

Séance du 17 octobre 2016

Le Langage, la Musique, l'Action et les aires de Broca

par Alain SANS

MOTS-CLÉS

Aire de Broca - Localisations cérébrales - Assemblée de neurones - Langage, musique et motricité.

RÉSUMÉ

Les différentes étapes de la découverte des localisations cérébrales pour le langage et leurs relations réciproques sont rappelées. L'accent est également mis sur les travaux scientifiques effectués ces dernières années qui montrent que l'aire de Broca pourrait faire partie d'un réseau cérébral codant pour des structures hiérarchisées, indifféremment de leurs utilisations dans le langage, la musique ou la réalisation d'un acte moteur orienté. Cette structure d'un haut niveau hiérarchique s'adapte en fonction de l'expérience acquise dans diverses situations. Ainsi le fait qu'elle soit plurimodale et non déterminée à la naissance explique la possibilité d'apprentissage de plusieurs langues et laisse ouverte la possibilité, dans le futur, de se mettre à la disposition d'une modalité nouvelle qui pourrait éventuellement apparaître au cours de l'évolution.

I – Introduction et rappels historiques

Au cours du colloque sur les neurosciences, organisé en 2015 par la section de médecine de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, le professeur Hugues Duffau^(1, 2) a insisté sur le fait que l'aire de Broca n'aurait pas de rôle dans la **production** du langage et que sa résection lors de gliomes de bas grade n'entraîne aucune conséquence, si le chirurgien prend au préalable, certaines précautions. Ceci repose indirectement la question de l'existence de la localisation d'aires cérébrales qui auraient un rôle spécifique dans une fonction cognitive particulière comme le langage. Cette conception du rôle du cerveau a provoqué un vif débat entre neurologues au XIX^e siècle. En effet, deux théories s'affrontaient alors, la théorie holistique et le localisationisme. L'holisme conçoit le cerveau comme un tout. Elle défend l'idée que toutes les parties du cerveau sont équivalentes dans leur fonction et que chacune peut remplacer n'importe quelle autre, en cas de dysfonction. Le localisationisme défendu par Paul Broca postule au contraire que chaque structure a un rôle particulier, spécifique, dans le fonctionnement du cerveau. Aussi, un Historique de la question paraît nécessaire, avant de faire une revue rapide des conceptions actuelles sur le langage tout en insistant plus particulièrement sur l'aire de Broca.

I.1 – Le cas **Phinéas Cage**

Il faut vous transporter en 1848, aux Etats-Unis d'Amérique, où l'on construit une ligne de chemin de fer dans le Vermont. Un chef d'équipe, Phinéas Cage est chargé de forer des trous dans la roche pour la faire exploser, afin d'établir une plateforme permettant le passage des trains. L'orifice est rempli de poudre à canon, puis de sable que l'on tasse pour réaliser une chambre étanche. Ph. Cage avait fait réaliser par un forgeron une barre à mines de 6 kg, mesurant 1,10 m et dont le plus grand diamètre faisait 3 cm. Cette barre était très effilée à une extrémité, l'autre étant aplatie pour tasser la poudre. Suite à une erreur dans l'enchaînement des opérations, une explosion se produisit qui projeta Phinéas Cage en arrière, la barre à mine dont il se servait traversant totalement son cerveau. Elle entra dans le crâne par la partie effilée, sous l'arcade sourcilière, pour ressortir au niveau de la ligne médiane. Ce cas est resté dans les annales de la neurologie car Cage se releva, ne présentant ni troubles moteurs ni troubles du langage. Après avoir nettoyé la plaie, puis l'avoir enduite de graisse de castor, le docteur Harlow qui le soigna écrit dans ses mémoires, "Je le pensai et Dieu le sauva". Cage devait décéder 13 ans plus tard, en 1861, après avoir été, entre autre, conducteur de diligence au Chili. Comment interpréter ce cas ? S'agissait-il d'une illustration de la théorie de l'holisme ?

