

Différenciation hémisphérique auditive par analyse de potentiels évoqués auditifs

R. LE BOUQUIN JEANNES⁽¹⁾, G. FAUCON⁽¹⁾, C. LEMONNIER⁽¹⁾, C. LIEGEOIS CHAUVEL⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image, Inserm EMI 9934, Université de Rennes 1,
Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, France

⁽²⁾Laboratoire de Neurophysiologie et de Neuropsychologie, Inserm EMI 9926, Université de la Méditerranée,
27 Bd Jean Moulin, 13385 Marseille Cedex 5, France
Regine.Le-Bouquin-Jeannes@univ-rennes1.fr

Résumé – Par opposition aux études subjectives adressant le problème de la spécialisation hémisphérique auditive, le but de ce travail est de proposer des mesures objectives permettant de différencier le comportement des deux hémisphères vis-à-vis des stimuli. Pour ce faire, nous disposons de signaux intracérébraux enregistrés en réponse à divers stimuli. Ce papier ne traite que des réponses aux sons verbaux voisé /ba/, non voisé /pa/ et à la voyelle /a/ et présente trois méthodes. La première calcule le coefficient de corrélation entre les réponses à deux stimuli, recueillies sur le même plot. La seconde porte sur l'évolution de la corrélation au cours du temps. Sur les valeurs de corrélation obtenues est effectuée une analyse factorielle des correspondances (AFC) suivie d'une classification hiérarchique ascendante appliquée sur les facteurs de l'AFC. Finalement, les réponses sont caractérisées selon le nombre d'extrema en fonction de l'hémisphère et du stimulus considérés. Les trois méthodes permettent de mettre en avant certains paramètres révélateurs de différence de comportement des deux hémisphères.

Abstract – Some studies deal with the hemispheric differentiation versus speech perception. Our concern is to develop objective methods in order to distinguish the behaviours of the right and left auditory cortices. Intracerebral auditory evoked potentials (AEPs) are recorded in response to different sound stimuli. Three methods are proposed. The first one is based on the correlation coefficient between responses to two different sounds recorded on the same sensors. From this first result, we investigate the correlation variation between AEPs in response to two verbal sounds in the course of time. Then, a correspondence analysis is applied and a hierarchic classification is carried out on the factors of the analysis. Finally, AEPs are filtered to estimate the number of extrema they contain according to the stimulus and the hemisphere we consider. This study allows to extract parameters which are characteristic of the behaviour of each cortex.

1. Introduction

Les potentiels évoqués auditifs (PEA) représentent un marqueur électrophysiologique du fonctionnement du cortex auditif en réponse à un stimulus sonore. Notre étude porte sur l'enregistrement de PEA relevés au niveau du cortex auditif sur des électrodes de profondeur à plots étagés, électrodes implantées dans le contexte d'une exploration stéréoelectroencéphalographique (SEEG) préchirurgicale chez des patients épileptiques ne présentant aucune déficience auditive. Nos travaux visent à une meilleure connaissance de la perception auditive, l'ensemble des connaissances acquises pouvant déboucher à terme sur la détermination de mesures objectives de la perception de la parole chez des sujets malentendants ou ayant certaines pathologies liées à l'audition. L'analyse des PEA consiste à mettre en évidence différentes activités au niveau même des réponses ainsi qu'à déterminer leurs caractéristiques et leur relation vis-à-vis de la stimulation selon l'hémisphère et la structure considérés [1]. Des travaux antérieurs [2,3] ont mis en exergue une différence de comportement des deux hémisphères par rapport à la compréhension du langage. La présente démarche s'attache plus précisément à rechercher, par des mesures objectives, les ressemblances ou les différences sur la façon

dont sont traités différents stimuli, en fonction de l'hémisphère. L'étude porte sur des signaux réels enregistrés par le Laboratoire de Neurophysiologie et de Neuropsychologie de l'Université de la Méditerranée. Les signaux recueillis sont de durée 820 ms et échantillonnés à 1 kHz. Ils sont synchronisés sur l'excitation et commencent 82 ms avant l'application du stimulus. Nous limitons l'étude : *i*) aux plots situés dans les aires auditives primaire et secondaire, *ii*) aux réponses aux sons verbaux voisé /ba/ et non voisé /pa/ ainsi qu'à la voyelle /a/, *iii*) à l'intervalle de temps [0 ; 460 ms] pour éviter la présence de signaux parasites qui peuvent se superposer en fin de réponse après l'extinction du stimulus. Dans notre cas, nous disposons de 18 plots au niveau de l'hémisphère gauche (7 patients) et de 40 plots au niveau de l'hémisphère droit (11 patients).

