

Comparaison de méthodes de séparation de sources appliquées en acoustique sous-marine.

M. Gaeta ¹, F. Briolle ², F. Mondoloni ¹

1: **VIBRIA**, 185 Espace Athéna, 83190 Ollioules, France. Email: gaeta@vibria.francenet.fr

2: DCE / CTSN / DLSM, le Brusuc, 83140, France.

Résumé

En acoustique sous-marine le signal reçu par un ensemble de capteurs est un mélange des différentes sources élémentaires filtrées par l'environnement. La séparation de sources consiste, à partir des seuls signaux reçus, à isoler chaque source en s'appuyant sur la propriété fondamentale d'indépendance. Les principales solutions adaptatives utilisent des critères d'ordre 2, d'ordre supérieur, d'entropie, etc.. La comparaison réalisée tend à quantifier les performances que l'on peut attendre de ces solutions dans un cas simplifié, pour différents types de réponses impulsionnelles du milieu marin. Les performances obtenues montrent de bonnes capacités de séparation et une grande homogénéité des résultats pour des traitements utilisant des critères d'ordre deux ou d'entropie.

Abstract†

In underwater acoustics, the signal received by sensors is a mixture of different elementary sources, filtered by the environment. In blind separation of sources, we can isolate each source from different mixtures of sources without any a priori information, except for assuming statistical independence of the different sources. Several adaptive solutions, using different separation criteria such as quadratic, higher order, entropy etc., are already available.

This paper presents a performance comparison of those three approaches respect to different underwater impulse responses in a simplified situation. The obtained performances exhibit good separation capabilities and homogeneous results among algorithms using second order or entropy criteria.

1. Introduction

La séparation de sources offre une alternative intéressante dans le domaine SONAR, en évitant certains problèmes de calibration d'antenne.

Chaque composante obtenue peut être considérée comme débruitée de son environnement et représentative d'un seul phénomène physique. Cette propriété est particulièrement importante pour aborder des problèmes de détection et de classification des signaux, par exemple.

Le problème peut être abordé dans sa forme la plus générale : le mélange convolutif de sources indépendantes. Un certain nombre d'algorithmes sont disponibles à ce jour pour traiter ce problème aussi appelé Analyse en Composantes Indépendantes [2] :

- il est possible d'étendre, au cas de mélanges convolutifs, les algorithmes de séparation de sources développés dans le cadre de mélanges instantanés (mélange matriciel des signaux sources sans retard) [5]. Cela conduit à des fonctions de coût présentant des termes non linéaires, ou d'ordre supérieur par rapport aux données [7]. Ces fonctions permettent d'exploiter totalement les propriétés d'indépendance des sources ;
- une autre approche consiste à envisager le problème sous l'angle d'une identification de système linéaire [1], [6]. Sous certaines conditions [4], la séparation de mélanges convolutifs de sources peut être réalisée grâce à des critères d'ordre deux ;
- enfin, l'utilisation des notions d'entropie et d'échange d'informations entre les composantes du signal permet également de parvenir à la définition d'un algorithme de séparation [8].

Nous nous proposons ici de réaliser une comparaison de ces algorithmes dans le cadre particulier de l'acoustique sous-marine et plus particulièrement des signaux mélangés au cours d'une propagation par petits fonds.

Pour des raisons de simplicité, nous nous limiterons au cas bi-dimensionnel : deux sources, deux capteurs.

Les différents algorithmes sont présentés de manière synthétique puis testés pour différentes situations physiques correspondant à des distances de propagation croissantes : l'aspect de la Réponse Impulsionnelle (RI) traduit les divers trajets de propagation des ondes acoustiques et leurs réflexions [9]. Cette RI est modélisée de manière simple (cf. : § 3) pour l'étude des performances de la séparation de sources.

Une précédente étude de performance d'algorithmes adaptatifs peut être trouvée dans [10].

