

# Étude et analyse statistique de potentiels évoqués auditifs sous l'influence de radiofréquences

E. MABY<sup>1</sup>, R. LE BOUQUIN-JEANNES<sup>1</sup>, G. FAUCON<sup>1</sup>, E. BARBEAU<sup>2</sup>, C. LIEGEOIS-CHAUVEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image, INSERM EMI 9934, Université de Rennes 1  
Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, Fax : 02 99 28 69 17.

<sup>2</sup>Laboratoire de Neurophysiologie et de Neuropsychologie, INSERM EMI 9926, Faculté de Médecine  
27, Boulevard Jean Moulin, 13885 Marseille Cedex, Fax : 04 91 38 58 26.

[Emmanuel.Maby@univ-rennes1.fr](mailto:Emmanuel.Maby@univ-rennes1.fr), [Regine.Le-Bouquin@univ-rennes1.fr](mailto:Regine.Le-Bouquin@univ-rennes1.fr), [Gerard.Faucon@univ-rennes1.fr](mailto:Gerard.Faucon@univ-rennes1.fr), [Emmanuel.Barbeau@medecine.univ-mrs.fr](mailto:Emmanuel.Barbeau@medecine.univ-mrs.fr), [Catherine.Liegeois@medecine.univ-mrs.fr](mailto:Catherine.Liegeois@medecine.univ-mrs.fr)

**Résumé** – Ce papier traite de l'étude de l'influence des champs radioélectriques émis par les téléphones portables sur l'activité cérébrale humaine. Notre travail est réalisé sur le système auditif à partir du recueil de Potentiels Evoqués Auditifs (PEA) à la surface du scalp. Le protocole permet de comparer les PEA enregistrés avec ou sans exposition aux radiofréquences. Les stimuli sont deux sons purs et un système permet de contrôler la puissance des radiofréquences émises. Pour obtenir une référence et tenir compte de la fatigue, l'effet placebo est également considéré. Notre étude consiste à mettre en œuvre des mesures fiables qui soient révélatrices de certains changements ou de certaines constances dans les signaux enregistrés. Elles concernent ici les corrélations calculées entre signaux moyens, les amplitudes de l'onde N100, ainsi que les corrélations entre ces amplitudes. La comparaison des corrélations calculées entre signaux recueillis avec et sans exposition aux radiofréquences fait apparaître une différence. Un point important de cette étude concerne le rôle de l'effet de fatigue dans l'analyse des PEA.

**Abstract** – *This paper deals with the study of the influence of radiofrequency fields emitted by mobile telephones on human cerebral activity. Our work is carried out on the auditory system thanks to Auditory Evoked Potentials (AEPs) recorded on the scalp of healthy humans. The protocol allows to compare AEPs recorded with or without exposure. The stimuli are two pure tones and a system allows to control the power of radiofrequency fields. To get a reference and to take into account the listener's fatigue, placebo effect is also considered. In this paper, some measures are investigated to detect a possible difference due to radiofrequency fields. They concern the correlations computed between averaged signals, the amplitudes of the wave N100, as well as the correlations between these amplitudes. The comparison of correlations computed between signals recorded with and without exposure to radiofrequency fields reveals some difference. An important point is that the listener's fatigue plays some role in the analysis of the AEPs.*

## 1. Contexte

Ce travail s'inscrit dans le projet RNRT COMOBIO (COmmunications MObiles et BIOlogie) et traite de l'influence de champs radioélectriques engendrés par un téléphone portable sur l'activité cérébrale humaine. Il convient dans ce cadre d'analyser les répercussions potentielles des radiofréquences par l'observation de réponses évoquées ou d'activités spontanées. La caractérisation des implications fonctionnelles des radiofréquences passe par l'examen des structures cérébrales les plus proches de la source de rayonnement, en d'autres termes le système auditif et les régions temporales. Le moyen retenu pour notre analyse est l'observation de Potentiels Evoqués Auditifs (PEA) obtenus en réponse à des stimuli sonores externes. La population actuellement à l'étude est constituée de quatorze sujets sains, la seconde, qui sera traitée ultérieurement, est une population constituée de quatorze sujets souffrant d'épilepsie partielle, importante en termes de santé publique et dont la sensibilité aux radiofréquences peut être plus grande que chez les sujets sains.