I.2 – **Marc Dax ou Paul Broca ?**

Or, cette année-là, le professeur Paul Broca⁽³⁾ fait une communication à la société d'anthropologie de Paris "*sur le siège de la faculté du langage articulé, suivie d'une observation d'aphémie (perte de la parole)*". Cette aire, située au pied de la 3^e circonvolution frontale de **l'hémisphère gauche**, connue depuis comme aire de Broca fut considérée alors comme le centre du langage. Il faut cependant signaler que le premier à postuler l'existence probable d'un centre du langage dans le lobe frontal gauche est Marc Dax, ancêtre direct de notre excellent confrère, Guy Puech. Dax qui fit ses études de médecine à Montpellier, s'installe à Sommières. Esprit curieux, il est intrigué par le fait que les blessés ayant une lésion cérébrale dans l'hémisphère gauche présentaient une aphasie et une hémiparésie droite. Il rédige alors un court mémoire intitulé "*Les Lésions de la moitié gauche de l'encéphale coïncident avec l'oubli des signes de la pensée*" qui fût présenté en 1836 à un petit congrès scientifique, le Congrès Méridional de Montpellier. Il ne restera malheureusement aucune trace écrite de cette communication. D'autres neurologues dont Bouillaud avaient aussi travaillé sur ce sujet, mais c'est le nom de Broca qui est resté attaché à la première description d'une **localisation cérébrale gauche** pour le langage. Chez les aphasiques "de Broca", le déficit affecte un mécanisme général de traitement du langage, impliqué dans la syntaxe, aussi bien **en compréhension** qu'**en production**. Broca pouvait donc estimer qu'il avait découvert le "centre du langage".

I.3 – **Carl Wernicke complète Broca**

Dix ans plus tard, un jeune neurologue, Carl Wernicke met en évidence une région située dans la partie postérieure du lobe temporal gauche. Les patients qui ont une lésion à cet endroit ont une grande habileté langagière mais leur discours est incohérent, dénué de sens, jargonnant. Cette région est donc impliquée dans la compréhension et l'élaboration du langage. L'aire de Broca n'était donc pas le centre du langage puisque celui-ci dépendait au moins de deux régions distinctes ; l'aire de Broca et l'aire de Wernicke, reliées par un faisceau de fibres nerveuses, le faisceau arqué (Fig.1).

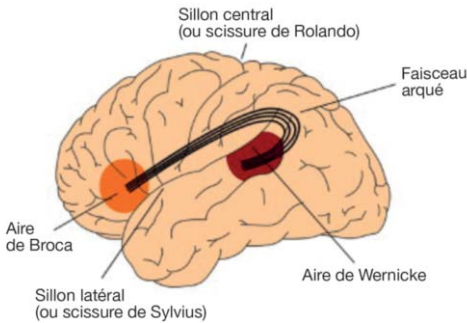


Fig. 1 : Aire de Wernicke se projetant sur l'aire de Broca par le faisceau arqué.

I.4- Norman Geschwind complete Wernicke

Cette étape historique des aires du langage qui voyait triompher la théorie localisationniste fut complétée dans les années 1960 par N. Geschwind⁽⁴⁾, qui signala l'importance et le rôle du gyrus angulaire et du gyrus supramarginal dans le langage. Il faut signaler que ces aires sont des aires de convergences multisensorielles, auditive et visuelle pour le gyrus angulaire et somesthésique pour le gyrus supramarginal (Fig. 2). De plus, les neurones de cette région ont la particularité d'être "multimodaux", c'est-à-dire qu'ils sont capables de traiter simultanément des *stimuli* de différentes natures (auditif, visuel, sensorimoteur). Ces caractéristiques font donc du lobule pariétal inférieur un candidat idéal pour appréhender les multiples propriétés d'un mot : son aspect visuel, sa fonction, son nom, etc. Il aiderait ainsi le cerveau à classer et à étiqueter les choses, une condition préalable pour former des concepts et une pensée abstraite.

Les aires sensorielles primaires se projetaient sur le gyrus angulaire et le gyrus supramarginal, puis les informations arrivaient sur l'aire de Wernicke qui par le faisceau arqué se projetait sur l'aire de Broca, laquelle était en relation avec les aires prémotrices et le cortex moteur qui assuraient la production du langage (Fig. 3). Le langage était alors conçu comme un dispositif sériel.

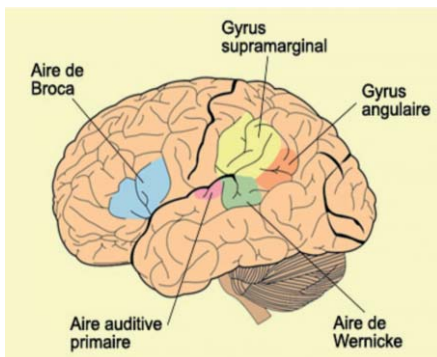


Fig. 2 : Illustration du territoire de Geschwind, comportant le gyrus supramarginal et le gyrus angulaire.