2 Modélisation du problème

Le signal reçu $r_j(t)$ par un hydrophone j est constitué des différentes sources convoluées par la RI du milieu :

$$r_j(t) = \sum h_{ij}(t) * s_i(t) \quad i = \{1, \dots, M\} \quad (1)$$

Dans le cas de deux signaux N_1 et N_2 émis par deux sources, les signaux R_1 and R_2 reçus sur deux hydrophones sont des mélanges convolutifs qui peuvent être modélisés comme suit (figure 2) :

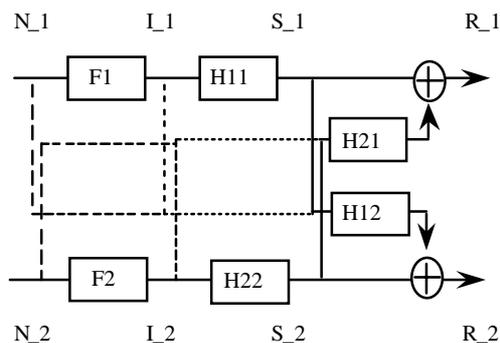


Figure 2 : Modélisation des signaux reçus

Les deux processus de base N_1 et N_2 sont des bruits blancs. Après filtrage on obtient deux processus linéaires L_1 et L_2 , résultats du filtrage des processus de base par deux filtres $F1$ et $F2$. Au cours de la propagation vers les hydrophones, une nouvelle transformation linéaire s'opère modélisée par les filtres H_{11} et H_{22} . Le résultat peut être considéré comme deux sources indépendantes colorées S_1 and S_2 .

Les filtres H_{11} et H_{22} ne peuvent être identifiées, sans l'addition d'hypothèses supplémentaires à la seule notion d'indépendance. En effet, chaque élément d'une même "ligne de propagation" (N_i , L_i , S_i) reste indépendant des éléments de l'autre ligne. Les lignes pointillées de la figure 2 montrent les différents points possibles auxquels la séparation de source peut mener [3].

Cette modélisation aboutit à deux sources indépendantes colorées qui se propagent dans le milieu marin. Dans l'étude de performance menée, on ne prendra pas en compte cette étape et l'on considérera des sources S_i modélisées par deux processus indépendants, blancs et centrés.

On peut considérer que les signaux R_1 et R_2 sont obtenus par mélange convolutif de deux sources indépendantes S_1 et S_2 par les filtres H_{12} et H_{21} .

Les filtres H_{12} et H_{21} de ce modèle simplifié peuvent être estimés en restaurant les propriétés d'indépendance perdues lors de cette dernière transformation [5],[7]. Cette opération est nommée "séparation de sources".

3. Modélisation de la propagation

Les filtres H_{12} et H_{21} représentant la propagation dans le milieu marin sont obtenus comme suit :

La propagation des ondes acoustiques en milieu sous-marin peut être modélisée, de manière grossière, par un ensemble d'échos représentant chaque trajet de propagation possible entre la source et le point de mesure.

Pour les besoins de la simulation, les différents temps d'arrivée des échos sont modélisés par une distribution de poisson dont on peut régir l'occurrence moyenne, c'est-à-dire le temps séparant chaque échos. Plus l'occurrence est grande plus le temps séparant chaque échos est grand. L'amplitude des échos est obtenue par tirage aléatoire d'un processus gaussien.

On considère que les différents échos correspondant à des trajets de propagation de plus en plus long, présentent une décroissance d'amplitude de 1 dB par seconde.

Dans cette modélisation, la durée de la RI est variable ainsi que l'occurrence des échos (le temps moyen séparant

deux échos). Les réponses impulsionnelles synthétiques sont normalisées en puissance.

La figure 1 montre une réalisation de RI d'une durée de 1 seconde avec une occurrence de 50 ms et une atténuation fixée à 10 dB/s pour une meilleure visualisation.

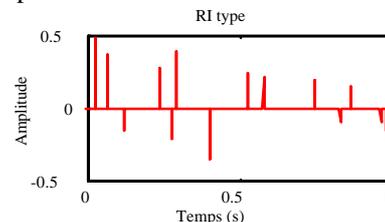
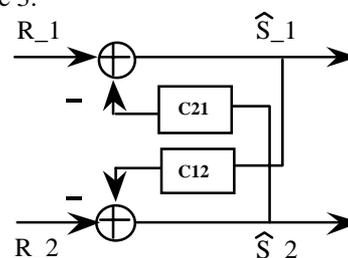


Figure 1 : Exemple de RI synthétique

4. Algorithmes de séparation de sources

L'algorithme présenté en [7] peut être vu comme une procédure de propagation inverse du signal, comme le montre la figure 3.

Figure 3 : Estimation des sources S_1 et S_2 par une propagation inverse

Le problème est ramené à une identification de système.