## 2. Protocole expérimental

Le protocole retenu est le suivant : les stimuli sonores sont des sons purs à 500 Hz et 1 kHz. Ces sons sont envoyés de manière monaurale sur le haut-parleur du combiné téléphonique générant ou non des radiofréquences, le recueil des PEA se faisant pour différentes puissances des radiofréquences. Plus exactement, il existe quatre phases d'enregistrement (dénommées par la suite conditions) : la première se fait en absence de radiofréquences («off»), la seconde en présence de radiofréquences à une puissance minimale («min 1»), la troisième à une puissance maximale («max») et la dernière à une puissance minimale de nouveau («min 2»). Chaque sujet participe à trois séances d'enregistrement : les deux premières séances expérimentales se déroulent comme indiqué ci-avant en ayant le téléphone placé tout à tour près de l'oreille droite (1<sup>ère</sup> séance) et près de l'oreille gauche (2<sup>ème</sup> séance). La troisième séance est réservée soit pour étudier l'effet placebo en enregistrant l'ensemble des réponses lors des 4 phases successives d'enregistrement, mais sans émission des radiofréquences, en conservant les mêmes dénominations pour les 4 phases que celles données lors des séances expérimentales (avec le téléphone portable placé près

de l'oreille droite), soit pour finaliser l'une des deux séances précédentes si des problèmes sont survenus lors de ces enregistrements. Le recueil se fait sur 32 électrodes ou sur 64 électrodes (pour les sujets passant une IRM) placées à la surface du scalp. Les réponses aux stimuli sont recueillies sur une durée de 820 ms et échantillonnées à 1 kHz. Elles sont synchronisées sur l'excitation et leur enregistrement commence 82 ms avant l'application des stimuli. Un total de 250 réponses individuelles pour chaque condition et chaque stimulus est recueilli pour tenir compte du caractère fortement bruité des observations. L'étude peut se faire sur les signaux bruts recueillis ou sur le signal obtenu par moyennage de ces signaux, et dont l'objectif est d'augmenter le rapport signal à bruit. Indiquons dès à présent que, sur les 250 réponses individuelles enregistrées, un rejet maximal de 10% est opéré afin de s'affranchir des signaux présentant des artefacts.

### 3. Méthode

Le manque de connaissances réelles sur l'influence des champs radioélectriques sur l'activité cérébrale humaine rend difficile la prévision des mesures et des procédures statistiques à mettre efficacement en œuvre dans cette étude. L'objectif à atteindre est de trouver des mesures révélatrices de certaines modifications ou de certaines constances dans les PEA dues à l'effet des radiofréquences qui soient pertinentes. Les réponses individuelles présentant de fortes variations, il est apparu opportun de commencer par une étude sur signaux moyens.

#### 3.1 Filtrage des PEA

Le contenu fréquentiel des PEA moyens a révélé la présence de raies aux fréquences 217 Hz, 134 Hz et 84 Hz (figure 1). La première correspond à la fréquence de modulation du signal GSM, les autres sont des fréquences dues à des combinaisons d'harmoniques des fréquences 50 Hz (secteur) et 217 Hz (signal GSM). Ces fréquences apparaissent également sur fantôme et ne correspondent donc pas à des activités électroencéphalographiques induites. Ces fréquences n'étant pas à considérer dans l'analyse statistique ultérieure, nous avons systématiquement appliqué à l'ensemble de la base de données un filtrage passe-bas à 40 Hz.