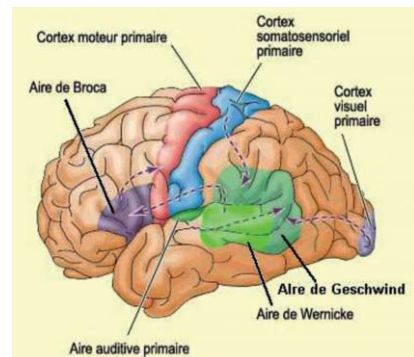


Fig. 3 : Schéma des relations des aires du langage d'après Geschwind.

La conception localisationniste du langage s'était donc complexifiée en devenant également connexionniste.

Cette conception va se trouver bouleversée par l'émergence de nouvelles techniques d'anatomie, d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), d'électrophysiologie, de neuropsychologie...

II – Principes généraux sur la conception actuelle du langage

II.1 – L 'apport de la neuroanatomie moderne et des techniques d'imagerie

Ces techniques ont permis d'aller plus en profondeur et de modifier notre conception du langage. En ce qui concerne les aires de Broca par exemple la neuroanatomie montre que ces aires sont beaucoup plus complexes que nous le supposions. Par radio-autographie, on peut associer un ligand pour le récepteur d'un neuromédiateur, à un élément radioactif, le tritium, par exemple. Ce dernier ira impressionner un film sensible, ce qui permettra de localiser le récepteur sur une coupe histologique. On a pu montrer que les aires de Brodmann⁽⁵⁾, à savoir l'aire 44 operculaire et l'aire 45 triangulaire (Fig. 4), qui correspondent aux aires de Broca, devaient être subdivisées en plusieurs régions.

Par radio-autographie, Amunts *et al.*⁽⁶⁾, (Fig. 5) ont découvert que dans les aires 44 et 45, il y avait au moins 12 récepteurs différents aux divers neuromédiateurs et que ces neuromédiateurs se répartissaient dans des subdivisions des aires 44 et 45. Aussi ces auteurs proposent de reconsidérer la nomenclature de ces aires en y ajoutant des régions voisines qui possèdent les mêmes groupements de récepteurs aux neuromédiateurs. Ces résultats laissent présager un rôle différent pour ces différentes subdivisions.

II.2 – Traitement en parallèle de l'information et assemblées de neurones

L'émergence de l'imagerie par résonance magnétique et de la tractographie a également bouleversé nos connaissances sur le fonctionnement *in vivo* et les interrelations entre les structures impliquées dans le langage. M. Catani *et al.*⁽⁷⁾, en utilisant la technique de tractographie, ont montré l'importance des fibres reliant le gyrus angulaire, les gyrus supra marginal, temporal supérieur (Wernicke) et les aires de Broca. Cette technique très spectaculaire indique les structures reliées entre elles, mais pas le sens des influx nerveux. Cependant étant donnée la taille de ces faisceaux de fibres blanches, il y avait tout lieu de penser que ces structures étaient reliées de façon **bidirectionnelle**. C'est ce qu'ont confirmé l'IRMf et l'électrophysiologie.

Le langage est constitué de trois composantes : phonologique, syntaxique et sémantique. Plusieurs centres nerveux participent à son élaboration. Citons le cortex frontal inférieur qui comprend l'aire de Broca avec ses parties : operculaire et triangulaire ainsi que le cortex orbitaire et les régions périsylviennes, comme les cortex temporal et pariétal qui sont étroitement **connectés d'une manière réciproque**. Le traitement en parallèle de l'information, phonologique, syntaxique, sémantique, s'effectue dans des centres bien précis. C'est ainsi que les aspects phonologiques du langage seront traités par la partie operculaire de l'aire de Broca, les aspects syntaxiques par la partie triangulaire et les aspects sémantiques par le gyrus préfrontal inférieur (orbitaire). Ce traitement s'effectuant avec le concours et la contribution des aires pariétales inférieures et des aires temporales : supérieure, moyenne et inférieure, lesquelles prennent en compte le contexte neurosensoriel et moteur. (Hagoort P.)⁽⁸⁾. (Fig. 6).

