

Enregistrements simultanés EEG-MEG-SEEG pour évaluer et optimiser les méthodes de traitement du signal

CHRISTIAN BENAR¹, MARMADUKE WOODMAN¹, ANNE-SOPHIE DUBARRY², ROMAIN CARRON³, FABRICE BARTOLOMEI⁴
JEAN-MICHEL BADIER¹

¹ Institut de Neurosciences des Systèmes, INSERM, Aix-Marseille Université, 27 Bd Jean Moulin 13005 Marseille France

² Laboratoire de psychologie cognitive, Aix-Marseille Université, CNRS, LPC UMR 7290, 13331 Marseille, France

³ Service d'électrophysiologie clinique, Hôpital Timone, Assistance Publique - Hôpitaux de Marseille

⁴ Service de neurochirurgie, Hôpital Timone, Assistance Publique - Hôpitaux de Marseille

christian.benar@univ-amu.fr

Résumé - Les méthodes de traitement du signal appliquées à l'EEG ou la magnétoencéphalographie (MEG) permettent d'estimer de manière non-invasive les régions impliquées dans des activités cérébrales, physiologiques ou pathologiques. Elles permettent aussi d'estimer la dynamique spatio-temporelle des réseaux cérébraux correspondants. Des méthodes classiques sont par exemple la localisation de sources, l'analyse en composantes indépendantes ou l'analyse temps-fréquence. Une difficulté est que ces méthodes dépendent d'hypothèses mathématiques, qui facilitent le calcul mais n'ont pas forcément de substrat physiologique. Il est donc nécessaire de valider ces méthodes par une 'réalité terrain'. Dans ce contexte, l'EEG intracérébral obtenu chez des patients en évaluation préchirurgicale d'épilepsie procure une formidable opportunité pour étudier les relations entre les mesures de surface et celle obtenues directement dans le cerveau. Nous discutons ici l'intérêt d'enregistrer simultanément les données EEG, MEG et EEG intracérébral chez ces patients. Les données obtenues permettent 1) de mesurer la sensibilité des données de surface à des événements observés en profondeur 2) de valider les méthodes de traitement du signal 3) de construire des mesures qui combinent deux échelles pour extraire les réseaux cérébraux.

Abstract - Signal processing methods applied to EEG or MEG allow estimating non-invasively the location of cerebral regions involved in physiological or pathological processes. They also give access to the temporal dynamics of such processes. Classical methods are source localization, independent component analysis or time-frequency analysis. One difficult issue stems from the fact that these methods depend strongly on mathematical hypothesis that are difficult to justify physiologically. Thus, it is necessary to validate these methods thanks to some 'ground truth'. In this context, intracerebral EEG obtained in patients during presurgical evaluation of epilepsy give a formidable opportunity for investigating the relations between surface measures and recordings performed directly within the brain. We propose to record simultaneously EEG, MEG and intracerebral EEG in these patients. These signals allow 1) to quantify the sensitivity of surface recordings to events measured in depth 2) to validate the signal processing tools 3) to develop combined measures of cerebral networks at two different scales

1 Introduction: de l'intérêt des enregistrements simultanés

Lors de l'évaluation préchirurgicale de l'épilepsie, il peut être utile d'implanter des électrodes directement dans le cerveau pour définir avec précision les régions responsables des crises. Une technique d'implantation est la SEEG (stereotaxic EEG), qui consiste à implanter les électrodes orthogonalement au plan sagittal grâce à un système de stéréotaxie [1]. de nombreuses études ont comparé les résultats de méthodes de traitement du signal, notamment de localisation de sources, avec les localisations obtenues directement dans le cerveau grâce à la SEEG (voir par exemple [2]), obtenue lors de sessions séparées d'enregistrement. Or, les enregistrements séparés possèdent de sérieuses limitations.

Premièrement, des enregistrements séparés ne permettent pas d'assurer que la même activité est étudiée en surface et en profondeur. En effet, l'activité cérébrale est fluctuante dans le temps et dans l'espace, notamment

au niveau de la taille réseaux impliqués [3], dépendant de facteurs tels que le niveau de vigilance et la médication.