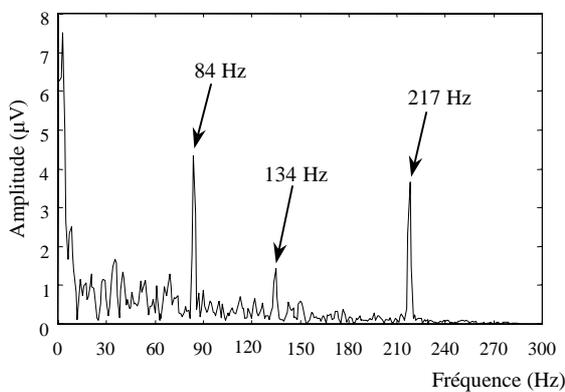


FIG. 1 : Spectre d'un PEA moyen

### 3.2 Sélection des électrodes

Le prétraitement effectué, notre analyse sera restreinte aux électrodes les plus pertinentes, cette limitation se justifiant par une extrême variabilité des réponses. Notre choix a d'abord été visuel et s'est porté sur les électrodes présentant des réponses «typiques» de PEA, ce qui nous a permis de sélectionner 13 électrodes sur l'ensemble des électrodes disponibles. Pour éviter cette sélection visuelle coûteuse en temps, nous avons également procédé à une sélection automatique basée sur le fait que la déformation de certains signaux correspond à une dégradation d'un signal de référence. En isolant la première composante par une analyse en composantes principales (ACP), on estime un degré de relation des signaux avec cette composante utilisée comme référence afin de sélectionner les signaux les plus représentatifs d'un PEA. Cette analyse est réalisée sur une matrice de données  $X(n, p)$  ( $n$  lignes,  $p$  colonnes) représentant  $n$  individus décrits par  $p$  variables quantitatives [1]. Cette analyse s'effectuant sur la totalité du signal et pour 32 électrodes, le nombre d'individus est 820 et celui des variables est 32. Le signal de référence est identifié à la première composante principale de l'analyse de la matrice de données, c'est-à-dire le vecteur propre associé à la plus grande valeur propre de la matrice  $XX^T$  (espace des variables). On extrait d'abord un indice qui correspond à la coordonnée du signal testé sur le premier axe de l'ACP et qui représente la covariance entre ce signal et la première composante principale. Cet indice est ensuite pondéré pour faciliter la discrimination des électrodes. Puis une sélection automatique basée sur l'indice pondéré est effectuée. Cette procédure est réalisée pour chaque sujet, chaque stimulus, en situations placebo et expérimentale pour toutes les conditions, et conduit à garder 14 électrodes pratiquement identiques à celles sélectionnées visuellement (12 similaires) (figure 2). Les résultats présentés dans la suite sont obtenus à partir des PEA recueillis sur les 12 électrodes communes aux deux sélections.

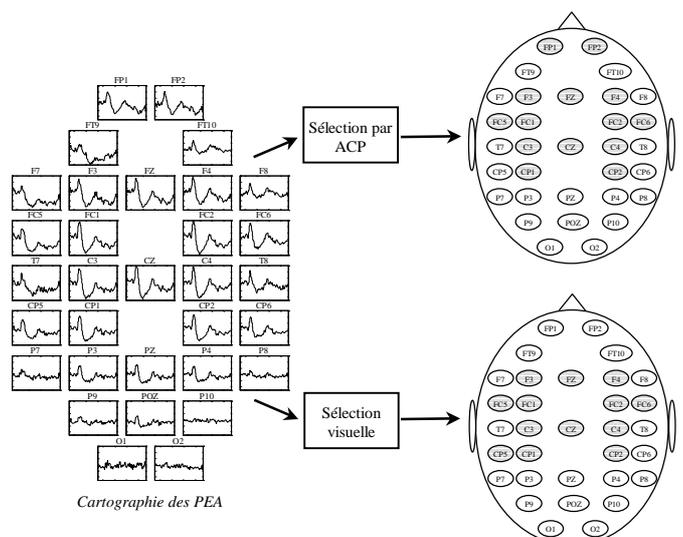


FIG. 2 : Résultats des sélections visuelle et automatique des électrodes (en gris : électrodes conservées)

