

Cartographie cérébrale par électrostimulation directe : Le bilinguisme

Brain Mapping by Direct Electrostimulation: the Bilingualism

FE Roux [1], I Djidjeli [1], C Giussani [2], PY Borius [3], JF Démonet [4]

1. INSERM - UMRS 825 - Université de Toulouse - UPS - Pôle Neuroscience.

Service de neurochirurgie - CHRU Toulouse - Hôpital Purpan - Place du Docteur Baylac - TSA 40031 - 31059 Toulouse cedex 9.

2. Neurosurgery - Department of surgery and translational medicine - University of Milano-Bicocca - Italy.

3. Service de neurochirurgie fonctionnelle et stéréotaxique - Hôpital de la Timone - CHRU Marseille.

4. Leenaards Memory Center - Departement of clinical neurosciences - CHUV & University of Lausanne - Switzerland.

Mots clés

- ◆ Bilinguisme
- ◆ Electrostimulation
- ◆ Cartographie cérébrale
- ◆ Tumeur cérébrale

Résumé

Objectifs. La description chez des patients bilingues, victimes de lésions cérébrales d'aphasies dissociées a suscité des interrogations sur l'organisation cérébrale des langues. Depuis 1997, nous avons étudié l'organisation des aires du langage telle qu'elles peuvent être détectées par électrostimulation corticale directe chez ces patients atteints de diverses lésions cérébrales.

Méthode. En tout, 40 patients bilingues (essentiellement français/anglais, espagnols ou occitans) ont été étudiés sur 15 ans. Différentes tâches du langage ont été testées dont la dénomination, la lecture et une fois l'écriture ; sept patients ont été testés avec des tâches de traduction.

Résultats. Une majorité de sites du langage sont communs aux langues parlées par les sujets et majoritairement localisés dans les aires de Broca et Wernicke sur de toutes petites zones corticales (<1cm²). Toutefois, nous avons démontré que certains sites impliqués dans des tâches de dénomination ou de lecture pouvaient être spécifiques : 1) à une langue donnée pour une tâche du langage ; 2) à une tâche donnée pour deux langues ; 3) à une langue pour deux tâches.

L'approche chirurgicale a été modifiée dans presque la moitié des cas (18 sur 40) du fait de ces données. Les capacités de traduction d'une langue à l'autre seraient plus en rapport avec les structures profondes cérébrales.

Conclusions. En pratique lors des chirurgies en zones du langage, nous recommandons de tester toutes les langues parlées par les patients bilingues opérés de tumeur cérébrale.

Keywords

- ◆ Bilingualism
- ◆ Electrostimulation
- ◆ Brain mapping
- ◆ Brain tumor

Abstract

Objectives: The organization of the language in the brain of bilingual people is controversial since the description of dissociated aphasias after strokes. Since 1997, we have studied by electrostimulation the organization of the language areas of bilinguals operated on for various brain lesions.

Methods: Forty bilingual patients were studied over 15 years in our department by electrostimulation during neurosurgical brain mappings. Different tasks were used: mainly naming and reading, but also in some cases writing and translating.

Results: A majority of language areas are common in bilinguals and are mainly located in Broca's and Wernicke's regions in small areas of cortex (<1cm²). However, we demonstrated that some areas involved in naming or reading tasks could be specific: 1) to a task and a language, 2) to a given task for two languages, 3) to a language but for two tasks.

The initial surgical approach was changed according to these data in 18 cases over 40. Capacity of translation from one language to another would be more related with the deep brain structures.

Conclusions: In practice during brain surgery in areas of language, when a brain mapping we needed, we recommend testing all languages spoken by bilingual patients.

De très nombreuses sources considèrent généralement que la majorité de la population mondiale (1,2) parle plus d'une langue bien que la notion « être bilingue » soit sujette à de nombreuses controverses. Entre la capacité de se faire com-

prendre dans une langue et celle de pouvoir traduire en direct une conversation ou des textes difficiles d'une langue à l'autre, les variations peuvent être importantes (2). L'organisation anatomique et fonctionnelle des langues dans le cerveau

Correspondance :

Franck-Emmanuel Roux, INSERM - UMRS 825 - Université de Toulouse - UPS - Pôle Neuroscience.

