

# Utilisation de la diversité temporelle pour la détection en présence de réverbération

Guillaume GINOLHAC, Geneviève JOURDAIN

Laboratoire des Images et des Signaux  
ENSIEG, Domaine Universitaire, BP 46, 38402 Saint Martin D'hères Cedex, France  
guillaume.ginolhac@lis.inpg.fr, genevieve.jourdain@lis.inpg.fr

**Résumé** – Nous proposons d'utiliser la propriété de diversité temporelle des échos de réverbération de fond dans le but de les supprimer. En effet, on remarque que cette propriété se manifeste différemment entre ce type d'échos et l'écho cible. La méthode proposée est basée sur l'extension de l'algorithme du "Principal Component Inverse" (exposé précédemment) aux tableaux 3D. Une étude sur le rang de ce type de tableau permet de développer correctement la méthode et de l'appliquer sur les données réelles.

**Abstract** – We propose to use the temporal diversity property of bottom echoes in order to delete them. Actually, we notice that this property is different between these echoes and the target echo. The proposed method is based on the extension of PCI algorithm for 3D arrays. A rank study about 3D array allows to develop this method and to apply it on real data.

## 1 Introduction

La réverbération en acoustique sous marine est un bruit très gênant pour la détection de cible. En effet en plus de sa forte puissance, la réverbération est fortement corrélée avec le signal émis ce qui entraîne des mauvaises performances des traitements classiques.

Une approche possible est d'utiliser un modèle de réverbération pour la supprimer. Dans [4], nous supposons que la réverbération est une somme d'échos issus du signal émis, ce qui permet de développer des méthodes performantes pour diminuer le taux de fausses alarmes. Elles sont toutes basées sur l'algorithme du "Principal Component Inverse" (PCI), introduit par Tufts et KIRSTEINS [1]. Le PCI consiste à séparer des échos de puissance différente et suppose que l'écho cible est noyé dans la réverbération. Mais dans certains cas [5], cette hypothèse ne suffit pas à éliminer tous les échos. En particulier, les échos de même puissance sont impossibles à supprimer. Nous proposons donc dans cet article d'utiliser une autre forme de contraste que la puissance: la diversité temporelle. Cette propriété caractérise le mouvement de chaque écho entre plusieurs récurrences. Nous avons accès à une séquence d'images sonar qui permet de former un tableau 3D. Nous proposons d'étendre l'algorithme du PCI à ce type de tableau dans le but d'éliminer les échos immobiles quelque soit leur puissance.

La section 2 présente plus précisément la propriété de diversité temporelle en acoustique sous marine. Ensuite, nous présentons l'outil permettant d'étendre le PCI aux tableaux 3D, ainsi qu'une étude sur le rang de ce type de tableau. Enfin, nous présentons une application sur les données réelles.

## 2 Diversité temporelle

Le but de l'article est d'utiliser la propriété de diversité temporelle pour différencier les échos de réverbération et l'écho cible afin d'améliorer la détection en présence de réverbération. En effet en analysant une séquence d'images sonar, on note la présence de certains échos plus stables que la moyenne. Ces échos proviennent pour la plupart du fond marin et peuvent être très gênants pour la détection. Dans cet article, on suppose que la cible est toujours en mouvement même très faible. Nous avons donc une différence de diversité temporelle entre ces deux types d'échos.

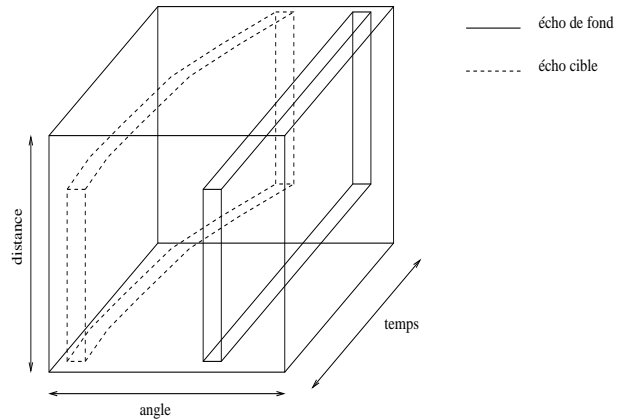


FIG. 1: Exemple d'un cube contenant un écho de fond et un écho cible.