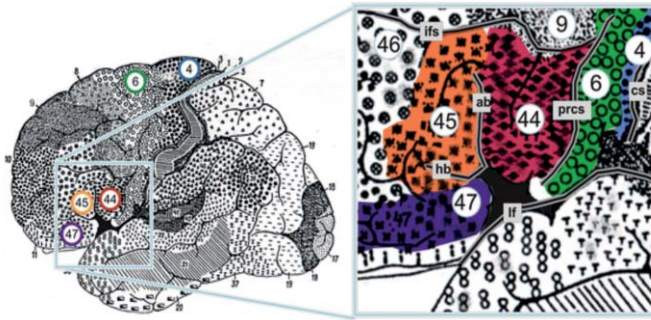


Fig. 4 : Carte cytoarchitectonique de la surface latérale du cortex humain (adaptée de Brodmann). D'après Amunts K et al. 2010 in : PLOS Biology 2010,8(6)

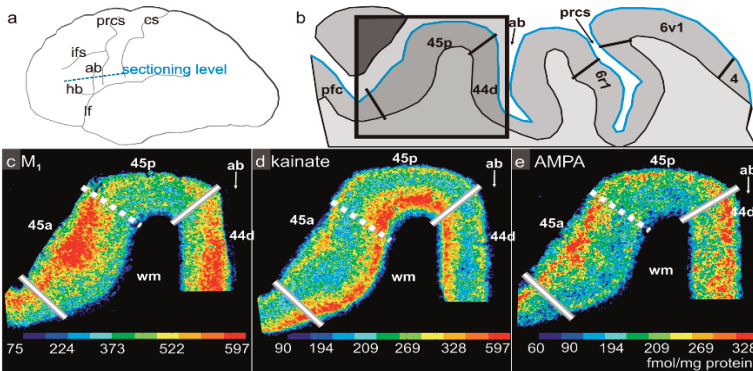


Fig. 5 : Distribution des récepteurs cholinergiques M₁, et glutamatergiques de type kainate et AMPA. par radio autographie. Les zones marquées sont en rouge. Amunts K et al. 2010. in PLOS Biology 2010,8(6).

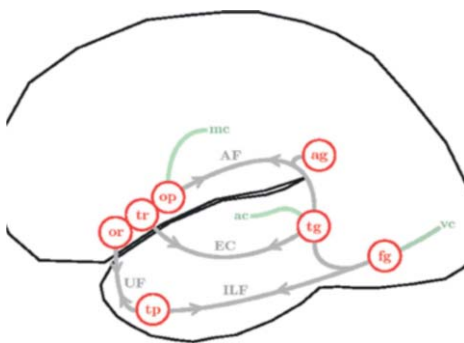


Fig.6 : Illustration simplifiée de la connectivité de l'hémisphère gauche pour le langage.

Les centres sont en rouge :
 op et tr = partie operculaire et triangulaire de Broca
 or = cortex orbitaire ;
 ag = gyrus angulaire ;
 tg = gyrus temporal supérieur et moyen ;
 tp = gyrus temporal inférieur ;
 fg = gyrus fusiforme.

En gris, les fibres nerveuses indiquant la bidirectionnalité des connexions.
 AF = faisceau arqué ; EC = capsule extrême ; UC = faisceau inciné
 ILF = faisceau longitudinal inférieur.

En vert, les interfaces, avec le cortex auditif = ac ; le cortex visuel = vc ;
 le cortex moteur = mc.

Hagoort P.2013 in Frontiers in Psychology.