Les trois méthodes développées afin de mettre en évidence cette différenciation hémisphérique sont présentées successivement. La première s'appuie sur la corrélation entre PEA, calculée sur l'ensemble de l'intervalle d'analyse, puis sur des séquences contiguës appartenant à cet intervalle tandis que la deuxième traite de l'évolution de la corrélation au cours du temps, calculée sur un intervalle de temps fixé. La troisième s'attache au dénombrement des extrema. Les

résultats seront donnés après la présentation de chaque méthode et des conclusions seront finalement tirées.

2. Méthodes et résultats

2.1 Coefficients de corrélation

Dans un premier temps, on s'intéresse à 3 paramètres calculés sur tout l'intervalle d'étude : *i*) le coefficient de corrélation directement calculé entre les signaux temporels (C), *ii*) le coefficient de corrélation maximum obtenu entre les signaux décalés temporellement (C_{max}), *iii*) la différence entre ces deux coefficients ($C_{max} - C$). Le tableau 1 donne les valeurs moyennes de ces trois grandeurs calculées entre les réponses sur le même plot aux stimuli /a/, /pa/, /ba/ (deux à deux) sur l'ensemble de la base de données.

TAB. 1. Moyennes des coefficients de corrélation C et C_{max} et de leurs différences (G : hémisphère gauche, D : hémisphère droit)

	C		C_{max}		$C_{max} - C$	
	G	D	G	D	G	D
ba/pa	0.63	0.6	0.82	0.85	0.18	0.22
ba/a	0.61	0.61	0.82	0.8	0.2	0.17
pa/a	0.72	0.8	0.84	0.88	0.11	0.07

On peut noter la différence entre les corrélations mesurées directement sur signaux et celles obtenues après recalage. Pour les corrélations faisant intervenir le stimulus /ba/, on note que le recalage permet d'augmenter le coefficient de corrélation d'environ 0.6 à 0.8. D'autre part, on remarque le changement de signe de l'inégalité en passant de l'hémisphère gauche à l'hémisphère droit sur les corrélations entre /ba/ et /pa/ avec et sans recalage. Les différences sur les moyennes de corrélation obtenues dans chaque hémisphère n'indiquent pas une spécialisation hémisphérique très nette. Ceci peut être dû à un calcul de corrélation sur toute la durée du signal pouvant atténuer des différences locales. Ces résultats nous ont conduits à une étude plus fine des signaux. En effet, la démarche visuelle donnée en [2] a permis notamment d'identifier une composante supplémentaire présente dans le signal engendré au niveau de l'hémisphère gauche par le stimulus /ba/ par rapport à celui engendré par le stimulus /pa/, alors que cette composante ne se retrouve pas dans l'hémisphère droit. Les Figures 1 et 2 représentent des exemples de réponses aux signaux /ba/ et /pa/ pour un plot respectivement choisi dans chaque hémisphère. Sur l'ensemble de la base de données, nous avons décelé visuellement cette composante supplémentaire dans 89% des signaux enregistrés dans l'hémisphère gauche et dans 30% à droite. Nous avons alors choisi de considérer le coefficient de corrélation sur différents intervalles. Dans le cas de la figure 2, l'onde supplémentaire apparaît entre 220 et 360 ms. Aussi, considérons-nous un coefficient de corrélation local calculé sur les intervalles [0 ; 240 ms], [241 ; 300 ms], [301 ; 360 ms], intervalles choisis a priori, (le regroupement des deux derniers intervalles correspond approximativement à la présence de

l'onde supplémentaire). Cette étude s'est limitée aux sons /ba/ et /pa/. Les coefficients de corrélation sont calculés sur chaque plot puis moyennés pour chaque patient. Pour chaque intervalle, on représente les corrélations par ordre croissant en vue d'une interprétation plus aisée (Figure 3).