L'estimation des filtres de séparation C_{12} et C_{21} est fondée sur la maximisation des propriétés d'indépendances des signaux de sortie.

De plus, si les sources S_i sont blanches, les filtres estimés C_{12} et C_{21} correspondent aux filtres H_{12} et H_{21} .

Si la séparation de sources mélangées de manière instantanée nécessite l'utilisation de critère différent de l'ordre deux [2], il n'en va pas de même des mélanges convolutifs qui, sous certaines hypothèses, peuvent être traités par des critères d'ordre deux [4],[6].

L'indépendance peut être quantifiée par des critères statistiques divers : ordre 2, ordre supérieur, entropie.

Les trois algorithmes testés sont bâtis sur le même schéma et diffèrent par leur critère d'indépendance.

Le pseudo code générique est le suivant :

Pour tous les points

Début

Estimation du critère d'indépendance à partir des signaux estimés de sortie : *Indep*

Mise à jour des coefficients des filtres :

$$C_{ij}(t+1, \tau) = C_{ij}(t, \tau) + \mu \cdot \text{Indep}_{ij}(t, \tau) \quad (2)$$

Estimation des signaux sources.

Fin

L'algorithme initial présenté en [7] admet comme critère d'indépendance un moment croisé d'ordre quatre :

$$\text{Indep}_{ij}(t, \tau) = E\{\hat{S}_i(t)^3 \hat{S}_j(t - \tau)\} \quad (3)$$

avec $E\{\}$: l'opérateur d'espérance mathématique.

Une version utilisant un critère d'indépendance d'ordre deux peut être obtenue en estimant :

$$Indep_{ij}(t, \tau) = E\left\{\hat{S}_i(t)\hat{S}_j(t-\tau)\right\} \quad (4)$$

Utilisant une démarche s'appuyant sur les notions d'entropie [8], un autre critère d'indépendance peut être défini :

$$Indep_{ij}(t, \tau) = \left(1 - 2 \left(\frac{1}{1 + \exp(-\hat{S}_i(t))}\right)\right) \hat{S}_j(t-\tau) \quad (5)$$

Le paramètre μ de la formule 2 d'adaptation dépend du temps. Il est normalisé par rapport au critère d'indépendance estimé pour un même signal au retard nul. Il sera initialisé à la même valeur pour les trois algorithmes.

Les signaux sources estimés sont obtenus par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \hat{s}_1(t) = r_1(t) - C_{12} * \hat{s}_2(t) \\ \hat{s}_2(t) = r_2(t) - C_{21} * \hat{s}_1(t) \end{cases} \quad (6)$$

5. Critères des performances

Les signaux sources utilisés sont des processus aléatoires blancs. Les filtres séparateurs C_{ij} correspondent aux filtres de mélange H_{ij} . Un critère de qualité de l'estimation peut donc être l'erreur quadratique moyenne entre ces deux quantités :

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_i \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} \sum_{\tau} (C_{ij}(\tau) - H_{ij}(\tau))^2 \quad (7)$$

avec : N le nombre total de coefficients estimés.

La diaphonie peut également être utilisée pour quantifier la qualité de la séparation, exprimée en dB :

$$Diaphonie = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_i \frac{E\left\{\hat{S}_i - S_i\right\}^2}{E\{S_i^2\}} \right) \quad (8)$$

avec : n le nombre de sources (ici 2)

La diaphonie est estimée de manière adaptative ; il est possible de visualiser la convergence des algorithmes. L'exemple suivant (figure 4) est obtenu pour une longueur de RI de 0.4 s, une occurrence de 50 ms et une fréquence d'échantillonnage de 1kHz.

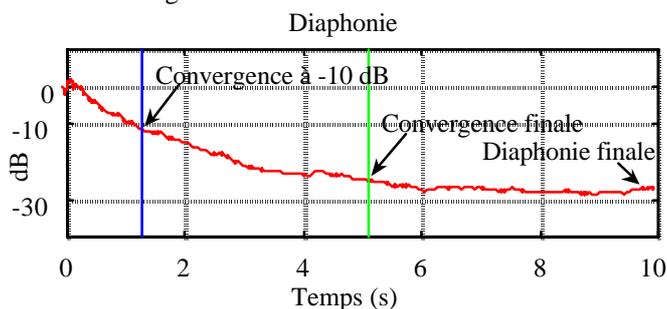


Figure 4 : Evaluation de la diaphonie

Outre l'EQM, nous avons choisi 3 critères pour caractériser le comportement des algorithmes :

- la diaphonie finale, estimée en moyennant les 1000 derniers points ;
- l'instant de "convergence finale", correspondant à une diaphonie supérieur de 3 dB à la diaphonie finale ;
- l'instant de "convergence à -10dB".