Service de neurochirurgie - CHRU Toulouse - Hôpital Purpan - Place du Docteur Baylac - TSA 40031 - 31059 Toulouse cedex 9

E-mail : franck_emmanuel.roux@yahoo.fr

Abréviations : IRMF : IRM fonctionnelle

Disponible en ligne sur www.acad-chirurgie.fr

1634-0647 - © 2014 Académie nationale de chirurgie. Tous droits réservés.

est un sujet très débattu depuis la moitié du XIX^{ème} siècle. En ce qui concerne le bilinguisme, le sujet est presque concomitant à la découverte des localisations cérébrales du langage par Broca entre les années 1861 et 1865. En effet dès 1867, un médecin écossais, Scoreby-Jackson a fait l'hypothèse de localisations spécifiques pour chaque langue parlée par un sujet. Les facteurs qui peuvent aussi influencer l'organisation (spécifique ou pas) des langues chez les bilingues pourraient aussi être très nombreux.

Notre équipe utilise pour cartographier le cerveau l'électrostimulation corticale ou sous corticale directe lors d'opérations de neurochirurgie. Cette méthode nous a permis d'étudier certains aspects anatomo-fonctionnels du cerveau liés au bilinguisme. Si certains aspects linguistiques n'ont pas pu être envisagés, l'extrême précision anatomique de la technique a permis de réaliser certaines cartographies fines en rapport avec des tâches du langage réalisées par les bilingues. Dans cet article, nous résumons notre expérience acquise sur 40 patients bilingues depuis 15 ans et publiée en détail ailleurs (3-6).

Matériels et méthodes

Depuis 1997, tous les patients parlant au moins deux langues devant être opérés de lésions cérébrales diverses en zone du langage (essentiellement tumeurs et malformations vasculaires cérébrales) ont été systématiquement étudiés en utilisant la méthode d'électrostimulation corticale directe lors de chirurgies dites « éveillées ». Les patients avaient presque tous le français comme langue maternelle (sauf deux patients anglais et trois italiens). Les secondes langues étudiées étaient pour la majorité d'entre elles l'anglais, l'espagnol ou l'occitan. Brièvement, cette technique de cartographie cérébrale est utilisée lors de chirurgies où le patient est dans un premier temps endormi (mais pas intubé) puis réveillé pour réaliser la cartographie cérébrale à l'aide d'une petite électrode qui envoie un petit courant électrique que le patient ne ressent pas ; extrêmement précise et utilisée depuis plus d'un siècle (7), cette technique de cartographie cérébrale permet d'améliorer, de sécuriser les gestes d'exérèse de lésions cérébrales en zones fonctionnelles (8). Une fois les données recueillies, le patient peut être ré-endormi.

Nous avons considéré comme patient bilingue les patients capables de s'exprimer dans deux langues ; la notion d'à partir de quand on considère que quelqu'un est bilingue étant controversée, nous avons pensé que si un patient nous disait se servir de deux langues dans sa vie de tous les jours et était capable de dénommer avec moins de 5 % d'erreurs les 80 objets du test « DO80 » (9) dans les deux langues nous pouvions lui proposer de tester ses deux langues pendant l'intervention.

De très nombreux facteurs peuvent intervenir dans la maîtrise d'une langue et dans son organisation cérébrale. Nous n'avons pas voulu étudier d'autres facteurs que la possible influence des tâches du langage que l'on peut utiliser pour tester les bilingues. Des variables comme l'âge d'acquisition, le degré de maîtrise, le type de langue parlée (entre autres...) ont été considérés comme très complexes et, peut-être, peu significatifs sur un nombre réduit de patients testés.