Nous cherchons maintenant l'outil qui peut utiliser cette propriété. La figure 1 montre un exemple simple d'une séquence d'images obtenue après Formation de Voies Bande Large (FVBL) contenant un écho de fond immobile et un écho cible en mouvement qui sont tous les deux de même puissance. Supposons qu'on connaisse un outil capable de

calculer la Décomposition en Valeurs Singulières (DVS) de ce tableau 3D. L'écho immobile serait décrit par des Valeurs Singulières (VS) plus importantes que celles de l'écho en mouvement car il est plus stable dans le tableau 3D. En mettant à zéro les VS les plus importantes, on supprimerait l'écho immobile. Cette démarche est très proche de celle utilisée pour l'algorithme du PCI [1]. En effet, le PCI consiste à supprimer la partie du signal correspondant aux VS les plus puissantes et permet donc d'éliminer les échos de réverbération les plus puissants pour les données spatio-temporelles. On propose ici d'étendre le PCI aux tableaux 3D pour supprimer les échos les plus stables (ici les échos de fond) décrits par les VS les plus importantes.

Nous avons montré [6] que la "Higher Order Singular Value Decomposition" (HOSVD) développée par L. De Lathauwer [2] permet d'étendre les méthodes à sous espace et en particulier le PCI aux tableaux 3D. Nous présentons dans la prochaine section la HOSVD mais aussi la signification physique de ce calcul pour notre séquence d'images.

### 3 Calcul et signification physique de la HOSVD

#### 3.1 Quelques outils d'algèbre multilinéaire

Le calcul de la HOSVD nécessite la multiplication d'une matrice par un tableau N-dimensions. Cette opération est appelée le *produit n-mode* car il est fait dans une direction du tableau N-dimensions. Le produit n-mode d'un tableau  $\mathbf{A}$  de  $\mathbb{C}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n \times \dots \times I_N}$  avec une matrice  $B$  de  $\mathbb{C}^{J_n \times I_n}$  donne un tableau de  $\mathbb{C}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times J_n \times \dots \times I_N}$  dont les éléments s'écrivent sous la forme suivante :

$$(\mathbf{A} \times_n B)_{i_1 i_2 \dots j_n \dots i_N} = \sum_{i_n} a_{i_1 i_2 \dots i_n \dots i_N} b_{j_n i_n}. \quad (1)$$

La visualisation d'un tableau de grande dimension est délicate et donc pour résoudre ce problème une représentation matricielle a été introduite. Elle consiste à déplier le tableau multidimensionnel dans autant de directions que l'ordre du tableau. Par exemple, un tableau 3D est représenté par trois matrices dépliées. Considérons un tableau 3D  $\mathbf{A}$  de  $\mathbb{C}^{I_1 \times I_2 \times I_3}$  les trois matrices dépliées sont  $A_{(1)} \in \mathbb{C}^{I_1 \times I_2 \times I_3}$ ,  $A_{(2)} \in \mathbb{C}^{I_2 \times I_1 \times I_3}$  et  $A_{(3)} \in \mathbb{C}^{I_3 \times I_1 \times I_2}$ .

Un paramètre important en algèbre matricielle est le rang. Malheureusement, le calcul du rang d'un tableau 3D est impossible et donc est donné par les rangs des trois matrices dépliées.

#### 3.2 Présentation de la HOSVD

La décomposition d'un tableau  $\mathbf{A}$  de  $\mathbb{C}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$  est donnée par l'équation suivante [2] :

$$\mathbf{A} = \mathbf{C} \times_1 U^{(1)} \times_2 U^{(2)} \times_3 \dots \times_N U^{(N)}, \quad (2)$$

où  $U^{(n)}$  (taille  $I_n \times I_n$ ) est une matrice unitaire des vecteurs de  $\mathbf{A}$  dans la direction  $n$ . Le tableau multidimensionnel  $\mathbf{C}$  est appelé le noyau. La différence fondamentale entre la DVS et la HOSVD est que le noyau  $C$  n'est pas diagonal mais tout orthogonal. Il est donc impossible d'avoir

accès directement aux valeurs singulières du tableau multidimensionnel.

