

# Panorama des applications biomédicales des méthodes de séparation aveugle de sources

Yannick DEVILLE

Université Paul Sabatier, Laboratoire d'Acoustique, de Métrologie, d'Instrumentation (LAMI)  
Bât. 3R1B2, 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex, France  
ydeville@cict.fr

**Résumé** – Les méthodes de Séparation Aveugle de Sources et d'Analyse en Composantes Indépendantes ont été appliquées dans divers domaines ces dernières années. Nous présentons ici un panorama de leurs applications biomédicales, en détaillant plus particulièrement les applications relatives au traitement de signaux ECG, MEG et EEG et de certains types d'images.

**Abstract** – Blind Source Separation and Independent Component Analysis methods have been applied in various fields in recent years. We here provide a survey of their biomedical applications, where we especially detail their applications to ECG, MEG and EEG signals and to some types of images.

## 1 Introduction

Les domaines connexes que constituent la séparation aveugle de sources (SAS) et l'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI) sont apparus dans les années 1980 et ont connu depuis un essor considérable. Si les premiers travaux dans ces domaines étaient de nature théorique, des applications variées de ces méthodes n'ont cependant pas tardé à apparaître. Ce phénomène s'explique par le caractère générique de la fonctionnalité qu'elles réalisent (c-à-d brièvement : la restauration d'un ensemble de signaux sources uniquement à partir d'un ensemble de mélanges observés de ces signaux [1],[2]), qui correspond à des problèmes rencontrés dans bien des domaines applicatifs.

Les études à caractère applicatif publiées à ce jour concernent tout particulièrement les télécommunications, l'acoustique, les signaux biomédicaux et plusieurs aspects du traitement d'image. Pour un panorama général des applications des méthodes de SAS/ACI, le lecteur pourra se reporter par exemple à [3],[4].

Les trois derniers domaines d'application précités font l'objet d'exposés invités dans le cadre de la conférence GRETSI 2003. Parmi eux, l'exposé correspondant au présent document a pour objectif de fournir un panorama des applications biomédicales. Nous y présentons donc des études de natures variées issues de la littérature et nous décrivons succinctement une des activités de notre équipe, relative à l'analyse d'électroencéphalogrammes (EEG), qui est un secteur où les méthodes de SAS/ACI trouvent actuellement un nombre croissant d'applications.

## 2 Applications biomédicales

Les applications biomédicales de la SAS/ACI couvrent des configurations variées, non seulement du point de vue des types de signaux analysés, mais aussi de la nature de l'information qui en est extraite. L'une des situations les plus classiques sur ces deux plans est liée aux électrocardiogrammes (ECG) et

concerne l'extraction de battements cardiaques foetaux à partir d'un ensemble de signaux ECG enregistrés à l'aide d'électrodes cutanées placées sur la peau de la mère. Les signaux ainsi obtenus incluent aussi les battements cardiaques de la mère et des composantes de bruit. Ce problème spécifique a déjà été étudié dans le passé, notamment en utilisant des techniques d'annulation adaptative de bruit [5] qui sont maintenant classiques. Les performances ainsi accessibles étaient en particulier limitées par le fait que ces techniques nécessitent d'utiliser des signaux de référence, c-à-d non mélangés. Les méthodes de SAS/ACI fournissent maintenant un cadre plus général qui évite cette restriction et permet de revisiter ce type d'applications en espérant obtenir de meilleures performances. Des résultats correspondants sont par exemple présentés dans [6],[7],[8]. Nous détaillons l'une de ces études dans notre exposé oral. Notons qu'une comparaison de méthodes de SAS/ACI et d'approches plus classiques fondées sur la Décomposition en Valeurs Singulières est aussi fournie dans [6].

Les signaux ECG ont aussi été analysés dans d'autres buts. En particulier, Vetter et al. [9] ont présenté une étude dans laquelle l'aspect SAS/ICA du problème considéré apparaît de manière beaucoup moins naturelle que ci-dessus pour des non-spécialistes. Cette étude concerne l'analyse du contrôle du cœur par le système nerveux autonome, dont les anomalies jouent un rôle important dans de nombreuses situations physiopathologiques. Ce système de contrôle cardiaque contient deux parties antagonistes, correspondant aux activités nerveuses cardiaques sympathique (ANCS) et parasympathique (ANCP). Les variations de ces activités influent sur le comportement du cœur et entraînent des modifications de l'ECG. L'étude présentée vise à extraire les signaux ANCS et ANCP originaux à partir seulement d'un ECG monocanal observé, ou plus précisément à partir de deux paramètres qui en sont déduits. Ces paramètres sont les intervalles RR et QT successifs, qui correspondent respectivement à l'intervalle de temps entre battements cardiaques adjacents et à la durée d'une portion spécifique du