La cartographie cérébrale de chaque patient a été filmée. Des petites étiquettes signalant les résultats positifs de l'électrostimulation ont été posées sur les zones fonctionnelles et photographiées. Un compte rendu détaillé écrit de ces résultats a été intégré dans un tableau Excel avec les coordonnées Talairach de chaque stimulation positive. L'ensemble de ces données de cartographie cérébrale a été recueilli prospectivement par la même personne pendant 15 ans (premier auteur

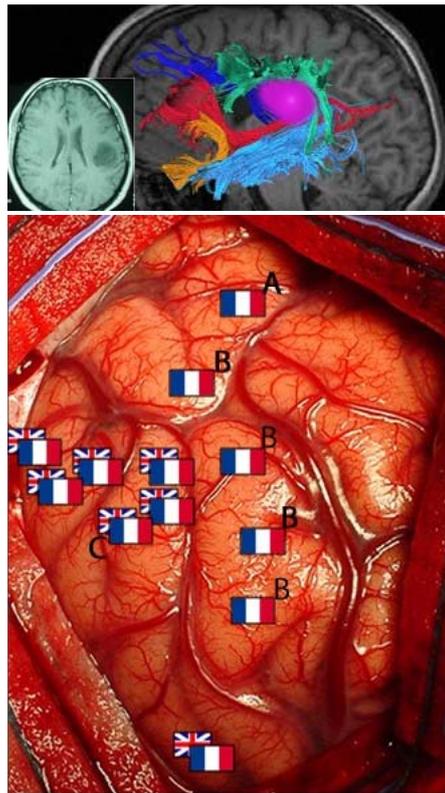


Figure 1 : Patient droitier bilingue Anglais (Langue maternelle) et Français (Langue apprise vers 10 ans), vivant en France depuis de nombreuses années. Patient atteint d'une lésion gliale de bas grade dans le lobe pariétal inférieur gauche (IRM et tractographie en haut de l'image) révélée par plusieurs crises d'épilepsie. Ce patient n'avait pas de troubles du langage. La cartographie cérébrale avec ces deux langues a permis de mettre en évidence ;

- en A, un site cortical où le patient ne faisait des erreurs qu'en français pour la dénomination et la lecture ;
- en B, quatre sites où le patient ne faisait des erreurs que pour la lecture en français ;
- en C, un site où le patient faisait des erreurs en français et en anglais mais que pour les tâches de lecture.

Enfin, le reste des sites étaient commun aux deux langues et aux deux tâches. L'approche chirurgicale a été modifiée par les données de cette cartographie corticale faite dans les deux langues.

de ce mémoire) alors que tous les chirurgiens du service de Neurochirurgie de l'hôpital Purpan ont participé à cette étude lorsque l'indication d'une chirurgie éveillée chez un de leur patient bilingue était posée.

Résultats

Un total de 40 patients, définis comme bilingues, ont été testés ; un patient a été testé avec trois langues et une autre avec quatre langues. Les tâches utilisées pour les cartographies cérébrales et faites en deux langues ont consisté chez tous les patients en une tâche de dénomination et une de lecture. Un patient a été aussi testé en utilisant une tâche d'écriture en deux langues (français et arabe). Sept patients dont l'activité professionnelle impliquait des tâches de traduction ont aussi été testés en utilisant des tâches de traduction (traduire oralement un texte lu de la langue 2 en langue 1). Certains patients en fonction de la zone étudiée ont été testés avec d'autres tâches mais en une seule langue ou avec des tâches motrices.

Les interférences détectées par électrostimulation étaient localisées sur des petites zones corticales de moins de 1 cm² que nous avons appelées « sites ». Le déplacement de l'électrode de moins d'un centimètre faisait souvent disparaître l'interférence détectée précédemment montrant le caractère extrêmement localisé et précis des réponses retrouvées. Ces sites d'interférence aux tâches du langage ont été très majoritairement retrouvés sur les zones classiques du langage de l'hémisphère gauche (Broca et Wernicke).

Un total de 91 sites d'interférence à la tâche de dénomination communs aux deux langues ont été retrouvés ; 20 de ces sites corticaux ne provoquaient pas d'interférence lors de la tâche de lecture (ils étaient « tâche spécifique » pour les deux langues). Trente sites d'interférence spécifique à la dénomination pour une langue ont été identifiés.