Nous expliquons maintenant la procédure pour calculer tous les paramètres de l'équation 2. La matrice unitaire  $U^{(n)}$  est la matrice des vecteurs propres gauches de la matrice dépliée  $A_{(n)}$ . Le noyau  $\mathbf{C}$  est ensuite obtenu avec l'équation suivante :

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \times_1 U^{(1)H} \times_2 U^{(2)H} \times_3 \dots \times_N U^{(N)H}. \quad (3)$$

Nous avons maintenant la décomposition complète du tableau multidimensionnel  $\mathbf{A}$ .

La signification physique du calcul de la HOSVD est donc concentrée dans les matrices dépliantes décrivant le tableau 3D. Nous étudions dans le prochain paragraphe les matrices dépliantes pour le tableau 3D contenant une séquence d'images sonar.

### 3.3 Signification physique des matrices dépliantes

Dans [3], nous avons fait une étude sur le rang en utilisant quelques cas simples. Cette étude a permis d'utiliser au mieux l'algorithme du PCI, mais surtout d'améliorer nettement la méthode [5]. Nous proposons donc de suivre la même démarche en étudiant le rang des trois matrices dépliantes.

Considérons donc trois cas : un écho immobile, un écho avec une vitesse linéaire et un écho avec une vitesse angulaire. Dans chaque exemple, nous supposons avoir accès à quatre images sonar et nous faisons le dessin de chaque matrice dépliant après FVBL. De plus, nous supposons que le signal émis est une Fréquence Modulée (FM).

Le dessin 2 montre la structure des trois matrices dépliantes pour le cas d'un écho immobile. Chaque vecteur  $\mathbf{v}_i$  correspond à la réponse de la cible dans l'image  $i$ . Dans le cas d'un écho immobile, les vecteurs  $\mathbf{v}_i$  sont égaux entre eux tout comme les vecteurs  $\mathbf{u}_i$  sont égaux, et donc le rang des trois premières matrices dépliantes est égal à 1.

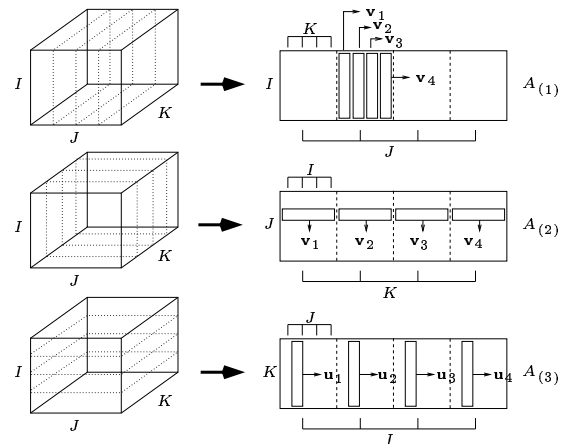


FIG. 2: Signification des trois matrices dépliantes pour un écho immobile.

Le dessin de la structure des trois matrices dépliantes pour le cas d'un écho avec une vitesse linéaire est identique au précédent (dessin 2). La seule différence provient des vecteurs  $\mathbf{v}_i$  et  $\mathbf{u}_i$  qui sont différents ici entre chaque

image  $i$ . Nous avons vu dans l'article [3] qu'un décalage temporel rend les FM séparables. Les vecteurs  $\mathbf{v}_i$  ne sont plus proportionnels entre eux ce qui entraîne une augmentation de la valeur du rang (ici 4). En revanche, le rang de  $A_{(2)}$  reste égal à 1 car seule une ligne de la matrice est remplie de valeurs non nulles. Le rang de  $A_{(3)}$  est égal à 4 car les vecteurs  $\mathbf{u}_i$  ne sont pas proportionnels entre eux.