Prenons un exemple succinct de la nécessité de ce dialogue entre les structures nerveuses. Lorsqu'une idée émerge dans le lobe temporal gauche dans une assemblée de neurones, il va alors se produire une dépolarisation synchrone de ces neurones qui vont adresser un message à la partie triangulaire de Broca ; dans celle-ci, une assemblée de neurones va juger de la congruence de ce message. En retour elle va envoyer un train d'influx sur l'assemblée de neurones émettrice qui, si ce train d'influx est soutenu (\geq à 100) va entraîner la validation de la proposition (Hebb *et al.*)⁽⁹⁾. Le même principe va fonctionner pour l'aspect phonologique, pour la zone operculaire ou pour le cortex orbitaire, pour l'aspect sémantique. C'est pourquoi dans l'aphasie dite de Broca, le déficit affecte un mécanisme général de traitement du langage, impliqué **dans la syntaxe** aussi bien **en compréhension** qu'en **production**. La conception actuelle du langage varie donc radicalement de la conception sérielle et hiérarchisée, avec passage de l'information successivement d'un centre à un autre. De plus on ne conçoit plus l'existence de centres avec des neurones dévolus à une fonction bien précise. Certains neurobiologistes pensent plutôt que les assemblées de neurones, qui constituent les centres, peuvent changer de partenaire en fonction de la nature de la tâche à accomplir. Elles forment des réseaux neuronaux fonctionnels interactifs, impliquant de nombreuses structures corticales et sous-corticales (Fedorenko *et al.*)⁽¹⁰⁾. Cela ne signifie pas pour autant qu'il n'existe pas de centres privilégiés jouant un rôle essentiel dans le langage. On a vu que les aires pariétales inférieures et les aires temporales participent activement à l'élaboration du langage dans ses trois composantes, phonologique, syntaxique et sémantique. Elles constituent des *domaines spécifiques* qui collaboreraient avec des *domaines communs*, constitués de ressources neurales comme par exemples les aires de Broca (*cf. infra* . §. IV) Les progrès techniques accomplis ces 15 dernières années ainsi que les recherches de linguistique, de psychologie cognitive et des sciences computationnelles sur le langage ont donc radicalement changé notre conception du langage. De plus si l'hémisphère gauche reste incontestablement l'hémisphère dominant, certaines composantes du langage sont bilatéralisées. Ainsi, les régions temporales supérieures des cortex gauche et droit, sont impliquées dans la perception et la compréhension de la parole. Au contraire les structures concernées par la production de la parole sont latéralisées à gauche (Poeppel.)⁽¹¹⁾

III – Maturation cérébrale et langage

Chomsky et la grammaire universelle

Noam Chomsky⁽¹²⁾ fut frappé, par le fait que le très jeune enfant est capable de parler correctement n'importe quelle langue, sans un enseignement préalable de sa syntaxe et de sa grammaire. Cela impliquait pour lui, que le bébé devait posséder une compétence *innée de la grammaire*, d'où l'hypothèse de l'existence d'une "*grammaire universelle*". Cette hypothèse présuppose que le cerveau immature du nouveau-né comporte des structures nerveuses, le prédisposant à sélectionner parmi les phrases qui surgiraient plus tard à son esprit, celles qui sont conformes à "*une structure profonde*" de la langue. Cette théorie est captivante, car elle expliquerait pourquoi les 6 000 langues existant encore sur notre planète sont apprises, dans la prime enfance, sans difficulté. Cette théorie adoptée avec enthousiasme par les linguistes fut néanmoins accueillie avec scepticisme par les neurobiologistes. En effet, dans la conception sérielle du langage en centres hiérarchisés, les structures nerveuses impliquées (pariétaux-temporales et frontales) étaient très immatures à la naissance. Les méthodes modernes