Un total de 119 sites d'interférence à la tâche de lecture communs aux deux langues ont été retrouvés ; 48 de ces sites corticaux ne provoquaient pas d'interférence lors de la tâche

de dénomination (ils étaient « tâche spécifique » pour les deux langues). Trente-quatre sites d'interférence spécifique à la lecture pour une langue ont été identifiés.

Un total de 12 sites a été retrouvé, spécifiques pour une langue et pour les deux tâches (lecture et dénomination).

Au total donc nous avons identifié des sites communs aux deux langues pour la tâche de dénomination et de lecture, des sites « tâche spécifique » pour les deux langues, des sites « langue spécifique » pour les deux tâches et enfin des sites langue et tâche spécifiques (Fig.1).

Les tâches de traduction ne nous ont pas permis de retrouver des aires spécifiquement impliquées dans la traduction orale d'un texte. Sur les 26 sites corticaux provoquant des interférences chez ces sept patients, seulement trois provoquaient aussi des interférences à la traduction. Aucune aire spécifique à une écriture donnée n'a été retrouvée chez le patient testé par une tâche d'écriture en français et en arabe.

L'ajout de la cartographie cérébrale d'une autre langue chez ces 40 patients bilingues nous a fait modifier notre geste chirurgical dans 18 cas, essentiellement en modifiant notre voie d'abord.

Discussion

Les dissociations des fonctions du langage observées lors d'aphasies d'abord et ensuite dans les récupérations de ces mêmes aphasies chez les patients parlant plus d'une langue sont des phénomènes qui ont suscité bien des interprétations et des controverses. Les premières descriptions dans la littérature occidentale moderne remontent au début du XIX^{ème} siècle avec notamment Lordat (10). Les publications sur le sujet évoquent soit des pertes plus importantes du langage le plus récemment acquis ou du plus ancien (langue maternelle) chez ces patients atteints de pathologies cérébrales diverses (11). Certaines de ces premières publications décrivent que ces patients bilingues peuvent aussi dissocier leurs types d'aphasies comme ce patient décrit par Rinckenback (11) qui pouvait après un probable accident vasculaire cérébral comprendre l'allemand et le français sans problème mais ne pouvait s'exprimer qu'en allemand (aphasie de Broca en français). Si Adler en 1889 écrit que « *différentes cellules cérébrales pourraient s'être développées pour les différentes langues* » (12), Pitres qui publie en 1895 la première grande monographie sur le sujet considère que les langues ne sont pas organisées différemment dans le cerveau des bilingues (13). Tout au long du XX^{ème} siècle, différentes descriptions de patients avec des aphasies dissociées vont participer au débat sur l'organisation des langues. Dénes décrit une patiente parfaitement trilingue victime d'un accident vasculaire cérébral qui a beaucoup plus de difficultés avec sa langue maternelle (l'allemand) ainsi que la lecture des notes de musique qu'avec l'italien, le français ainsi que la lecture des lettres (14). Déroutés après ces descriptions ne semblant obéir à aucune loi, certains feront l'hypothèse que le cerveau droit est impliqué dans le langage des bilingues (15) alors que Pözl en 1925 pense pour la première fois que le gyrus supramarginal a un rôle important dans les changements de langues chez les bilingues (16). Le débat et les hypothèses vont continuer tout au long du XX^{ème} siècle, centré sur les descriptions de patients victimes d'AVC, avec des rares auteurs plutôt partisans d'une organisation anatomiquement dissociée de certaines fonctions langagières (17) et d'autres plus nombreux plaçant pour une organisation conjointe (18). Travaillant dans un milieu bilingue à Montréal, Penfield et Roberts ont aussi nié dans leur monographie de 1959, l'existence de centres séparés pour les langues (19). En résumé, d'un point de vue anatomofonctionnel, la majorité des auteurs ont considéré jusqu'aux années 1980 que les langues chez les bilingues utilisaient les mêmes substrats anatomiques. La constatation d'aphasies dissociées d'abord et même de phénomènes particuliers com-