Deuxièmement, des enregistrements séparés ne permettent pas de mesurer les fluctuations conjointes des différentes modalités, ce qui peut renseigner sur leur couplage - comme cela a pu être fait en EEG-IRMf simultanés [4].

Il est donc particulièrement intéressant de pouvoir enregistrer de manière simultanée les signaux de surface et ceux de profondeur. Ainsi, plusieurs études se basent sur des enregistrements simultanés d'EEG de scalp ou de MEG d'un côté et d'EEG intracrânien de l'autre [5, 6]. Pourtant, il semble utile de pouvoir étudier à la fois l'EEG et la MEG pour étudier d'éventuelles différences de sensibilité, en fonction de l'orientation des générateurs [7] ou de la fréquence d'intérêt [8].

Récemment, nous avons montré la faisabilité d'effectuer des enregistrements trimodaux EEG-MEG-SEEG, qui devraient permettre de comparer l'EEG et la

MEG dans leur sensibilité aux sources cérébrales. Nous avons ainsi montré en réponse à des stimulations visuelles qu'il est possible d'obtenir des potentiels évoqués et des localisations de sources concordantes entre les modalités. Nous avons aussi montré qu'il est possible de mesurer une corrélation significative à travers les essais entre les données de surface et de profondeur, dans la fenêtre de temps de la réponse visuelle en potentiel/champ évoqué [9].

Dans cet article, nous présentons différentes stratégies pour utiliser les données simultanées dans la validation et l'optimisation des méthodes non-invasives.

2 De la profondeur vers la surface: sensibilité des mesures non-invasives

Une première utilisation des données simultanées est de marquer des événements en profondeur sur la SEEG, et de moyenniser les signaux en surface en se basant sur ces marqueurs. Cette stratégie a été utilisée pour montrer que l'on peut mesurer un signal en surface correspondant à des activités profondes hippocampiques, si l'on moyenne suffisamment d'événements [10, 11].

La Figure 1 montre un exemple de données simultanées MEG et SEEG de décharges épileptiques. On peut voir qu'en fonction de l'étendue de l'activité visible en profondeur, l'activité est visible ou non en surface, comme cela a été montré pour des grilles surfaciques [12].

3 De la surface vers la profondeur: validation des méthodes de traitement du signal

A l'inverse de la section précédente, il est possible d'utiliser la SEEG pour valider ou comparer des méthodes de traitement du signal appliquées sur les données non invasive.

La figure 2 montre un exemple où nous avons comparé l'analyse en composantes indépendantes (ICA, [13]) et une méthode de filtrage spatiale (le beamformer, [14]) appliquées sur des données MEG. Une détection automatique de pointes a été faite sur les décours temporels résultant, et les données de SEEG ont été moyennées en se basant sur ces marqueurs temporels. Il est ainsi possible de mesurer les plots SEEG où l'activité est significativement liées aux détections faites sur les données de surface. On observe ici que la SEEG valide les mesures non-invasives, et que dans ce cas d'épilepsie focale l'ICA et le beamformer donnent des résultats quasi identiques.

4 Perspective: Fusion multi-échelle

Dans les deux sections précédentes, les données sont utilisées dans un premier temps séparément, puis mises en relation. Une troisième voie serait de traiter ces

données conjointement comme un seul jeu de données multimodale. Par exemple, il serait ainsi possible de calculer la cohérence entre certains capteurs de profondeur (par exemple dans l'hippocampe), qui donnent une vision locale de l'activité, et les résultats de localisation de source au niveau du cortex qui donnent une vision globale des réseaux cérébraux.

5 Conclusion

Nous avons montré qu'une fois les difficultés techniques résolues, les enregistrements simultanés apportent une information qu'il est impossible d'obtenir sur des enregistrements séparés. Les enregistrements trimodaux ouvrent ainsi une voie prometteuse pour comparer non seulement les données non-invasives avec celles invasives de SEEG, mais aussi l'EEG et la MEG entre elles.