d'investigation, IRM, magnéto et électro-encéphalographie ont permis de constater que le bébé humain, dans la période postnatale, entre la naissance et l'âge d'un an, *comprend* et intègre globalement très tôt le langage maternel, alors qu'il est encore incapable de parler. Il pratique spontanément une analyse statistique des phonèmes entendus dans sa langue maternelle. En effet, des travaux récents sur la maturation du cerveau humain effectués, entre autre, par l'équipe de Gislaine Dehaene-Lambertz⁽¹³⁾ ont modifié notre regard sur la maturation cérébrale. Dans un article sur la maturation précoce de la voie dorsale impliquée dans le langage, chez le bébé âgé entre 3 jours et 2 mois, Leroy F. *et al.*⁽¹⁴⁾ ont montré que les structures nerveuses impliquées dans le langage, comme le sillon temporal supérieur, le faisceau arqué et l'aire 44 de Broca présentent une maturation précoce et corrélée. Or cette voie est en particulier concernée dans une boucle phonologique impliquant la mémoire de travail et pourrait servir de substrat neuronal expliquant l'augmentation d'activité observée dans l'aire de Broca lorsque des syllabes ou des phrases sont répétées chez le tout jeune enfant. C'est par ce processus de répétition que l'aire de Broca, probablement par une méthode de calcul statistique, intègre la syntaxe nécessaire au langage parlé. Par une approche très différente axée sur l'apprentissage d'une nouvelle langue chez des adultes, Musso M. *et al.*⁽¹⁵⁾ ont publié un article dans la revue "Nature Neuroscience" intitulé : l'aire de Broca et l'instinct du langage. Cet article fût commenté dans la même prestigieuse revue par un article faisant allusion à la théorie de Chomsky sur la grammaire universelle, "Does Broca's play by the rules ?". Le commentaire de ces auteurs (G. Marcus *et al.*)⁽¹⁶⁾ m'a paru fort intéressant. Il indique qu'une possibilité est que les subdivisions de l'aire de Broca soient dévolues à des tâches bien précises. Certaines subdivisions de la partie triangulaire étant spécialisées dans la syntaxe, d'autres de la partie operculaire à des opérations de type phonologique. Une solution alternative pourrait être que différentes parties du cerveau se spécialiseraient dans différents types d'évaluation. Dans cette perspective, la région des aires de Broca pourrait véritablement participer à une large palette de tâches. Ainsi une fonction spécialisée émergerait d'un domaine de larges compétences. Ce domaine serait par exemple capable d'effectuer des opérations récurrentes sans qu'il soit nécessaire de postuler un substrat neuronal spécialisé en "grammaire universelle". Plutôt qu'un simple module localisé du langage, notre habileté typiquement humaine pour le langage pourrait résulter d'un petit nombre de substrats neuronaux possédant une large compétence, travaillant en coopération, en tandem, avec quantité d'autres mécanismes conservés au cours de l'évolution.

IV – Langage et musique interagissent au niveau syntaxique dans l'aire de Broca

Depuis plus de 20 ans les neurobiologistes s'intéressent aux projections corticales de la musique et à leur éventuelle colocalisation avec les aires du langage. Le point le plus travaillé concerne les superpositions de la musique avec le langage au niveau des aires de Broca et plus particulièrement en ce qui concerne l'aspect syntaxique (Patel)⁽¹⁷⁾. La syntaxe peut être définie comme un ensemble de principes gouvernant la combinaison d'éléments structuraux discrets en séquences, tels que les mots ou les tons musicaux (Jackendoff)⁽¹⁸⁾.

Les séquences linguistiques et musicales ne sont pas créées par une juxtaposition au hasard d'éléments élémentaires. Des principes combinatoires opèrent à de multiples niveaux, tels que la formations de mots, de phrases, de propositions, pour le langage et

d'accords, de progressions d'accords, de tons, pour la musique (c.à.d. en définitive, de "structures harmoniques"). La connaissance de ces principes est implicite, incluant l'aptitude à détecter des anomalies dans une séquence telle que des erreurs grammaticales pour le langage ou des notes "anormales" pour la musique. La connaissance de la syntaxe permet à l'esprit d'accomplir une remarquable transformation des informations qui lui arrivent. La musique instrumentale et le langage sont tous deux des systèmes syntaxiques, employant des séquences complexes, hiérarchiquement structurées, utilisant des normes implicites. Cette organisation permet de comprendre le rôle de mots individuels ou de tons dans le contexte plus large de phrases ou de mélodies. Est-ce que, langage et musique procèdent de ce même mécanisme ? y a-t-il un processus de recouvrement de leurs processus syntaxiques qui impliquent l'intégration d'éléments discrets (comme les mots, les *tons* et les accords), en structures d'ordre supérieur, comme des phrases pour le langage et des séquences harmoniques pour la musique et cela en accord avec un groupement de principes combinatoires qui sont implicitement compris par les membres appartenant à une même culture ? Cependant il est bien connu que la syntaxe impliquant le langage et l'harmonie tonale peut être dissociée après des altérations du cerveau, ce qui suggère une indépendance de ces deux domaines. Pourtant de très nombreux travaux plaident en sens inverse à savoir que ces deux processus entraînent des réponses de structures nerveuses identiques. Pour résoudre ce paradoxe on a proposé une hypothèse bimodale. Il faudrait distinguer un domaine spécifique qui serait représenté par la mémoire à long terme, stockant la connaissance des mots, leur structure syntaxique ainsi que les accords et leurs caractéristiques harmoniques et un domaine commun constitué de "ressources neurales". Ce modèle postule donc que les processus syntaxiques sont impliqués dans des interactions entre un réseau de ressources neuronales fournissant des moyens supposés être dans les régions frontales du cerveau et un réseau de représentations spécifiques supposé être dans les régions temporales. Dans ces conditions, les régions activées du cortex frontal augmenteraient, par le biais de fibres réciproques, l'activité des représentations dans les régions temporales. Mais dans un esprit d'économies de moyen, la musique et le langage partageraient les ressources neuronales des régions du cortex frontal, pour activer les informations contenues dans le lobe temporal. Ce modèle en boucle, conforté par les énormes projections des différents faisceaux rappelés dans le chapitre consacré à la neuroanatomie, pourrait s'appuyer sur la règle de Hebb⁽⁹⁾. Les influx venant des régions temporales arrivant sur les aires de Broca y seraient analysés et selon leurs congruences seraient redirigés vers leur lieu d'origine pour selon le cas y être renforcés ou éteints. Utilisant ce paradigme, Kunert *et al*⁽¹⁹⁾ ont pu démontrer par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (fMRI) que deux domaines cognitifs différents, la musique et le langage partageaient des ressources neuronales communes, dans les aires de Broca, dans le cadre d'un même haut niveau d'intégration syntaxique.