me de syndromes aphasiques différents selon les langues - Aphasie de type Broca en Hébreu et Wernicke en Anglais comme chez ce patient décrit par Albert et Oblert en 1975 (20) ; des alexies ou même des agraphies dissociées (patients d'Hinshelwood, de Lyman ou de Wechsler) ; d'épilepsie favorisée par la lecture de l'Hébreu et pas ou peu par la lecture de l'Anglais comme dans le cas de Stevens ; de récupérations d'aphasies là aussi dissociées (patiente de Dimitrijevic en 1940 qui « récupère » une langue qu'elle ne parlait plus depuis l'enfance et incapable de parler sa langue usuelle) ; n'ont pas modifié les positions (1,17,20-24).

Le cas de deux patients bilingues publiés en 1978 par Ojemann et Whitaker (25) qui avaient des aires communes mais aussi spécifiques à une langue lors de leur cartographie cérébrale par électrostimulation a été suivi par trois études de cas utilisant toutes la même technique et avec les mêmes résultats (26-28). Quand on faisait faire une tâche donnée à un patient bilingue, la stimulation d'une zone corticale donnée ne produisait pas les mêmes phénomènes selon la langue ; par exemple le patient pouvait sur une zone s'arrêter de dénommer dans une langue et n'avoir aucun problème dans l'autre langue qu'il maîtrisait. Ceci pouvait être considéré comme une nouvelle approche et une possible explication aux phénomènes décrits depuis longtemps chez les bilingues aphasiques. Les résultats des études utilisant soit le PET scan ou l'IRM fonctionnelle qui ont suivi ont montré par contre des résultats contrastés. Il serait hors de propos dans ce mémoire consacré à au bilinguisme et ses conséquences pratiques en neurochirurgie de détailler les nombreux articles de neurolinguistique au sens large (sémantique, phonétique, syntaxe entre autres) parus sur le sujet depuis le développement important des techniques de neuro-activations (comme l'IRMf ou le PET scan par exemple) au milieu des années 1990. Toutefois, certains ne retrouvaient aucune différence de localisation anatomique entre les bilingues (29,30), alors que d'autres auteurs identifiaient des aires anatomiques pouvant être spécifiques à une langue (31,32). Par exemple, Kim et al en 1997 montrent que les langues acquises tardivement dans la vie pourraient être distinctes au niveau de l'aire de Broca. Deux grands facteurs comme l'âge d'acquisition et le niveau de compétence pourraient influencer l'organisation des langues chez les bilingues : réseaux sous corticaux (33), épaisseur corticale (34) ou des noyaux gris centraux (35), différences d'activations pour diverses tâches en zones du langage (36) ont été notés par différents auteurs. D'une manière générale et même si cela est encore débattu (37), la majorité des auteurs utilisant des techniques d'activation cérébrale ont admis un certain degré de spécificité anatomique pour les langues (32,38-40) chez les bilingues. Comme l'écrivait Michel Paradis en 2004 (41), « *il n'y a aucune preuve que les langues chez les bilingues sont représentées dans des aires différentes du cerveau. Les deux langues sont représentées dans des sous-systèmes micro-anatomiques localisés dans les mêmes régions macro-anatomiques* ».

Les études utilisant l'électrostimulation ont toutes montré la spécificité de certaines aires corticales (42-45). Par exemple, Lucas et al ont retrouvé dans un groupe de 22 patients bilingues des aires communes mais aussi spécifiques en zone temporo-pariétale lors de tâches de dénomination. Au moins tous les patients de leur étude avaient une aire spécifique pour une langue et huit d'entre eux n'avaient que des aires spécifiques dans la zone testée. Une autre équipe, étudiant sept patients parlant au moins trois langues ont là aussi démontré le caractère spécifique à une langue de certaines aires corticales impliquées dans la dénomination d'objets mais aussi qu'il pouvait exister des faisceaux sous corticaux spécifiques à une langue donnée. Ceci n'avait jamais été évoqué auparavant. D'autres avaient noté un déficit sélectif dans une langue après une exérèse d'une malformation artério-veineuse en territoire Sylvien gauche chez une patiente bilingue espagnol-anglais (46).