### 3.3 Paramètres étudiés

#### 3.3.1 Corrélations entre signaux

La démarche consiste à s'intéresser à des méthodes d'analyse de données pour tirer le maximum d'informations à partir de notre base importante et plus particulièrement à des méthodes d'analyse factorielle. Largement utilisée dans la littérature pour l'analyse de potentiels évoqués [2, 3], l'analyse en composantes principales a de nouveau retenu notre attention. L'examen de la matrice de corrélation obtenue à partir de la matrice de données  $X(820,48)$  représentant 820 individus (820 échantillons temporels) décrits par 48 variables (12 électrodes x 4 conditions), permet de savoir quelle relation peut exister entre les signaux moyens obtenus sur les différentes électrodes dans les conditions «off», «min 1», «max» et «min 2», pour 4 sujets, 2 fréquences d'excitation (500 Hz et 1 kHz), en séance expérimentale ou en placebo. Ce lien est exprimé par la corrélation entre deux signaux discrets  $x(k)$  et  $y(k)$ , ( $k$  étant la variable discrète indiquant le temps), calculée de la façon suivante :

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{k=1}^N [x(k) - \bar{x}][y(k) - \bar{y}]}{\sigma_x \sigma_y}$$

où  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  représentent les valeurs moyennes des signaux  $x(k)$  et  $y(k)$ ,  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  sont leurs écarts-types respectifs.  $N$  correspond au nombre de points présents dans chaque signal ( $N = 820$ ).

#### 3.3.2 Corrélations entre premiers maxima (onde N100)

La seconde approche est basée sur l'examen de l'amplitude du premier maximum apparaissant environ 100 ms après l'application du stimulus, correspondant à l'onde N100. Cette composante, souvent considérée dans l'étude des potentiels évoqués auditifs, traduit un processus sensoriel. Là également, nous étudions la matrice de corrélation obtenue après analyse de la matrice de données constituée de 8 individus (amplitudes des N100 relevées sur 4 sujets x 2 stimuli) décrits par 48 variables (12 électrodes x 4 conditions) pour une séance donnée.

#### 3.3.3 Amplitudes de l'onde N100

Dans un dernier temps, on s'intéresse à l'amplitude elle-même de l'onde N100 relevée pour 4 sujets, 2 stimuli, dans des conditions différentes et lors des séances placebo et expérimentale. Un test d'égalité des moyennes appliqué à ces maxima permet de comparer les amplitudes de cette onde dans les différentes conditions.

## 4. Résultats

Les résultats suivants sont obtenus à partir des signaux enregistrés lors des séances expérimentales pour lesquelles le téléphone est placé près de l'oreille droite et lors des séances placebo afin de bénéficier de signaux de référence.

### 4.1 Corrélations entre signaux

La figure 3 représente les histogrammes normalisés des corrélations obtenues en situations placebo et expérimentale. Les corrélations «intra» correspondent aux corrélations calculées pour une même condition et les corrélations «inter» à celles calculées entre deux conditions différentes, soit respectivement 264 valeurs de corrélations «intra» et 864 valeurs de corrélations «inter», par sujet, par séance, par stimulus. Finalement, on dispose de 2112 valeurs de corrélations «intra» (264 x 4 sujets x 2 fréquences) et de 6912 valeurs de corrélations «inter» (864 x 4 sujets x 2 fréquences) pour chaque séance.