Considérons le cas d'un écho avec une vitesse angulaire. Le dessin de la structure des trois matrices est montré sur la figure 3. Etudions la matrice  $A_{(1)}$ , les quatre vecteurs  $\mathbf{v}_i$  sont identiques et remplissent chacun une colonne distincte. Le rang de cette matrice est donc égal à 1. La structure de la seconde matrice  $A_{(2)}$  est différente. En effet, une seule valeur est remplie par colonne et à un emplacement différent selon la position de l'écho. Dans notre exemple, le rang de  $A_{(2)}$  est égal à 3. La structure de la troisième matrice  $A_{(3)}$  est différente car les valeurs des vecteurs  $\mathbf{v}_i$  sont disséminées. Il est facile de voir que trois vecteurs sont indépendants, et donc le rang de  $A_{(3)}$  est égal à 3.

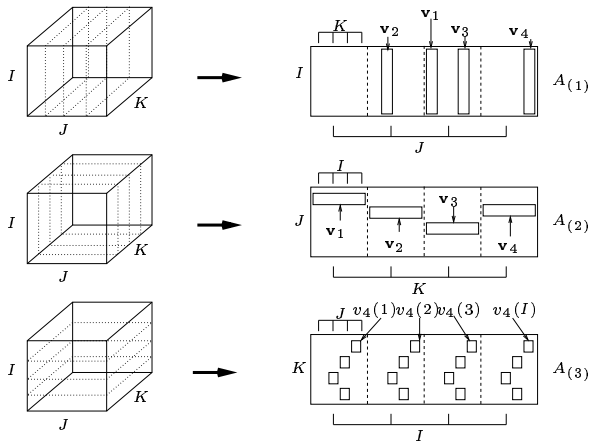


FIG. 3: Signification des trois matrices dépliantes pour un écho avec une vitesse angulaire.

Les résultats du rang des matrices dépliantes dans les différentes situations sont résumés dans le tableau 1.

TAB. 1: Récapitulatif des valeurs du rang du tableau 3D

	$R(A_{(1)})$	$R(A_{(2)})$	$R(A_{(3)})$
cible immobile	1	1	1
cible vitesse linéaire	4	1	4
cible vitesse angulaire	1	3	3

L'étude de ce tableau nous montre que la première et la seconde matrice dépliantes peuvent être utilisées pour supprimer les échos immobiles. En effet, la matrice  $A_{(1)}$  met en valeur le déplacement linéaire, alors que la matrice  $A_{(2)}$  caractérise le mouvement angulaire. Cet exemple, bien que simplifié (en mettant des zéros partout ailleurs), nous guide dans la proposition de la méthode.

Par ailleurs, les méthodes appelées *long vecteur* utilisent une seule matrice et donc caractérisent un unique mouvement. Nous proposons d'utiliser la HOSVD pour prendre en compte les deux mouvements et donc être plus performants. En revanche, nous n'utilisons pas la matrice  $A_{(3)}$  car la réponse de l'écho n'est pas conservée.

## 4 Algorithme du PCI 3D

Les hypothèses pour un bon fonctionnement du PCI 3D sont les suivantes : le nombre d'échos doit être faible dans chaque bloc, la cible doit avoir une vitesse linéaire ou/et angulaire et la puissance des échos de réverbération doit être supérieure ou égale celle de l'écho cible.

Nous nous basons sur deux contrastes pour développer notre méthode : la puissance et la diversité temporelle. Nous voulons supprimer les échos les plus puissants (comme pour le PCI 2D) mais aussi les échos immobiles quelque soit leur puissance.

La première étape consiste à construire le tableau 3D. Nous formons le tableau 3D en utilisant une séquence d'images sonar après FVBL. Le dessin 4 montre le découpage. Nous disposons donc d'un ensemble de tableaux 3D :

$$\mathbf{Y}_{i,j} = \{\mathbf{A}_{t,k,m}\}_{i * L_t + 1 \leq t \leq (i+1) * L_t, j * L_k + 1 \leq k \leq (j+1) * L_k, 1 \leq m \leq N_i}$$

où  $N_i$  est le nombre d'images. Toutes les images sont prises en compte pour utiliser au mieux la diversité temporelle. Nous montrons [3] [5] que la taille des blocs doit être faible pour un fonctionnement du PCI 2D. Les paramètres  $L_t$  et  $L_s$  sont donc les mêmes que ceux choisis dans [5].