La cartographie cérébrale par électrostimulation a ses limites bien sûr (5). Elle ne permet de cartographier que la zone cérébrale exposée par la procédure chirurgicale. Il est possible aussi que selon l'intensité de stimulation choisie certaines réponses soient différentes (47) ; même a priori improbable les intensités de stimulation pour une même tâche pourraient être différentes selon la langue. Cette hypothèse n'a pas encore été testée. Enfin, la stimulation électrique délivrée par une électrode maniée à la main ou intégrée dans une plaque posée sur le cortex par une pourrait ne pas porter sur la même zone (2) lors de tests successifs et donc être un facteur de confusion important. Ceci est bien sûr possible mais vraiment peu probable quand l'électrode est intégrée dans une plaque, par usage fixée à la dure mère et donc immobile. D'autre part il est d'usage (et c'est ce que nous faisons toujours) de répéter les tests plusieurs fois sur une même zone pour bien vérifier les résultats des stimulations.

Dans notre série de patients, nous avons démontré que certaines aires corticales cérébrales pouvaient être communes aux langues parlées par les patients pour plusieurs tâches données, mais aussi avoir certaines spécificités selon la langue et la tâche (3,4). Ceci a aussi été retrouvé dans l'étude de Serafini et al. en 2008 (48). L'intérêt chirurgical est évident chez les patients bilingues devant être opérés d'une lésion cérébrale en zone du langage. Ceci peut s'appliquer à la chirurgie des tumeurs cérébrales, des malformations artério-veineuses ou à la chirurgie de l'épilepsie. Si ces patients peuvent bénéficier d'une cartographie cérébrale per opératoire, nous pensons qu'ils devraient être testés en utilisant les deux langues et en fonction de la zone en utilisant plusieurs tâches différentes (notamment une tâche de lecture en zone sylvienne postérieure). Il est possible qu'à l'avenir on démontre que certains faisceaux sous corticaux soient eux aussi langue mais aussi tâche spécifiques.

Remerciements

Les auteurs remercient les Docteurs Boetto, Gigaud, Sabatier et Trémoulet ainsi que tous les anesthésistes du service de Neurochirurgie de l'hôpital Purpan pour leur concours lors des chirurgies éveillées.

Discussion en séance

Question de D Jaeck

En cas d'ablation d'une zone tumorale, y a-t-il une suppléance assurée par les zones de voisinages ?

Réponse

Oui bien sûr. On considère que le phénomène de « plasticité cérébrale » permet à certaines zones cérébrales de prendre en charge certaines fonctions cérébrales initialement assurée par des aires qui auraient été lésées par la tumeur ou par le geste chirurgical.

Question de J Philippon

Dans le cas du bilinguisme après une aphasie, n'y a-t-il pas d'abord une récupération de la langue native ? Quelle est l'importance des liaisons sous corticales par rapport aux zones primaires ?

Réponse

Non en fait la récupération est parfois surprenante. La langue maternelle n'est pas forcément celle qui récupère le mieux. Ceci a beaucoup intrigué les médecins qui prenaient en charge les bilingues victimes d'accident vasculaires cérébraux par exemple. Il semblerait d'après Bello et al. cités dans les e-Mémoires, que certains faisceaux sous corticaux pourraient être aussi spécifiques à une langue donnée. Ceci mérite d'être confirmé par de nouvelles études.