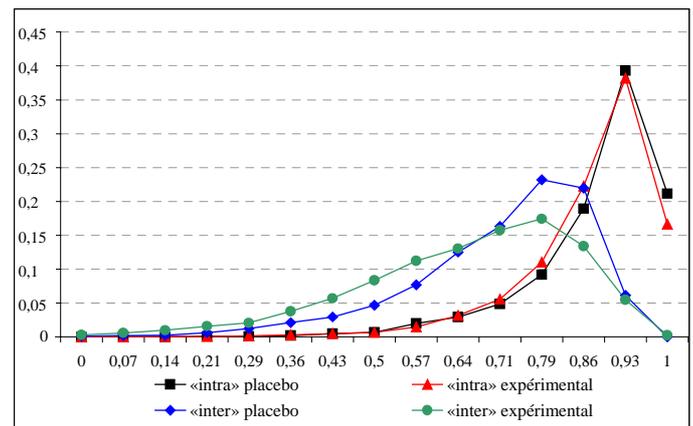


FIG. 3 : Histogrammes des corrélations calculées entre signaux (entre conditions identiques ou différentes, dans les situations placebo et expérimentale)

Au vu de la figure 3, dans les situations placebo et expérimentale, les histogrammes correspondant aux corrélations «intra» semblent comparables (moyennes de 0,88) alors que les corrélations «inter» en situation expérimentale de valeur moyenne plus faible (0,66) que les corrélations «inter» en placebo (0,72) traduisent une plus forte décorrélation des PEA en présence des radiofréquences. Plus avant, nous avons fait un test d'hypothèse d'égalité des moyennes (test de Student) [4] (tableau 1) sur les valeurs de corrélations obtenues, test qui différencie effectivement (pour un risque de 5%) les valeurs de corrélation «inter» entre les situations placebo et expérimentale ( $t = 21,4$ ) ce qui peut se traduire par un effet des radiofréquences. De même, le test de Student différencie les valeurs de corrélations «inter» et «intra» en situation placebo ( $t = 53,6$ ), ce dernier résultat traduisant vraisemblablement l'effet de fatigue du sujet. En outre le test appliqué aux corrélations «intra» et «inter» en situation expérimentale donne une valeur du test  $t$  ( $t = 66,5$ ) supérieure à celle en situation placebo ( $t = 53,6$ ).

TAB. 1 : Résultats du test  $t$  sur les corrélations

	$t$	seuil
«intra» placebo / «intra» expérimental	2,28	1,96
«inter» placebo / «inter» expérimental	21,4	
«intra» placebo / «inter» placebo	53,6	
«intra» expérimental / «inter» expérimental	66,5	

Une analyse plus fine a été conduite pour approfondir les résultats de la première ligne du tableau 1. Nous avons considéré les corrélations calculées entre les signaux recueillis dans une même condition d'émission des radiofréquences.

TAB. 2 : Résultats du test  $t$  sur les corrélations «intra»

	$t$	seuil
«off-off» placebo / «off-off» expérimental	0,89	1,96
«min 1-min 1» placebo / «min 1-min 1» expérimental	0,79	
«max-max» placebo / «max-max» expérimental	2,25	
«min 2-min 2» placebo / «min 2-min 2» expérimental	0,34	

Le tableau 2 indique les résultats du test de Student appliqué à ces corrélations. Ainsi, aucune différence n'est révélée entre ces corrélations calculées entre les signaux obtenus dans les conditions «off», «min 1» ou «min 2» en situations placebo et expérimentale. Par contre, une différence significative apparaît entre les corrélations de la condition «max» entre les situations placebo et expérimentale ( $t=2,25$ ), liée à une diminution de corrélation des PEA enregistrés sur différentes électrodes en présence de radiofréquences à puissance maximale. Cette différence justifie vraisemblablement les résultats obtenus à la 1<sup>ère</sup> ligne du tableau 1.

D'autre part, la différence existant entre les corrélations «inter» en situations placebo et expérimentale est due aux changements significatifs des corrélations (non reportées ici) calculées entre les différentes conditions, les statistiques  $t$  du test de Student étant toujours supérieures au seuil correspondant à un intervalle de confiance de 95 %.