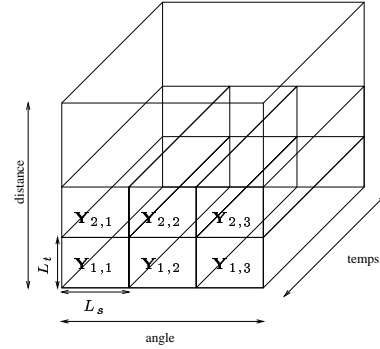


FIG. 4: Découpage du tableau 3D pour le PCI 3D.

La troisième étape est le calcul du seuil qui servira dans l'estimation du rang. La méthode est identique à celle utilisée dans l'article [3]. Nous calculons ici deux seuils  $T_1$  et  $T_2$  pour les deux premières matrices dépliantes. Le calcul de ces deux seuils dépend de l'information sur la puissance de la cible et de la confiance faites à cette information.

Sur chaque bloc  $(i, j)$ , nous disposons d'un tableau 3D  $\mathbf{Y}_{i,j}$ . Nous construisons les deux premières matrices dépliantes correspondantes  $Y_{(1);i,j}$  et  $Y_{(2);i,j}$ . La DVS de chacune des deux matrices est calculée. Pour chaque mode, la somme des valeurs singulières au carrés est calculée et comparée au seuil correspondant. Si cette somme ne dépasse pas le seuil pour les deux modes, alors le PCI n'est pas appliqué. Dans le cas contraire, il existe deux nombres  $l_1$  et  $l_2$  tels que :

$$\sum_{j=1}^{l_1} \sigma_{(1);R_1-j}^2 > T_1 \text{ et } \sum_{j=1}^{l_2} \sigma_{(2);R_2-j}^2 > T_2, \quad (4)$$

où  $R_1$  et  $R_2$  sont les rangs des deux matrices dépliantes. Dans ce cas, les rangs du sous espace de réverbération dans chaque mode sont égaux à  $r_1 = R_1 - l_1 + 1$  et  $r_2 =$

$R_2 - l_2 + 1$ . Nous obtenons ensuite les matrices  $U_r^{(1)}$  et  $U_r^{(2)}$  en prenant respectivement les  $r_1$  et  $r_2$  premières colonnes des matrices des vecteurs propres gauches  $U^{(1)}$  et  $U^{(2)}$ . Nous calculons enfin le tableau 3D qui engendre le sous espace de réverbération dans le bloc  $(i, j)$  [6] :

$$\mathbf{Y}_{i,j}^r = \mathbf{Y}_{i,j} \times_1 U_r^{(1)} . U_r^{(1)H} \times_2 U_r^{(2)} . U_r^{(2)H} \times_3 U^{(3)} . U^{(3)H},$$

où  $U^{(3)}$  est la matrice des vecteurs propres gauches de la troisième matrice dépliant de  $\mathbf{Y}_{i,j}$ .

Le traitement sur tous les blocs permet d'obtenir le tableau 3D  $\mathbf{Y}^r$  engendrant le sous espace de réverbération. Nous récupérons le sous espace engendrant le signal utile plus bruit blanc en calculant  $\mathbf{Y}^o = \mathbf{Y} - \mathbf{Y}^r$ . Nous décomposons enfin le tableau 3D pour récupérer les différentes images. Les traitements classiques comme le FANB spatio-temporel [4] sont appliqués sur toutes les images.

## 5 Traitement des données réelles

Une simulation dans [6] a montré que l'extension des méthodes à sous espace permet de séparer des échos de même puissance s'ils ont des propriétés de diversité temporelle différente. Nous vérifions maintenant ces résultats sur des données réelles de réverbération de fond.

