôle dans les processus perceptifs précoces inhérents à la reconnaissance du mot par ses éléments visuellement saillants [48].

RÉFÉRENCES

- Galaburda AM. The anatomy of language: lessons from comparative anatomy. In: Caplan D, Lecours AR, Smith A, eds. *Biological perspectives in language*. Cambridge MA: MIT Press, 1984: 290-302.
- Aboitiz F, García VR. The evolutionary origin of the language areas in the human brain. A neuroanatomical perspective. *Brain Res Rev* 1997; 25: 381-96.
- Damasio AR, Damasio H. Language and the brain. *Scientific American*, 1992.
- 3bis. Démonet JF, Wise R, Frackowiak RSJ. Les fonctions linguistiques explorées en tomographie par émission de positons. *Med Sci* 1993; 9: 934-42.
- Geschwind N, Levitsky W. Human brain: Left-right asymmetries in temporal speech region. *Science* 1968; 161: 186-7.
- Steinmetz H. Structure, functional and cerebral asymmetry: *in vivo* morphometry of the planum temporale. *Neurosci Biobehav Rev* 1996; 20: 587-91.
- Beaton AA. The relation of planum temporale asymmetry and morphology of the corpus callosum to handedness, gender, and dyslexia: a review of the evidence. *Brain Lang* 1997; 60: 255-322.
- Morgan AE, Hynd GW. Dyslexia, neuro-linguistic ability, and anatomical variation of the planum temporale. *Neuropsychol Rev* 1998; 8: 79-93.
- Galaburda AM. La région de Broca: observations anatomiques faites un siècle après la mort de son découvreur. *Rev Neurol* 1980; 36: 609-16.
- Shapleske J, Rossell SL, Woodruff PW, David AS. The planum temporale: a systematic, quantitative review of its structural, functional and clinical significance. *Brain Res Brain Res Rev* 1999; 29: 26-49.
- Habib M, Robichon F, Levrier O, Khalil R, Salamon G. Diverging asymmetries of temporo-parietal cortical areas: a reappraisal of Geschwind/Galaburda theory. *Brain Lang* 1995; 48: 238-58.
- LeMay M. Morphological cerebral asymmetries of modern man, fossil man, and non-human primate. *Ann NY Acad Sci* 1976; 280: 349-66.
- Hopkins WD, Marino L, Rilling JK, MacGregor LA. Planum temporale asymmetries in great apes as revealed by magnetic resonance imaging (MRI). *NeuroReport* 1998; 9: 2913-8.
- Gannon PJ, Holloway RL, Broadfield DC, Braun AR. Asymmetry of chimpanzee planum temporale: humanlike pattern of Wernicke's brain language area homolog. *Science* 1998; 279: 220-2.
- Peterson MR, Beecher MD, Zoloth SR, Moody DB, Stebbin WC. Neural lateralization of species specific vocalizations by Japanese macaques. *Science* 1978; 202: 324-6.
- Heffner HE, Heffner RS. Temporal lobe lesions and perception of species-specific vocalizations by macaques. *Science* 1984; 226: 75-6.
- Kuhl PK, Miller JD. Speech Perception by the Chinchilla: voiced/voiceless distinction in alveolar plosive consonants. *Science* 1975; 190: 69-72.
- Morse P, Molfese DL, Laughlin NK, Linnville SL, Wetzel F. Categorical perception for voicing contrasts in normal and lead-treated rhesus macaques. *Brain Lang* 1987; 30: 63-88.
- Ploog DW. Neuroethological perspectives on the human brain: from the expression of emotions to intentional signing and speech. In: Harrington A, ed. *So human a brain: knowledge and values in the neurosciences*. Boston: Birkhauser, 1992: 3-13.
- Savage-Rumbaugh ES. Language acquisition in non-human species: implications for the innateness debate. *Dev Psychobiol* 1990; 23: 599-620.
- Leroi-Gourhan A. *Le geste et la parole: technique et langage*. Paris: Albin Michel, 1964; 163 p.
- Corballis MC. *The lopsided ape: evolution of the generative mind*. Oxford: Oxford University Press 1991.
- Bradshaw JL. The evolution of human lateral asymmetries: new evidence and second thoughts. *J Hum Evol* 1988; 17: 615-37.
- Poizner H, Bellugi U, Klima E. Biological foundations of language: clues from sign language. *Ann Rev Neurosci* 1990; 13: 283-307.
- Bellugi U, Poizner H, Klima ES. Brain organization for language: clues from sign aphasia. *Hum Neurobiol* 1983; 2: 155-70.
- Poizner H, Klima E, Bellugi U. *What the hands reveal about the brain*. Cambridge, MA: MIT Press 1987.
- Neville HJ, Bavelier D, Corina D, et al. Cerebral organization for language in deaf and hearing subjects: biological constraints and effects of experience. *Proc Natl Acad Sci USA* 1998; 95: 922-9.
- Chevrie-Muller C, Narbona J. *Le langage de l'enfant: aspects normaux et pathologiques*. Paris: Masson, 1996.
- Chi JG, Dooling EC, Gilles FH. Left-right asymmetries of the temporal speech areas of the human fetus. *Arch Neurol* 1977; 34: 346-53.
- Teszner D, Tzavaras A, Gruner J, Hécaen H. L'asymétrie droite-gauche du planum temporale. *Rev Neurol (Paris)* 1972; 12, 6: 444-9.