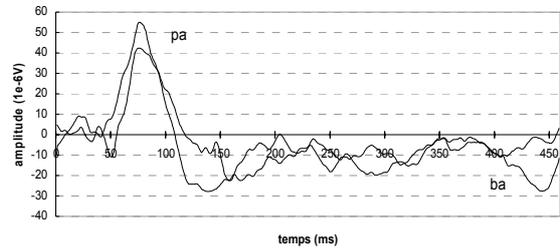


FIG. 1. Exemples de réponses aux stimuli /ba/ et /pa/ dans l'hémisphère droit

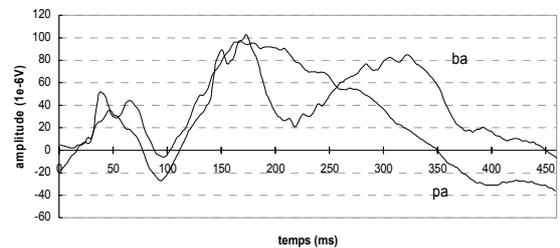


FIG. 2. Exemples de réponses aux stimuli /ba/ et /pa/ dans l'hémisphère gauche

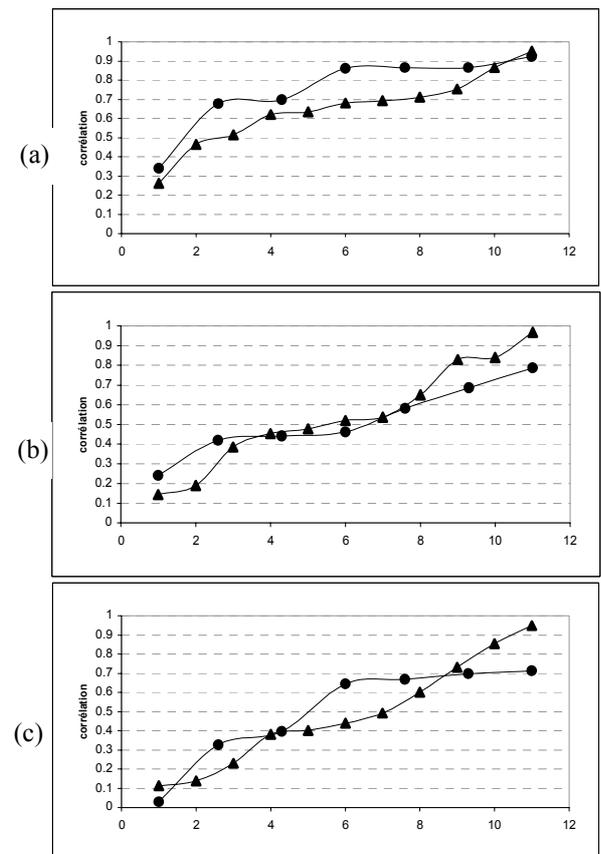


FIG. 3. Mesures de corrélation (a) [0 ; 240 ms], (b) [241 ; 300 ms], (c) [301 ; 360 ms] Les triangles sont relatifs à l'hémisphère droit et les cercles à l'hémisphère gauche

Le nombre de patients enregistrés au niveau de l'hémisphère gauche étant inférieur au nombre de patients enregistrés au niveau de l'hémisphère droit, l'échelle des abscisses de la Figure 3 a été ajustée pour faciliter la comparaison. On montre en particulier que, pour les valeurs de corrélations élevées, la corrélation entre les sons /pa/ et /ba/ est plus faible à gauche qu'à droite, pour les intervalles correspondant à la présence de l'onde supplémentaire.

2.2 Corrélation évolutive

Le choix des intervalles d'étude et l'interprétation des résultats précédents n'étant pas évidents, nous affinons l'analyse précédente en calculant les coefficients de corrélation, à des instants régulièrement espacés (ici toutes les 5 ms), entre les réponses aux sons /pa/ et /ba/ sur la durée de 60 ms qui précède l'instant courant. On obtient ainsi 80 valeurs de corrélation pour chaque plot. La composante supplémentaire ne se manifestant pas toujours au même instant, les profils des corrélations que l'on voudrait semblables peuvent être dissociés. Afin de nous affranchir de cette contrainte, nous proposons de regrouper les corrélations en classes. En d'autres termes, nous allons étudier les histogrammes de chaque plot en nous affranchissant de la variable temps. On réalise alors une analyse factorielle des correspondances (AFC) [4] sur ces corrélations pour comparer les différents profils. Puis, à partir des facteurs de cette analyse, nous effectuons une classification hiérarchique ascendante [4] selon le critère de Ward [5]. Le premier constat est une étonnante sensibilité de la corrélation en fonction de l'instant d'analyse, puisqu'une translation de 10 ms suffit à faire varier brutalement la corrélation. Un exemple est donné sur la Figure 4.