cycle ECG. Cette séparation des signaux ANCS et ANCP à partir de leurs mélanges RR et QT est réalisée à l'aide d'une méthode de SAS/ACI adaptée aux mélanges linéaires instantanés. A la différence de la plupart des applications, ce modèle de mélange n'est pas ici choisi à l'issue d'une modélisation détaillée du système physique considéré, qui montrerait que les signaux mesurés obéissent effectivement à ce modèle. Au contraire, l'approche utilisée dans cette étude contient deux aspects. Des connaissances physiologiques qualitatives correspondant au modèle de contrôle du cœur mentionné ci-dessus sont d'abord utilisées. Elles montrent que chacun des paramètres RR et QT dépend des signaux ANCS et ANCP, c-à-d est un mélange (d'un type non spécifié à ce stade) de ces signaux (et éventuellement d'autres signaux, ce qui est confirmé ci-dessous). Un modèle de mélange linéaire instantané est ensuite choisi, pour deux raisons. D'une part, cette étude est centrée sur une approximation "petit signal" et vise seulement à extraire les caractéristiques majeures des variations des signaux ANCS et ANCP, ce qui conduit les auteurs à utiliser un modèle linéaire. D'autre part, ces chercheurs ont pour objectif de définir un outil d'analyse simple et considèrent donc seulement un modèle de mélange instantané.

L'autre aspect majeur du problème de SAS/ACI ainsi introduit concerne l'indépendance des sources à restaurer. Des études ont montré que les signaux ANCS et ANCP ne sont pas indépendants. Cependant, les précédents travaux des auteurs les conduisent à supposer que deux composantes indépendantes, respectivement sensibles aux signaux ANCS et ANCP, peuvent être déduites des paramètres d'ECG observés. La méthode de SAS appliquée aux paramètres d'ECG considérés est une approche classique adaptée aux sources temporellement corrélées, qui est souvent appelée SOBI (pour "Second-Order Blind Identification") [10]. De plus, elle est précédée par un étage de réduction de bruit fondé sur une Analyse en Composantes Principales (ACP). Cet étage vise à réduire l'influence de tous les signaux de "bruit" contenus par les paramètres d'ECG considérés, en plus des contributions mélangées de ANCS et ANCP. Ces sources de bruit correspondent à l'influence de la respiration et de phénomènes aléatoires inconnus sur les paramètres d'ECG, ainsi qu'au bruit de mesure et de quantification.

Dans les applications biomédicales, les méthodes de SAS/ACI fournissent souvent des estimations de variables cachées (comme ANCS et ANCP ici) qui sont inaccessibles chez les sujets humains. Les variables estimées ne peuvent pas être comparées aux sources originales indisponibles et sont donc dures à interpréter. Il est de ce fait difficile de valider les performances de méthodes de SAS/ACI dans de telles applications. Les auteurs résolvent ici ce problème en utilisant des protocoles expérimentaux spécifiques, qui provoquent ou inhibent les réponses sympathique ou parasympathique et permettent donc de vérifier si l'approche proposée réussit à mettre en évidence des modifications des niveaux de ANCS et ANCP. Cela montre l'efficacité des méthodes de SAS/ACI linéaires instantanées dans cette application et la nécessité d'utiliser un étage de débruitage. Cette approche fournit de meilleures performances que l'indicateur traditionnel fondé sur la transformation de Fourier rapide (FFT)<sup>1</sup>. Il faut mentionner que les mêmes auteurs avaient auparavant présenté une autre approche liée à ce pro-

<sup>1</sup>Les indéterminations d'amplitude et de permutation sont aussi résolues dans [9] en utilisant des connaissances a priori.

blème [11],[12]. Cependant, cette dernière approche nécessite des méthodes de SAS convolutives non causales et l'enregistrement simultané de l'ECG et de la pression sanguine artérielle, ce qui peut être contraignant dans des applications cliniques. L'approche décrite ci-dessus a donc l'avantage de n'utiliser que des méthodes de SAS instantanées et un enregistrement d'ECG monocanal.