## 4.2 Corrélations entre premiers maxima

Les corrélations sont calculées ici entre les amplitudes de l'onde N100 relevées sur l'ensemble des sujets en situations placebo et expérimentale et pour les différentes conditions.

A partir de l'analyse de la matrice décrite en 3.3.2, on obtient 264 valeurs de corrélations «intra» et 864 valeurs de corrélations «inter» pour chaque situation (placebo ou expérimentale).

On constate que les corrélations «off-off» ne sont pas discriminées entre les situations placebo et expérimentale; il en est de même pour les corrélations «max-max», alors que les corrélations «min 1-min 1» (de même que «min 2-min 2») sont différenciées. Cette incohérence traduit la difficulté d'exploiter la corrélation sur les amplitudes de l'onde N100 sur notre base de données.

## 4.3 Amplitudes de l'onde N100

Les amplitudes de l'onde N100 sont relevées sur 4 sujets, 12 électrodes, pour les 2 stimuli considérés et lors des séances placebo et expérimentale. Pour comparer ces valeurs, on applique le test de Student aux amplitudes relevées lors de conditions d'exposition différentes. Les résultats statistiques sont donnés dans le tableau 3 pour 2 conditions. On remarque qu'en condition «off» ou «max», il n'existe pas de différence significative entre les amplitudes relevées en situation

placebo ( $t=0,23$ ) et expérimentale ( $t=0,67$ ). Les radiofréquences ne semblent pas entraîner de changement significatif sur l'amplitude de l'onde N100. En revanche, une disparité entre les amplitudes relevées pour des phases différentes d'une séance placebo est mise en évidence ce qui semble traduire l'effet de fatigue.

TAB. 3 : Résultats du test  $t$  sur les amplitudes de l'onde N100

	$t$	seuil
«off» placebo / «off» expérimental	0,23	1,97
«max» placebo / «max» expérimental	0,67	
«off» placebo / «max» placebo	7,25	
«off» expérimental / «max» expérimental	6,19	

## 5. Conclusion

Les résultats obtenus à partir des corrélations entre signaux et sur les amplitudes de l'onde N100 révèlent une différence entre signaux placebo enregistrés à des instants espacés traduisant l'effet de fatigue des auditeurs. De plus ils montrent une différence entre signaux placebo et expérimentaux qui tendrait à émettre l'idée d'une diminution de la corrélation entre signaux enregistrés dans des conditions différentes, diminution qui prend en compte l'état de lassitude du sujet. L'analyse sur les signaux placebo montre que l'effet de fatigue sur les grandeurs testées, en l'occurrence les corrélations entre signaux ou les amplitudes de l'onde N100, doit être pris en compte avant toute conclusion sur l'influence des radiofréquences. En outre, d'autres méthodes telles que l'analyse factorielle multiple, l'analyse discriminante ou l'analyse en composantes indépendantes doivent être abordées prochainement afin d'approfondir ces conclusions.

## Remerciements

Ce travail, effectué dans le cadre du projet RNRT COMOBIO, est financé par le Ministère de l'Industrie et est soutenu par l'INSERM.

## Références

- [1] B. Escofier, J. Pages. *Analyses factorielles simples et multiples : objectifs, méthodes et interprétations*. Ed. Dunod, Paris, 1988.
- [2] D.L. Molfese and R.J. Erwin. *Intrahemispheric differentiation of vowels: principal component analysis of auditory evoked responses to computer-synthesized vowels sounds*. Brain and Language, 13, pp. 333-344, 1981.
- [3] R.N. Kavanagh, T.M. Darcey and D.H. Fender. *The dimensionality of the human visual evoked scalp potential*. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 40, pp. 633-644, 1976.
- [4] G. Saporta, *Probabilités, analyse de données et statistique*. Ed. Technip, Paris, 1990.