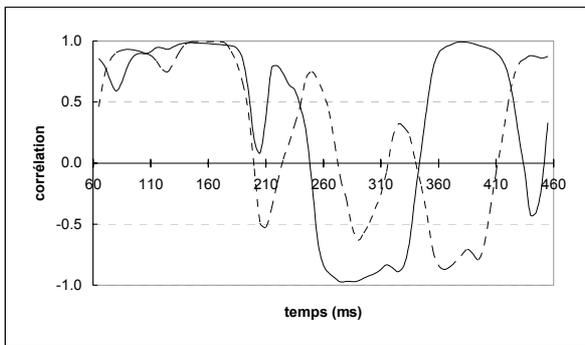


FIG. 4. Mesure de corrélation évolutive
Plot présentant une composante supplémentaire en réponse au son /ba/ (trait plein), plot ne présentant aucune composante supplémentaire en réponse au son /ba/ (pointillés)

Pour les plots présentant une composante supplémentaire en réponse au son /ba/, la première chute de corrélation (de +1 à -1) s'identifie parfaitement avec l'apparition de cette composante. La variabilité de la corrélation est plus aléatoire sur les plots pour lesquels on ne détecte visuellement aucune composante supplémentaire. Afin de confirmer cette différence, nous effectuons une analyse factorielle des profils des corrélations évolutives pour chaque plot. Sur le premier axe factoriel de l'AFC qui représente 38% de l'inertie totale du tableau de contingence, on note une opposition entre les plots présentant une composante supplémentaire et les autres. L'analyse des histogrammes de corrélation montre, qu'en présence d'une composante supplémentaire, la densité est élevée pour de fortes valeurs de la corrélation prise en module, cette tendance étant plus marquée pour une corrélation positive. Dans l'autre cas, la distribution apparaît plus uniforme. Même si les densités pour les fortes valeurs de la corrélation sont importantes, elles le sont beaucoup moins que dans le cas précédent, le nombre de valeurs de la corrélation dans les classes intermédiaires ayant augmenté. Ceci indique bien l'existence tendancielle d'un profil particulier pour les 2 populations de plots étudiées. Le second axe factoriel représente 30% de l'inertie totale : cet axe permet d'opposer les corrélations négatives aux corrélations positives mais la tendance à séparer nos deux populations est nettement moins marquée que sur le premier axe. La Figure 5 indique les résultats de la classification hiérarchique appliquée aux facteurs de l'AFC, où les indices 1 et 0 indiquent respectivement la présence et l'absence de l'onde supplémentaire en réponse au son /ba/ (suivant une détection visuelle) et où G et D représentent respectivement les plots situés dans les hémisphères gauche et droit. On note une dissociation très nette de 2 populations de plots, la majorité des plots de la classe 1 (84%) présente une composante supplémentaire tandis qu'une forte majorité de la classe 3 (85%) n'en présente pas, la classe 2 ne comprenant que 3 plots jugés atypiques. En conséquence, l'analyse de la corrélation évolutive aboutit effectivement à la différenciation des plots vis-à-vis de l'existence d'une composante supplémentaire. Si l'on examine la division de la population en fonction de l'hémisphère, on aboutit à un résultat intéressant : on constate une homogénéité du côté gauche, pour lequel on met en évidence quasi-systématiquement une composante supplémentaire. Néanmoins, certains plots droits se mêlent aux plots gauches, cette instabilité révélant des différences au niveau du traitement du signal opéré dans l'hémisphère droit. Ce résultat peut s'expliquer par une dominance bilatérale pour le langage chez des patients enregistrés au niveau du cortex droit qui présentent cette composante.

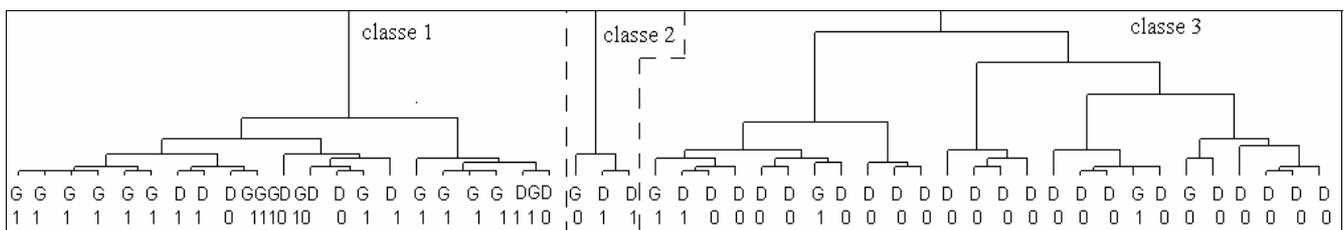


FIG. 5. Résultats de la classification hiérarchique

2.3 Décompte des extrema

D'après l'analyse visuelle, une composante supplémentaire apparaît dans les réponses au son /ba/ dans l'hémisphère gauche. L'idée simple qui est retenue ici est de faire un décompte des extrema. Etant donné la nature bruitée des PEA, il est nécessaire de procéder préalablement à un lissage. Celui-ci est effectué par moyenne mobile, symétrique, d'ordre 31, avec équipondération des échantillons.