Diverses autres études présentées dans la littérature concernent aussi des signaux cardiaques, combinés avec d'autres types de mesures physiologiques. En particulier, l'activité neuronale du cerveau engendre des champs électromagnétiques qui peuvent être enregistrés au moyen de techniques électroencéphalographiques (EEG) et plus récemment magnétoencéphalographiques (MEG). Les séries temporelles multicanales ainsi obtenues fournissent des informations sur divers aspects de l'activité du cerveau. Cependant, elles contiennent souvent une quantité considérable de composantes indésirables, résultant par exemple de l'activité oculaire (c-à-d des clignements ou des mouvements des yeux), des activités musculaire et cardiaque ou des perturbations dues à l'environnement. Ces interférences peuvent avoir une amplitude plus élevée que les signaux utiles, ce qui rend difficile l'extraction d'informations utiles par les cliniciens à partir d'enregistrements bruts. De plus, diverses formes d'ondes dues aux artefacts sont similaires aux réponses neuronales, ce qui peut engendrer des erreurs d'interprétation des données mesurées. Les méthodes de SAS/ACI ont donc été utilisées pour supprimer ces divers types de composantes indésirables. Par exemple, dans [13],[14] Barros et al. étudient l'extraction et la suppression d'interférences cardiaques à l'aide d'un algorithme de SAS/ACI spécifique, qui utilise une information a priori concernant le signal à supprimer. Plus précisément, cet algorithme est déduit de l'approche classique à déflation fondée sur la recherche des extrema du kurtosis non-normalisé de la sortie du système, qui s'applique à des mélanges linéaires instantanés [15],[16]. La variance qui apparaît dans l'expression classique du kurtosis est ici remplacée par l'autocorrélation pondérée de la sortie, afin de tirer parti de la quasi-périodicité supposée de l'unique signal qui doit être extrait et supprimé. Les auteurs montrent que cette approche permet d'identifier la composante cardiaque à partir d'enregistrements MEG à 122 canaux, sans nécessiter d'enregistrements d'ECG supplémentaires.

Dans [17], Vigário et al. présentent des résultats expérimentaux concernant l'identification et la suppression de divers autres types d'artefacts d'enregistrements MEG. De plus, ils montrent comment des réponses à des stimuli auditifs et tactiles simultanés peuvent être extraites à partir d'enregistrements MEG multicanaux (voir aussi [18] et les références dans [17]). Tous les résultats présentés dans [17] ont été obtenus en utilisant la version définie dans [16] de la méthode de SAS/ACI mentionnée ci-dessus, qui est fondée sur la maximisation de la valeur absolue du kurtosis non-normalisé des données prétraitées par "sphering". Les auteurs indiquent que cette approche fournit une implantation rapide dans les applications considérées, car elles mettent en jeu de nombreux canaux (typiquement 122) à partir desquels seules quelques composantes indépendantes sont extraites. De plus, ils discutent la validité des hypothèses faites dans le modèle de SAS/ACI pour les applications considérées.

Dans la présentation ci-dessus, nous avons mis l'accent sur

l'aspect magnétique de l'analyse de l'activité du cerveau. En ce qui concerne son aspect électrique, c-à-d l'EEG, le lecteur peut par exemple se référer à [19],[20]. Ce deuxième aspect inclut en particulier les potentiels évoqués, qui correspondent à des variations de tension dans l'EEG engendrées par des événements expérimentaux. Ainsi par exemple, les travaux en cours de réalisation dans notre équipe [21],[22] en collaboration avec l'Unité 455 de l'INSERM au CHU Purpan de Toulouse concernent les potentiels évoqués auditifs, c-à-d les EEG de patients soumis à des stimuli auditifs simples. Ces EEG contiennent diverses composantes utiles, qui ne sont pas toujours visibles dans les enregistrements bruts car elles se recouvrent dans le temps. L'objectif est alors d'extraire ces composantes à l'aide de méthodes de SAS/ACI, puis de déduire leurs positions respectives dans le temps, afin de déterminer si cette répartition temporelle présente des anomalies dans le cas de sujets dyslexiques.

Les applications biomédicales des méthodes de SAS/ACI qui ont été présentées dans la littérature contiennent aussi des composantes liées à l'imagerie. Cela apparaît par exemple dans l'étude décrite par Schieβl et al. dans [23] (et [24]). Ces travaux concernent l'analyse des variations au fil du temps de la réflectance lumineuse des tissus corticaux en réponse à une stimulation. Les données mesurées consistent en une série d'images vidéo, fournies par exemple par une caméra CCD. Cela conduit à une formulation du problème de SAS/ACI différente de celle considérée ci-dessus dans le cas de l'analyse de séries temporelles. Plus précisément, alors que chaque échantillon de signal mesuré était indicé par sa position dans le temps et son capteur d'origine dans les exemples précédents, ces deux variables sont ici respectivement remplacées par la position spatiale du pixel (vue comme une série monodimensionnelle) dans une image et l'indice d'image dans la série d'images. Ces données sont prétraitées par "sphering", puis traitées par SAS/ACI. Trois algorithmes de ce type sont comparés, c-à-d : i) la méthode "extended infomax" avec gradient naturel, ii) à nouveau l'optimisation du kurtosis et iii) la décorrélation avec 2 décalages (dans le domaine spatial au lieu du domaine temporel, à cause des variables définies ci-dessus). Des tests réalisés avec des sources et des mélanges artificiels montrent que l'algorithme à décorrélation fournit de meilleures performances que les deux autres, en particulier pour des données bruitées. Des enregistrements réels, provenant de cortex visuel primaire de singe, sont ensuite utilisés. Cela confirme la capacité de l'algorithme à décorrélation à séparer le signal spécifique au stimulus visuel par rapport au bruit biologique et aux artefacts.