Références

- [1] J. Bancaud, R. Angelergues, C. Bernouilli, A. Bonis, M. Bordas-Ferrer, M. Bresson, P. Buser, L. Covello, P. Morel, G. Szikla, A. Takeda, and J. Talairach, "Functional stereotaxic exploration (SEEG) of epilepsy," *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, vol. 28, no. 1, pp. 85-6, Jan, 1970.
- [2] M. Gavaret, J. M. Badier, P. Marquis, A. McGonigal, F. Bartolomei, J. Regis, and P. Chauvel, "Electric source imaging in frontal lobe epilepsy," *J Clin Neurophysiol*, vol. 23, no. 4, pp. 358-70, Aug, 2006.
- [3] J. Badier, and P. Chauvel, "Spatio-temporal characteristics of paroxysmal interictal events in human temporal lobe epilepsy," *J Physiol(Paris)*, vol. 89, pp. 255-264, 1995.
- [4] S. Debener, M. Ullsperger, M. Siegel, K. Fiehler, D. Y. von Cramon, and A. K. Engel, "Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring," *J Neurosci*, vol. 25, no. 50, pp. 11730-7, Dec, 2005.
- [5] J. X. Tao, M. Baldwin, A. Ray, S. Hawes-Ebersole, and J. S. Ebersole, "The impact of cerebral source area and synchrony on recording scalp electroencephalography ictal patterns," *Epilepsia*, vol. 48, no. 11, pp. 2167-76, Nov, 2007.
- [6] M. Santiuste, R. Nowak, A. Russi, T. Tarancon, B. Oliver, E. Ayats, G. Scheler, and G. Graetz, "Simultaneous magnetoencephalography and intracranial EEG registration: technical and clinical aspects," *J Clin Neurophysiol*, vol. 25, no. 6, pp. 331-9, 2008.

- [7] I. Merlet, R. Paetau, L. Garcia-Larrea, K. Uutela, M. L. Granstrom, and F. Mauguiere, "Apparent asynchrony between interictal electric and magnetic spikes," *Neuroreport*, vol. 8, no. 5, pp. 1071-6, Mar 24, 1997.
- [8] S. D. Muthukumaraswamy, and K. D. Singh, "Visual gamma oscillations: the effects of stimulus type, visual field coverage and stimulus motion on MEG and EEG recordings," *Neuroimage*, vol. 69, pp. 223-30, Apr 1, 2013.
- [9] A. S. Dubarry, J. M. Badier, A. Trebuchon-Da Fonseca, M. Gavaret, R. Carron, F. Bartolomei, C. Liegeois-Chauvel, J. Regis, P. Chauvel, F. X. Alario, and C. G. Benar, "Simultaneous recording of MEG, EEG and intracerebral EEG during visual stimulation: from feasibility to single-trial analysis," *Neuroimage*, vol. 99, pp. 548-58, Oct 1, 2014.
- [10] R. Wennberg, T. Valiante, and D. Cheyne, "EEG and MEG in mesial temporal lobe epilepsy: where do the spikes really come from?," *Clin Neurophysiol*, vol. 122, no. 7, pp. 1295-313, Jul, 2011.
- [11] L. Koessler, T. Cecchin, S. Colnat-Coulbois, J. P. Vignal, J. Jonas, H. Vespignani, G. Ramantani, and L. G. Maillard, "Catching the invisible: mesial temporal source contribution to simultaneous EEG and SEEG recordings," *Brain Topogr*, vol. 28, no. 1, pp. 5-20, Jan, 2015.
- [12] J. X. Tao, M. Baldwin, S. Hawes-Ebersole, and J. S. Ebersole, "Cortical substrates of scalp EEG epileptiform discharges," *J Clin Neurophysiol*, vol. 24, no. 2, pp. 96-100, Apr, 2007.
- [13] P. Comon, "Independent component analysis, A new concept?," *Signal Processing*, vol. 36, no. 3, pp. 287-314, 1994.
- [14] B. Van Veen, and K. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," *IEEE assp magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, 1988.