Références

1. Albert ML, Obler LK. The Bilingual Brain. Neuropsychological and Neurolinguistic Aspects of Bilingualism. Academic Press. Nov 1978;pp.304.
2. Fabbro F. The Neurolinguistics of bilingualism. Psychology press LTD. Hove UK. Jan 1999;pp.256.
3. Roux FE, Trémoulet M. Organization of language areas in bilingual patients: a cortical stimulation study. J Neurosurg. 2002;97:857-64.
4. Roux FE, Lubrano V, Lauwers-Cances V, Trémoulet M, Mascott CR, Démonet JF. Intra-operative mapping of cortical areas involved in reading in mono- and bilingual patients. Brain. 2004;127:1796-810.
5. Giussani C, Roux FE, Lubrano V, Gaini SM, Bello L. Review of language organization in bilingual patients: what can we learn from direct brain mapping? Acta Neurochir. 2007;149:1109-16.
6. Borius PY, Giussani C, Draper L, Roux FE. Sentence translation in proficient bilinguals: a direct electrostimulation brain mapping. Cortex. 2012;48:614-22.
7. Cushing, H. A note upon the faradic stimulation of the postcentral gyrus in conscious patients. Brain. 1909;32:44-53.
8. Sacko O, Lauwers-Cances V, Brauge D, Sesay M, Brenner A, Roux FE. Awake craniotomy vs surgery under general anesthesia for resection of supratentorial lesions. Neurosurgery. 2011;68:1192-9.
9. Nespoulous JL, Joannette Y, Lecours AR. Ed. L'Ortho-Edition, Isbergues. France. 1992.
10. Lordat J. Analyse de la parole pour servir à la théorie de divers cas d'alalie et de paralalie. Journal de la société de médecine-pratique de Montpellier. 1843;VII:426.
11. Paradis M. Readings on aphasia in bilinguals and polyglots. Marcel Didier. 1983.
12. Adler A. Beiträge zur Kasuistik und Theorie der Aphasie. Inaugural-Dissertation, medicinischen Fakultät der Universität Breslau. Breslau. 1889.
13. Pitres A. Etude sur l'aphasie des polyglottes. Revue de médecine. 1895;15:873-99.
14. Dénes P. Contribution à l'étude de quelques phénomènes aphasiques. Travail de la clinique des maladies du système nerveux et du quartier des aliénés. Hospice général de Nantes, Paris. 1914.
15. Bychowsky Z. Über die Restitution der nach einem Schädelchuss verlorenen Umgangssprache bei einem Polyglotten. Monatsschrift für Neurologie und Psychiatrie. 1919;45:183-291.
16. Pötzl O. Über die parietal bedingte Aphasie und ihren Einfluss auf das Sprechen mehrerer Sprachen. Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie. 1925;96:100-24.
17. Hinshelwood J. (1902). Four cases of word-blindness. Lancet. 1902;1:358-63.
18. Veyrac G. Etude de l'aphasie chez les sujets polyglottes. Thèse pour le doctorat en médecine. Paris. 1931.
19. Penfield W, Roberts L. Speech and brain mechanisms. Princeton, NJ, Princeton University Press. 1959.
20. Albert ML, Obler LK. Asymmetry of cerebral dominance in Hebrew-English bilinguals. 13th annual meeting of the Academy of Aphasia. Victoria. Oct 1975.
21. Lyman R, Kwan S, Chao W. Left occipitoparietal brain tumor. The Chinese medical journal. 1938;54:491-516.
22. Wechsler A. Dissociative alexia. Archives of Neurology. 1977;34:257.
23. Stevens H. Reading epilepsy. New Engl J Med. 1957;257:165-70.
24. Dimitrijevic D. Zur Frage der Sprachrestitution bei der Aphasie der Polyglotten. Zeitschrift für die gesamte Neurologie und psychiatrie. 1940;168:227-81.
25. Ojemann G, Whitaker HA. The bilingual brain. Arch Neurol. 1978;35:409-12.
26. Rapport RL, Tan CT, Whitaker HA. Language function and dysfunction among Chinese- and English-speaking polyglots: cortical stimulation, wada testing and clinical studies. Brain and language. 1983;8:342-66.
27. Black PM, Ronner SF. Cortical mapping for defining the limits of tumor resection. Neurosurgery. 1987;20:914-19.
28. Pouratian N, Bookheimer SY, O'Farrell AM, Sicotte NL, Cannestra AF, Becker D, Toga AW. Optical imaging of bilingual cortical representations. Case report. J Neurosurg. 2001;93:676-81.
29. Klein D, Zatorre RJ, Milner B, Meyer E, Evans AC. Left putaminal activation when speaking a second language: evidence from PET. Neuro Report. 1994;5:2295-97.
30. Chee MW, Tan EW, Thiel T. Mandarin and English single word processing studied with fMRI. J of Neurosci. 1999;19:3050-6.
31. Kim KHS, Relkin NR, Lee KM, Hirsch J. Distinct cortical areas asso-