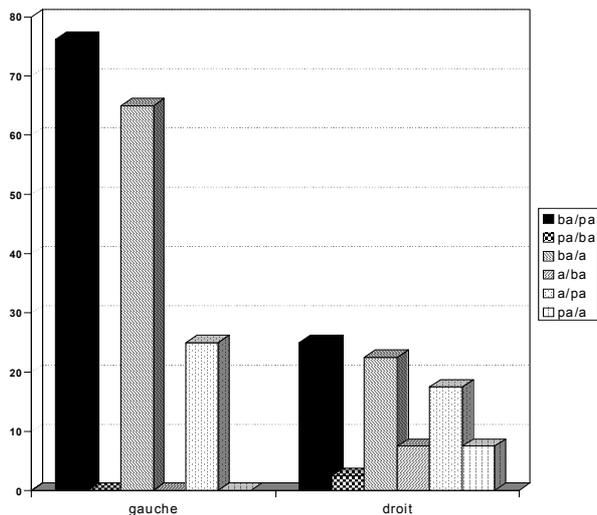


Fig. 6. Pourcentage de plots où le son /x/ possède une composante supplémentaire par rapport au son /y/

Pour chaque plot, on compte le nombre d'extrema sur les PEA recueillis et filtrés, pour les stimuli /ba/, /pa/, /a/. On compare ensuite le nombre d'extrema entre stimuli pour en déduire le pourcentage de plots où un son /x/ possède une composante supplémentaire par rapport au son /y/ et réciproquement.

La figure 6 représente ces pourcentages pour chacun des hémisphères. On constate que dans l'hémisphère gauche, le son /ba/ présente une onde supplémentaire par rapport au son /pa/ (respectivement /a/) dans 76% (respectivement 65%) des cas. Pour l'hémisphère gauche, il n'y a jamais de composante supplémentaire du /pa/ par rapport au /ba/, de même du /a/ par rapport au /ba/, et du /pa/ par rapport au /a/. Les résultats dans l'hémisphère droit sont totalement différents puisque, quelle que soit la comparaison effectuée, la proportion varie entre 2.5% et 25%, ce qui indique que, dans cet hémisphère, le nombre d'extrema varie très peu vis-à-vis du stimulus.

3. Conclusion

La première approche a montré l'importance du décalage temporel sur les mesures de relations entre signaux. L'interprétation des résultats doit tenir compte du recalage appliqué pour obtenir le coefficient de corrélation maximum. La fusion des résultats d'analyse appliquée aux signaux recalés et non recalés peut apporter un supplément d'information. D'autre part, nous avons montré que les valeurs des corrélations entre les sons /ba/ et /pa/ calculées pour

l'hémisphère gauche chutaient lors de l'apparition d'une onde supplémentaire.

Le second outil développé est basé sur les valeurs de corrélations au cours du temps entre réponses aux stimuli verbaux /ba/ et /pa/, corrélations sur lesquelles on applique une analyse factorielle des correspondances. L'étude montre des différences de comportement des plots présentant ou non une composante supplémentaire sur un intervalle de temps délimité et va dans le sens d'une différenciation hémisphérique.

La troisième méthode basée sur un critère très simple et découlant de l'observation visuelle fait apparaître une différence notable de comportement des deux hémisphères en raison de la présence d'une composante supplémentaire.

Nous pensons néanmoins que la différenciation hémisphérique ne se limite pas à cette onde supplémentaire et qu'il faut extraire d'autres informations à partir du signal. De plus, il semble que l'estimation de paramètres doit être locale, les différences de comportement pouvant être très localisées. Vis-à-vis des résultats obtenus précédemment, notre démarche actuelle s'inscrit dans l'étude des différents extrema, aussi bien en amplitude qu'en latence.

Références

- [1] S.P. Springer, G. Deutsch, *Cerveau gauche, cerveau droit. A la lumière des neurosciences*, Editions De Boeck Université, 2000.
- [2] C. Liégeois-Chauvel, J.B. de Graaf, V. Laguitton, P. Chauvel, *Specialization of left auditory cortex for speech perception in man based on temporal coding*, *Cerebral Cortex*, 9 : 484-496, 1999.
- [3] C. Liégeois-Chauvel, K. Giraud, J.M. Badier, P. Marquis, P. Chauvel, *Intracerebral evoked potentials in pitch perception reveal a functional asymmetry of the human auditory cortex*, *Ann. Acad. Sc. N.Y.*, 930: 117-133, 2001.
- [4] L. Lebart, A. Morineau, M. Piron, *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, Editions Dunod, 2^{ème} édition, 1997.
- [5] J. Ward, *Hierarchical grouping to optimize an objective function*, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 58, pp. 236-244, 1963.