V – Aire de Broca et neurones miroirs

Au début des années 1990, une équipe italienne (Rizzolatti et Sinigaglia⁽²⁰⁾) découvre dans le cortex frontal du singe, et plus particulièrement l'aire F5 qui est considérée comme l'homologue de l'aire 44 de Broca, des neurones très particuliers, les neurones miroirs. Ces derniers ont la particularité de s'activer spontanément lorsque le singe regarde un congénère ou un expérimentateur, en train d'effectuer un geste moteur dirigé vers un objet précis. Ils s'activent également lorsque le singe effectue lui-même ce mouvement.

Ces neurones miroirs ont par la suite été retrouvés chez l'Homme par diverses techniques, neuro-imagerie, magnétoencéphalographie, électrophysiologie, (Fadiga *et al.*)⁽²¹⁾, (Rizzolatti et Graighero)⁽²²⁾, en particulier dans l'aire 44 du langage. Il est bien connu que les gestes peuvent se décomposer en séquences de mouvements qui s'enchaînent rigoureusement. Ils seraient en cela semblable aux phonèmes et aux mots qui sont inclus dans une phrase. C'est ainsi qu'il a été démontré que des lésions situées dans la partie operculaire et dans la partie triangulaire de l'aire de Broca induisent un handicap dans la compréhension des gestes (Pazzaglia *et al.*)⁽²³⁾ tout comme dans la compréhension du langage. Ces résultats sont en accord avec ceux de Tranel *et al.*⁽²⁴⁾ montrant que les patients ayant des lésions du lobe frontal gauche, présentent des difficultés à comprendre les détails d'action représentés sur des images. De plus, on a testé des patients présentant une lésion centrée sur l'aire de Broca, à qui l'on demande d'effectuer une tâche motrice séquentielle (Fadiga *et al.*)^(21, 25). Les résultats suggèrent la possibilité que l'aire de Broca soit impliquée dans les règles syntaxiques concernant l'action plutôt que le programme moteur chargé de l'exécuter.

VI – Discussion

Il ressort des travaux scientifiques effectués ces dernières années que si l'aire de Broca n'est pas le “*centre du langage*” elle pourrait être le centre d'un réseau cérébral codant pour des structures hiérarchiques, indifféremment de leurs utilisations dans le langage, la musique et la motricité (gestuelle). Ces traits partagés par ces trois composantes peuvent donc justifier l'utilisation de structures syntaxiques hiérarchisées et soutenir l'idée d'un rôle supramodal pour l'aire 44 de Broca. Les résultats scientifiques actuels indiquent que l'aire de Broca fait partie d'un circuit qui pourrait être responsable de processus impliqués dans une grammaire artificielle, codant les aspects syntaxiques de différents domaines. L'apport des neurosciences computationnelles devient indispensable pour étayer les différentes recherches sur le langage impliquant les méthodes informatiques telles que, entre autres, la concaténation et la linéarisation.