6. Estimations des performances

Les simulations portent sur un cas bi-dimensionnel de sources S_1 et S_2 . Ces sources sont blanches indépendantes, centrées, stationnaires. Elles sont simulées respectivement par un bruit uniforme et un bruit uniforme élevé à la puissance 3 et normées en puissance. La fréquence d'échantillonnage est de 1kHz et la durée des signaux est de 20 s.

Les signaux R_1 et R_2 sont obtenus par mélange convolutif de deux sources par les filtres H_{12} et H_{21} .

La durée des RI des filtres de mélange H_{12} et H_{21} est comprise entre 0.1s et 1 s. L'occurrence régissant les instants d'arrivées des échos varie entre 10 ms et 100 ms.

Pour chaque couple durée/occurrence (7 valeurs de durée de RI et 5 valeurs d'occurrence), on simule trois réalisations de mélange.

Les signaux sont séparés à l'aide des trois algorithmes présentés au paragraphe 4 : ordre deux, ordre quatre et entropie.

Les filtres de séparation sont de longueur adapté à la RI simulée et sont initialisés à zéros.

La figure 5 présente l'erreur quadratique moyenne sur les filtres estimés à la fin de chaque traitement, moyennée sur les trois réalisations.

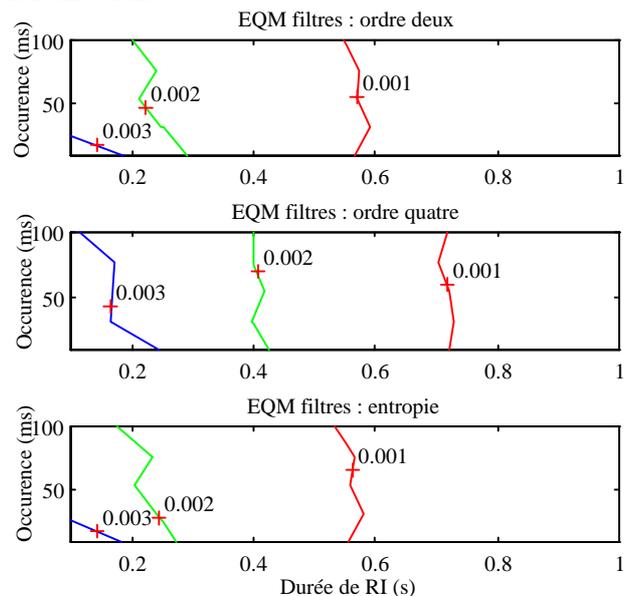


Figure 5 : EQM des filtres

On constate que la précision d'estimation des RI des filtres croît avec leur durée.

Les traitements utilisant des critères à l'ordre deux et d'entropie donnent des résultats équivalents et meilleurs que

ceux obtenus avec un critère utilisant les moments d'ordre quatre.

Pour des durées de RI comprises entre 0.1 et 0.4 s, on constate que les erreurs quadratiques sont d'autant plus grandes que l'occurrence est faible et donc que le nombre d'échos à estimer est important.

Pour des durées de RI supérieures à 0.4 s, l'occurrence des échos n'a pas d'influence significative sur les performances (alignement vertical).

Du fait de la faible variation de l'EQM vis-à-vis de l'occurrence, il est possible d'estimer les performances des traitements en fonction de la durée des RI : pour une durée de RI, on moyenne les performances pour toutes les différentes occurrences.

La figure 6 présente les performances pour les différents critères définis au paragraphe 5 : EQM, diaphonie finale, temps de convergence à 10 dB et temps de convergence finale.