Dans un registre voisin, mentionnons aussi l'importance croissante des travaux concernant les applications des méthodes de SAS/ACI à l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf). Nous ne pouvons pas détailler ici cet aspect, mais nous fournissons dans la section suivante une référence à un ensemble d'articles sur le sujet parus à la conférence ICA 2003. Les Actes de cette conférence contiennent aussi des articles sur d'autres aspects, plus spécifiques, des applications biomédicales de ces méthodes, c-à-d la tomographie par émission de positrons (TEP) et l'analyse d'électromyogrammes (EMG), notamment d'électrogastrogrammes (EGG).

### 3 Discussion

Nous venons de présenter un bref panorama des applications biomédicales des méthodes de SAS/ACI. Pour une présentation plus détaillée, le lecteur pourra se référer à la description que nous fournissons dans [4] ou aux divers supports de publication dans lesquels les études relatives à ce domaine ont été décrites. En particulier, l'importance croissante de ce type d'applications transparaît nettement dans les Actes des quatre occurrences de la conférence dédiée au domaine de la SAS/ACI qui ont eu lieu jusqu'à ce jour. En effet, si chacune des conférences ICA'99, ICA 2000 et ICA 2001 contenait déjà une session orale relative aux applications biomédicales de la SAS/ACI, ce domaine a pris une place encore plus importante à la conférence ICA 2003, puisqu'elle comportait non seulement une session orale "Biomedical applications", mais aussi une session spéciale invitée "Independent Component Analysis of Functional Magnetic Resonance Imaging Data" et une session poster "Applications 1 (biomedical and image)".

Dans cet article, nous nous sommes efforcés de faire apparaître diverses tendances qui se dessinent dans le domaine considéré. En particulier, les exemples relatifs à l'ECG que nous avons choisi de présenter avaient pour but d'illustrer deux cas extrêmes qui peuvent être rencontrés dans les applications des méthodes de SAS/ACI. Le premier correspond à un scénario classique, c-à-d où les sources et le phénomène de mélanges sont bien modélisés a priori et vérifient les hypothèses traditionnelles des méthodes de SAS/ACI. Le deuxième cas est celui où un contexte applicatif "hors-norme" constitue le point de départ de l'étude et où une réflexion doit ensuite être menée afin en particulier : i) de choisir la méthode à appliquer (c-à-d pré-traitements puis SAS/ACI), ii) d'analyser dans quelle mesure les contraintes propres à cette méthode sont effectivement vérifiées dans l'application considérée et iii) de définir un protocole expérimental permettant de valider les résultats obtenus. Le lecteur est susceptible d'avoir à transposer cette approche à son domaine d'application.

### Remerciements

L'auteur souhaite remercier le Docteur Isabelle Coadou pour sa relecture attentive de cet article.

### Références

- [1] J.-F. Cardoso, "Blind signal separation : statistical principles", Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 10, pp. 2009-2025, Oct. 1998.
- [2] A. Hyvarinen, J. Karhunen, E. Oja, "Independent Component Analysis", Wiley, New York, 2001.
- [3] Y. Deville, "Towards industrial applications of blind source separation and independent component analysis", Proceedings of the First International Workshop on Independent Component Analysis and Signal Separation (ICA'99), pp. 19-24, Aussois, France, Jan. 11-15, 1999.
- [4] Y. Deville, "Chapter 7. Applications of Blind Source Separation and Independent Component Analysis methods", Proceedings of : Ecole de Printemps "De la séparation de sources à l'analyse en composantes indépendantes",