RÉFÉRENCES

30. Geschwind N, Behan PO. Left-handedness: association with immune disease, migraine, and developmental learning disorder. *Proc Natl Acad Sci USA* 1982; 79: 5097-100.
31. Geschwind N, Galaburda AM. Cerebral lateralization. Biological mechanisms, associations, and pathology: I. *Arch Neurol* 1985; 42: 428-59.
32. Grimshaw GM, Bryden MP, Finegan JK. Relations between prenatal testosterone and cerebral lateralization at age 10. *J Clin Exp Neuropsychol* 1993; 15: 39-40.
33. Moffat SD, Hampson E. Salivary testosterone levels in left- and right-handed adults. *Neuropsychologia* 1996; 34: 225-33.
34. Moffat SD, Hampson E, Wickett JC, Vernon PA, Lee DH. Testosterone is correlated with regional morphology of the human corpus callosum. *Brain Res* 1997; 767: 297-304.
35. Habib M, Gayraud D, Régis J, Oliva A, Salamon G, Khalil R. Effects of handedness and sex on the morphology of the corpus callosum. *Brain Cogn* 1991; 16: 41-61.
36. Aboitiz F, Scheibel AB, Fisher RS, Zaidel E. Fiber composition in the human corpus callosum. *Brain Res* 1992; 598: 143-53.
37. Schlaug G, Jäncke L, Huang Y, Steiger JF, Steinmetz H. Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia* 1995; 33: 1047-56.
38. Castro-Caldas A, Miranda PC, Carmo I, et al. Influence of learning to read and write on the morphology of the corpus callosum. *Eur J Neurol* 1999; 6: 23-8.
39. Galaburda AM, Rosen GD, Sherman GF, Humphreys P. Anatomie de la dyslexie: arguments contre la phrénologie. *Rev Neuropsychol* 1991; 1: 157-75.
40. Fisher SE, Marlow AJ, Lamb J, et al. A quantitative trait locus on chromosome 6p influences different aspects of developmental dyslexia. *Am J Genet* 1999; 64: 146-56.
41. Habib M, Robichon F. Les mécanismes cérébraux de la lecture: un modèle en neurologie cognitive. *Med Sci* 1996; 12: 707-14.
42. Habib M, Démonet JF. Dyslexia and related learning disorders: recent advances from brain imaging studies. In: Mazziotta J, Toga A, Frackowiak R, eds. New York: Academic Press, 2000 (sous presse).
43. Robichon F, Habib M. Abnormal callosal morphology in male adult dyslexics: Relationships to handedness and phonological abilities. *Brain Lang* 1998; 62: 127-46.
44. Robichon F, Lévrier O, Farnarier P, Habib M. Developmental dyslexia: atypical asymmetry of language areas and its functional significance. *Eur Neurol* 2000 (sous presse).
45. Laplane D. Existe-t-il une pensée sans langage ? *La Recherche* 1999; 325: 62-7.
46. Damasio AR. *Le sentiment même de soi*. Paris: Odile Jacob 1999.
47. Habib M, Robichon F. Dominance hémisphérique. *Encycl Med-Chir (Elsevier Paris) Neurologie* 1999; 17-022-C-10, 8 p.
48. Salmelin R, Service E, Kiesilä P, Uutela K, Salonen O. Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography. *Ann Neurol* 1996; 40: 157-62.

TIRÉS À PART

Y. Joannette.

ms2000

Summary

The human brain and the origins of language

At the turn of the century, the issue of the origins of human language still remains one of the most attractive challenges for neuroscientists and neurologists. This article proposes an overview of various pieces of evidence, derived from – mostly recent – anatomical, physiological as well as clinical research. After a short recall of classical anatomical concepts about the brain language areas, and an illustration of advances to these classical conceptions provided by new imaging techniques, the central issue of brain lateralisation is taken as a basis for a reflection about the phylogenetic and paleontological origins of human language. One important conclusion to this section is that anterior and posterior parts of the language area, *i.e.* respectively its expressive and receptive components, probably differ in their origins. In particular, motor aspects of speech, as exemplified in recent brain imaging studies in deaf subjects, seem to be a necessary condition to a plain left lateralization of language. Development of brain/language relationship during the child's maturation is also a valuable source of information. Insights into the brain development have been derived from several approaches : the study of myelinogenesis, which offers a reliable timetable of the relative growth of different brain areas ; development, mainly during late fetal life, of brain asymmetry, which is thought to be crucial to setting up the pattern of language lateralization. Finally, one brain structure, the corpus callosum, clearly measurable on magnetic resonance (MRI) pictures, appears as a very useful index of the potential role of various factors on brain maturation, including the effect of practice and training, now believed to be at least as effective as prenatal influences in determining the morphology of language-related brain regions. Finally, clinical and imaging studies of language-learning disorders in children has been one of the most fruitful approaches, in the recent years, yielding considerable insight into the cognitive, biological and genetic bases of human language. Functional brain imaging in these conditions has recently contributed in important ways to the knowledge of brain mechanisms involved in processing written language.

FONDATION FYSSSEN

194, rue de Rivoli, 75001 Paris
Tél.: 33 (0)1 42 97 53 16 – Fax: 33 (0)1 42 60 17 95
<http://www.fondation-fyssen.org>

**Le Prix International 1999
sur le thème « Anthropologie linguistique et cognitive »
sera remis à Monsieur le Professeur Brent Berlin**

du département Anthropologie de l'Université de Georgie, en l'honneur de ses travaux dans ce domaine. Ses travaux sur la classification des couleurs et les classifications ethnobiologiques sont sans nul doute les contributions les plus importantes de l'anthropologie cognitive de ces vingt dernières années.

Vendredi 31 mars 2000, à 18 h 00, à la Maison des Polytechniciens, 12, rue de Poitiers, 75007 Paris, France.