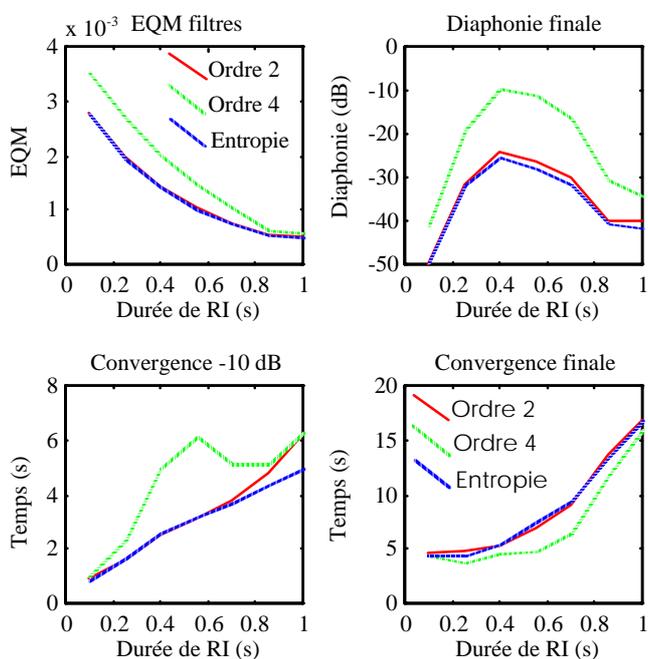


Figure 7 : Performances de séparation

L'erreur quadratique moyenne diminue avec la durée de la RI des filtres et semble converger vers une valeur limite de $5 \cdot 10^{-4}$.

La diaphonie finale présente une forme caractéristique identique pour chacun des traitements utilisés : elle est minimale pour des durées de RI inférieures à 0.2 s, présente un maximum pour de 0.4 s et décroît pour des durées supérieures.

Les temps de convergence à -10 dB augmentent avec la longueur de la RI. Cette croissance est quasi linéaire en particulier pour les traitements utilisant des moments d'ordre deux et des notions d'entropie. Pour les traitements d'ordre quatre l'évolution est plus complexe.

Les temps de convergence finale sont équivalents pour les trois traitements et croissent avec la durée des RI.

D'une manière globale, on constate que les performances de séparation utilisant des moments d'ordre deux et des notions d'entropie sont très proches et supérieures à celles obtenues à l'ordre quatre.

5. Conclusion

Les performances obtenues, sur le cas de figure étudiés, montrent la supériorité des traitements utilisant des critères d'ordre deux et d'entropie sur ceux d'ordre quatre.

D'une manière pratique, les traitements liés à l'entropie offrent une plus grande souplesse d'utilisation notamment pour le réglage des paramètres d'adaptation.

Pour des RI de durées importantes, les premiers résultats semblent donner l'avantage à cette approche.

Bibliographie :

- [1] D.C.D. Chan and al. : "Multi-chanel blind signal separation by decorrelation" Proc IEEE SP Workshop on Application of Signal processing to audio and acoustics, New-York, 15-18 Oct, 1995.
- [2] P. Comon : " Independent component analysis, a new concept ?", Signal Processing, Elsevier, 36(3), pp 287-314, April 1994, Special issue on Higher Order Statistics.
- [3] M. Gaeta, F. Briolle, Ph. Esparcieux : " Blind separation of sources applied to convolutive mixtures in shallow water, IEEE SP Workshop on Higher-Order Statistics, Banff (Canada), July 97.
- [4] A. Gorokhov, Ph. Loubaton, E. Mouline : "Second order blind equalization in multiple inputs multiple outputs FIR systems ; a weighted least squares approach", Proc. ICASSP 1996 Atlanta, May 1996.
- [5] C. Jutten, J. Herrault, " Blind separation of sources : an adaptive algorithm based on neuromimetic architecture", Signal Processing, 24:1-10, 1991.
- [6] U. Lindgren and a.l. : "Source separation using second order statistic", Proc. EUSIPCO 96, Trieste, Sept 1996.
- [7] H.L. Nguyen Thi, C. Jutten, "Blind sources separation for convolutive mixtures", Signal Processing 45:209-229, 1995.
- [8] K. Torkkola : "Blind separation of convolved sources based on Information maximization", IEEE Workshop on neural network for signal processing, Kyoto, Japan, Sept 4-6 1996.
- [9] R. J. Urick : "Principles of underwater sound", 3rd Edition, Mac Graw Hill.
- [10] H.L. Nguyen Thi, C. Jutten : "Comparaison de quelques algorithmes adaptatifs de séparation aveugle de sources dans un mélange convolutif ", Quatorzième GRETSI, Juan les Pins, 13-16 Sept 1993, pp 333-336.