- pp. 177-212, Villard-de-Lans, France, May 2-4, 2001, Ch. Jutten and A. Guérin-Dugué. eds.
- [5] B. Widrow, J.R. Glover, J.M. McCool, J. Kaunitz, C.S. Williams, R.H. Hearn, J.R. Zeidler, E. Dong, R.C. Goodlin, "Adaptive noise cancelling : principles and applications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 63, no. 12, pp. 1692-1716, Dec. 1975.
- [6] L. De Lathauwer, B. De Moor, J. Vanderwalle, "Fetal electrocardiogram extraction by blind source subspace separation", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 5, pp. 567-572, May 2000.
- [7] V. Zarzoso, A.K. Nandi, E. Bacharakis, "Maternal and foetal ECG separation using blind source separation methods", *IMA Journal of Mathematics Applied in Medicine and Biology*, vol. 14, pp. 207-225, 1997.
- [8] V. Zarzoso, A.K. Nandi, "Noninvasive fetal electrocardiogram extraction : blind separation versus adaptive noise cancellation", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 48, no. 1, pp. 12-18, Jan. 2001.
- [9] R. Vetter, N. Virag, J.-M. Vesin, P. Celka, U. Scherrer, "Observer of autonomic cardiac outflow based on blind source separation of ECG parameters", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 5, pp. 578-582, May 2000.
- [10] A. Belouchrani, K. Abed-Meraim, J.-F. Cardoso, E. Moulines, "A blind source separation technique using second-order statistics", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 45, no. 2, pp. 434-444, Feb. 1997.
- [11] R. Vetter, J.-M. Vesin, P. Celka, U. Scherrer, "Observer of the autonomic cardiac outflow in humans using non-causal blind source separation", *Proceedings of ICA'99*, pp. 161-166, Aussois, France, Jan. 11-15, 1999.
- [12] R. Vetter, J.-M. Vesin, P. Celka, U. Scherrer, "Observer of the human cardiac sympathetic nerve activity using noncausal blind source separation", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 46, pp. 322-330, March 1999.
- [13] A. K. Barros, N. Ohnishi, "Removal of quasi-periodic sources from physiological measurements", *Proceedings of ICA'99*, pp. 185-190, Aussois, France, Jan. 11-15, 1999.
- [14] A. K. Barros, R. Vigário, V. Jousmäki, N. Ohnishi, "Extraction of event-related signals from multichannel bioelectrical measurements", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 5, pp. 583-588, May 2000.
- [15] N. Delfosse, P. Loubaton, "Adaptive blind separation of independent sources : a deflation approach", *Signal Processing*, vol. 45, no. 1, pp. 59-84, July 1995.
- [16] A. Hyvärinen and E. Oja, "A fast fixed-point algorithm for independent component analysis", *Neural Computation* 9, pp. 1483-1492, 1997.
- [17] R. Vigário, J. Särelä, V. Jousmäki, M. Hämäläinen, E. Oja, "Independent component approach to the analysis of EEG and MEG recordings", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 5, pp. 589-593, May 2000.
- [18] R. Vigário, J. Särelä, V. Jousmäki, E. Oja, "Independent component analysis in decomposition of auditory and somatosensory evoked fields", *Proceedings of ICA'99*, pp. 167-172, Aussois, France, Jan. 11-15, 1999.
- [19] T.-P. Jung, S. Makeig, M. Westerfield, J. Townsend, E. Courchesne, T.-J. Sejnowski, "Independent component analysis of single-trial event-related potentials", *Proceedings of ICA'99*, pp. 173-178, Aussois, France, Jan. 11-15, 1999.
- [20] L. Zhukov, D. Weinstein, C. Johnson, "Independent component analysis for EEG source localization", *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, pp. 87-96, May/June 2000.
- [21] M. Savignan, sous la direction de Y. Deville, "Application des méthodes de séparation de sources aux électroencéphalogrammes : analyse des Potentiels Evoqués Auditifs (PEA)", stage du DEA SIA de Toulouse, 1ier Juillet 2001.
- [22] V. Desplantez, sous la direction de Y. Deville et B. Rigaud, "Application des méthodes de séparation de sources à l'électroencéphalographie", stage du DEA SIA de Toulouse, à paraître en Juillet 2003.
- [23] I. Schieβl, M. Stetter, J.E.W. Mayhew, N. McLoughlin, J.S. Lund, K. Obermayer, "Blind signal separation from optical imaging recordings with extended spatial decorrelation", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 5, pp. 573-577, May 2000.
- [24] I. Schieβl, M. Stetter, J.E.W. Mayhew, S. Askew, N. McLoughlin, J.B. Levitt, J.S. Lund, K. Obermayer, "Blind separation of spatial signal patterns from optical imaging records", *Proceedings of ICA'99*, pp. 179-184, Aussois, France, Jan. 11-15, 1999.