- ciated with native and second languages. *Nature*. 1997;388:171-4.
32. Marian V, Spivey M, Hirsch J. Shared and separate systems in bilingual language processing: converging evidence from eye-tracking and brain imaging. *Brain Lang*. 2003;86:70-82.
 33. García-Pentón L, Pérez Fernández A, Iturria-Medina Y, Gillon-Dowens M, Carreiras M. Anatomical connectivity changes in the bilingual brain. *Neuroimage*. 2014;84:495-504.
 34. Klein D, Mok K, Chen JK, Watkins KE. Age of language learning shapes brain structure: A cortical thickness study of bilingual and monolingual individuals. *Brain Lang*. 2014;131:20-4.
 35. Abutalebi J, Della Rosa PA, Gonzaga AK, Keim R, Costa A, Perani D. The role of the left putamen in multilingual language production. *Brain Lang*. 2013;125:307-15.
 36. Buchweitz A, Prat C. The bilingual brain: flexibility and control in the human cortex. *Phys Life Rev*. 2013;10:428-43.
 37. Fabbro F. The bilingual brain: cerebral representation. *Brain Lang*. 2001;79:211-22.
 38. Das T, Padakannaya P, Pugh KR, Singh NC. Neuroimaging reveals dual routes to reading in simultaneous proficient readers of two orthographies. *Neuroimage*. 2011;54:1476-87.
 39. Jamal NI, Piche AW, Napoliello EM, Perfetti CA, Eden GF. Neural basis of single-word reading in Spanish-English bilinguals. *Hum Brain Mapp*. 2012;33:235-45.
 40. Simos OG, Castillo EM, Fletcher JM, Francis DJ, Maestu F. Mapping of receptive language cortex in bilingual volunteers by using MSI. *J Neurosurg*. 2001;95:76-81.
 41. Paradis M. *A Neurolinguistic theory of bilingualism*. John Benjamins. Amstersdam. 2004.
 42. Lucas TH 2nd, McKhann GM 2nd, Ojemann GA. Functional separation of languages in the bilingual brain: a comparison of electrical stimulation language mapping in 25 bilingual patients and 117 monolingual control patients. *J Neurosurg*. 2004;101:449-57.
 43. Walker JA, Quinones-Hinojosa A, Berger MS. Intraoperative speech mapping in 17 bilingual patients undergoing resection of a mass lesion. *Neurosurgery*. 2004;54:113-8.
 44. Bello L, Acerbi F, Giussani G, Baratta P, Taccone P. Intraoperative language localization in multilingual patients with gliomas. *Neurosurgery*. 2006;59:115-25.
 45. Bilotta F, Stazi E, Delfini R, Rosa G. Language testing during awake "anesthesia" in a bilingual patient with brain lesion adjacent to Wernicke's area. *Anesth Analg*. 2011;112:938-9.
 46. Gomez-Tortosa E, Martin EM, Gavira M, Charbel F, Ausman JI. Selective deficit of one language in a bilingual patient following surgery in the left perisylvian area. *Brain Lang*. 1995;48:320-5.
 47. Pouratian N, Cannestra AF, Bookheimer SY, Martin NA, Toga AW. Variability of intraoperative electrocortical stimulation mapping parameters across and within individuals. *J Neurosurg*. 2004;101:458-66.
 48. Serafini S, Gururangan S, Friedman A, Haglund M. Identification of distinct and overlapping cortical areas for bilingual naming and reading using cortical stimulation. Case report. *J Neurosurg Pediatr*. 2008;1:247-54.