Ainsi, il semble que l'évolution nous ait légué une structure dévolue à la syntaxe de plusieurs modalités, langage, musique, motricité. Cette structure d'un haut niveau hiérarchique s'adapte, dès la naissance, en fonction de l'expérience acquise dans diverses situations. La complexité syntaxique croît avec l'expérience dans les divers types de modalités. Ainsi le fait que cette structure soit plurimodale et donc non déterminée à la naissance explique la possibilité d'apprentissage de plusieurs langues, de la musique, de la motricité et laisse ouverte la possibilité, dans le futur de se mettre à la disposition d'une modalité nouvelle qui pourrait éventuellement apparaître au cours de l'évolution.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Duffau H. : **2015**, La neurochirurgie éveillée. *Colloque sur le cerveau. Acad. Sciences et Lettres Montpellier*. 22 et 23 octobre 2015.
- (2) Tate M., G. Herbet, S. Moritz-Gasser, J. Tate and H. Duffau: **2014**, Probabilistic map of critical functional regions of the human cerebral cortex: Broca's area revisited. *Brain*: **137**; 2773-2782.
- (3) Broca P. : **1863**, Sur le siège de la faculté du langage articulé, suivis d'une observation d'aphémie. *Bulletin de la société française d'anthropologie* : séance du 18 avril 1861, **2**, 235-238.

- (4) Geschwind N. and A. Gallaburda.: **1987**, Cerebral lateralization: biological mechanisms, associations and pathology. 224 p. *Cambridge MIT*.
- (5) Brodmann K. :**1909**, ‘Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde,; J. A. Barth., Leipzig.
- (6) Amunts K. *et al.*: **2010**, Broca’s region: novel organizational principles and multiple receptor mapping. *PLOS Biology* : **8**(9).
- (7) Catani M. *et al.*: **2005**, Perisylvian language networks of the human brain. *Annals of Neurology*: **57**; 8-16.
- (8) Hagoort P.: **2013**, MUC (Memory, Unification, Control) and beyond. *Frontiers in Psychology*. **4**; 1-11, article 416
- (9) Hebb D. O. and J. F. Delafresnaye: **1961**, Distinctive features of learning in the higher animal. *Brain Mechanisms and Learning, Oxford Univ. Press, London*.
- (10) Fedorenko E. and S. L. Thompson-Schill: **2014**, Reworking the language network. *Trends in Cognitive Sciences*: **18**; 120-126.
- (11) Poeppel D.: **2014**, The neuroanatomic and neurophysiological infrastructure for speech and language. *Current Opinion in Neurobiology*: **28**; 142-149.
- (12) Chomsky N.: **1980**, Rules and representations. *Columbia Univ. Press, New York*.
- (13) Dehaene-Lambertz G. *et al.*: **2010**, Language or music, mother or Mozart? structural and environmental influences on infants’ language networks. *Brain and Language*: **114**; 53-65.
- (14) Leroy F. *et al.*: **2011**, Early maturation of the linguistic dorsal pathway in human infants. *The Journal of Neuroscience*: **31**; 1500-1506.
- (15) Musso M. *et al.*: **2003**, Broca’s area and the language instinct. *Nature Neuroscience*: **6**; 774-781.
- (16) Marcus G., A. Vouloumanos and I. Sag: **2003**, Does Broca’s play the rules? *Nature Neuroscience*: **6**; 651-652.
- (17) Patel A.: **2003**, Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*: **6**; 674-68.
- (18) Jackendoff. R.: **2002**, Foundations of language. *Oxford Univ. Press, New York*.
- (19) Kunert R. *et al.*: **2015**, Music and language syntax interact in Broca’s area: an fMRI study. *PLUS ONE* **4**.
- (20) Rizzolatti G. et C. Sinigaglia: **2011**, Les neurones miroirs, *Odile Jacob, Paris* .
- (21) Fadiga L., L. Craighero and E. Olivier: **2005**, Human motor cortex excitability during the perception of other’s action. *Cur. Opinion Neurobiol.*: **15**; 213-218.
- (22) Rizzolatti G. and I. Craighero: **2004**, The mirror neuron system. *Annu. Rev. Neurosci.* **27**: 169-192.
- (23) Pazzaglia M.*et al.*: **2008**, Neural underpinnings of gesture discrimination in patients with limb apraxia. *J. Neuroscience*: **28**; 3030-3041.
- (24) Tranel D. *et al.*: **2003**, Neural correlate of conceptual knowledge for action. *Cogn. Neuropsych.* **20**; 409-432.
- (25) Fadiga L., L. Craighero and A. D’Ausilio: **2009**, Broca’s area in language, action and music. *Ann. N.Y. Academy of Science*: **1169**; 448-458.