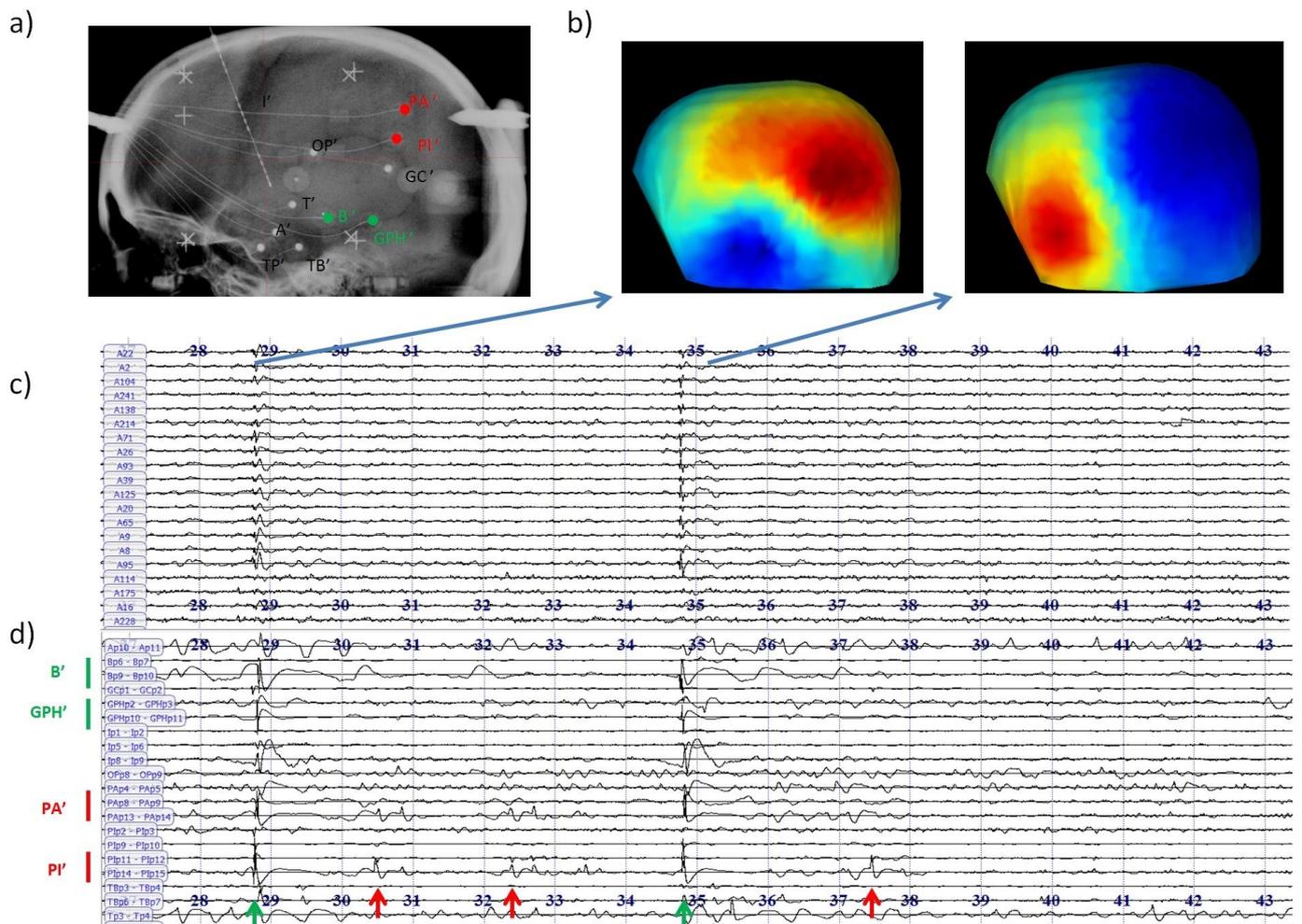


Figure 1 : Données simultanées MEG-SEEG. a) implantation SEEG b) topographies MEG correspondant à des pointes épileptiques visibles en MEG (flèches vertes). Les décharges SEEG limitées spatialement ne se voient pas en MEG (flèches rouges). c) données MEG (données filtrées 1-70 Hz) d) données SEEG simultanées (passe-haut à 1Hz)

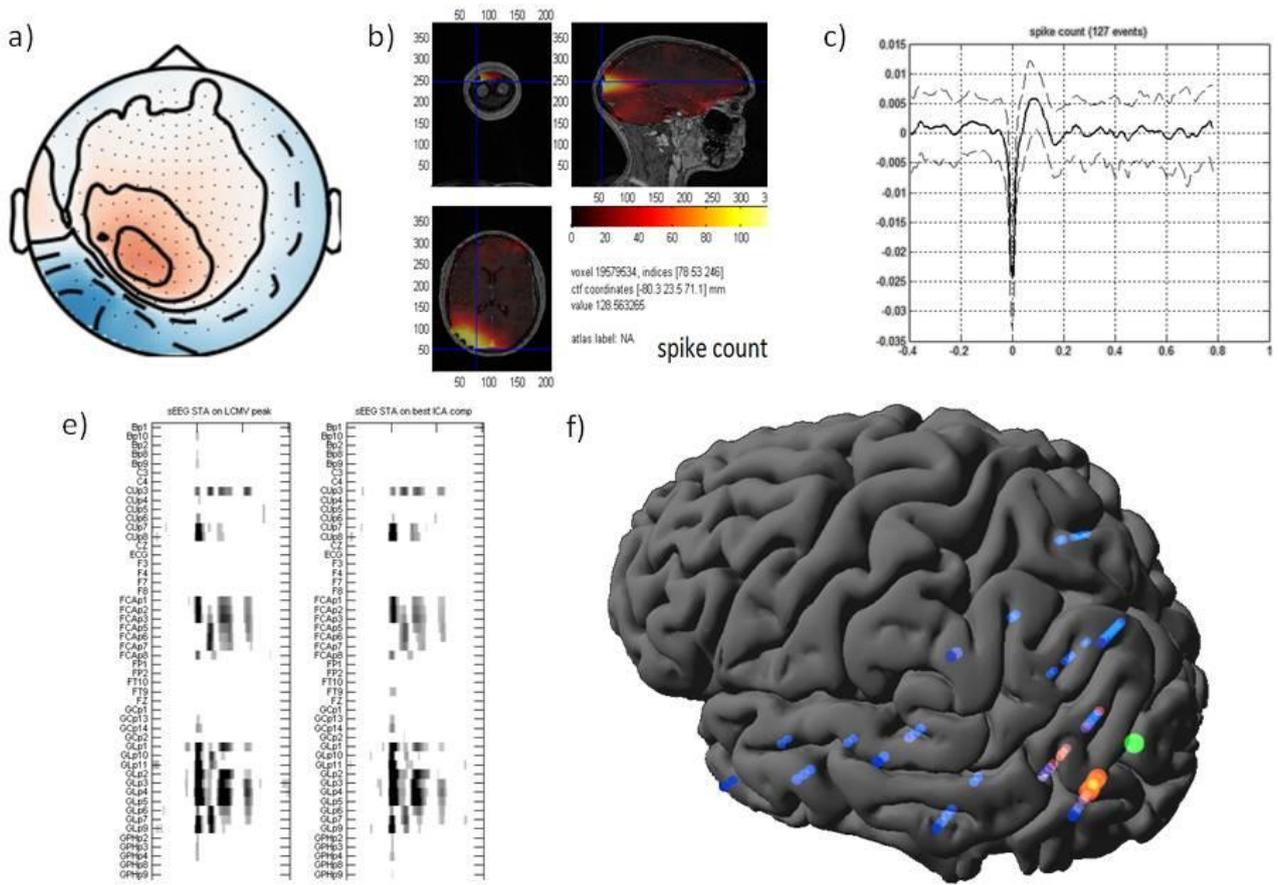


Figure 2 : Comparaison de méthodes de filtrage spatial sur des données simultanées MEG-SEEG. a) Topographie ICA obtenues sur des données MEG de repos b) résultat d'un beamformer appliqué sur les mêmes données c) moyenne des pointes épileptiques détectées sur la composante ICA e) test statistique sur la SEEG (à gauche, ICA, à droite beamformer) qui met en évidence les plots SEEG qui ont une activité correspondant aux pointes de surface f) rendu 3D de la significativité, la localisation de sources ICA est représentée en vert.