Le signal émis est une Fréquence Modulée Hyperboliquement (FMH) de fréquence centrale 1200 Hz, de bande 100 Hz et de durée 4 s. Le signal reçu est démodulé par rapport à 1200 Hz et sous échantillonné d'un rapport 20. L'antenne réceptrice est linéaire et constituée de 128 capteurs espacés de 0,52 cm. Nous appliquons le PCI 3D sur 4 images qui peuvent être consultées dans [5]. Nous présentons le résultat de deux récurrences : une contenant la cible localisée loin de la réverbération et une autre avec la cible noyée dans la réverbération. Nous comparons les résultats par rapport au PCI 2D développé dans [5].

Les figures 5 et 6 montrent le nombre de fausses alarmes, à probabilité de détection fixée, en fonction du seuil de détection pour les deux récurrences. Pour la récurrence contenant la cible noyée dans la réverbération, le PCI 3D est plus performant et en particulier il n'y a plus de fausses alarmes pour un seuil de détection proche de la valeur de la cible (seuil correspond à 1). En revanche, le PCI 3D et le PCI 2D ont des performances quasiment identiques sur les autres récurrences contenant la cible loin de la réverbération. En effet sur ces récurrences, le PCI 2D est déjà très performant et supprime la presque totalité des fausses alarmes.

## 6 Conclusion

Cette article a montré que la diversité temporelle est un contraste intéressant pour distinguer certains échos de réverbération de l'écho cible. Ce nouveau contraste nous a permis de développer une méthode pour supprimer les échos de fond. Elle est basée sur l'extension de l'algorithme du PCI aux tableaux 3D qui nécessite l'utilisation de la HOSVD [2]. Nous avons effectué une étude sur le rang des matrices dépliantes pour utiliser au mieux le PCI 3D. Les résultats sur données réelles avec la récurrence contenant

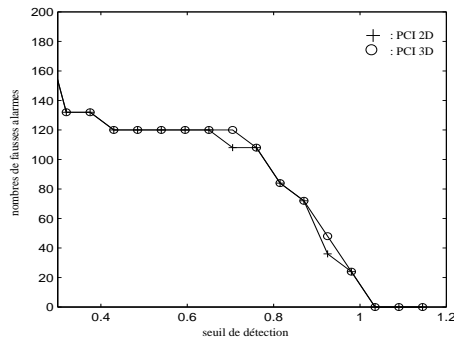


FIG. 5: Comparaison entre le PCI 2D et le PCI3D pour la cible loin de la réverbération.

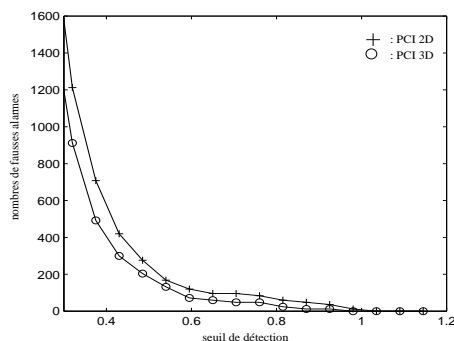


FIG. 6: Comparaison entre le PCI 2D et le PCI3D pour la cible noyée dans la réverbération.

la cible noyée dans la réverbération sont bons et encourageants pour la suite du travail.

Les perspectives concernent surtout l'amélioration des résultats sur données réelles en utilisant plus d'images sonar et aussi d'autres données réelles. Nous voulons aussi utiliser le contraste de diversité spatiale pour supprimer les échos de surface.

## Références

- [1] I. P. Kirsteins et D. W. Tufts. *Adaptive Detection Using Low Rank Approximation to a Data Matrix*. IEEE Trans. on Aero. and Elect. Syst., Janvier, 1994.
- [2] L. De Lathauwer. *Signal Processing based on multilinear algebra*. Rapport de thèse, Septembre, 1997.
- [3] G Ginolhac et G. Jourdain. *Quelques résultats concernant la méthode PCI pour la détection en présence de réverbération*. Gresti'99. Vannes, Septembre, 1999.
- [4] G Ginolhac et G. Jourdain. *Detection in presence of reverberation*. OCEANS. Providence, USA, Septembre, 2000.
- [5] G Ginolhac et G. Jourdain. *Algorithmes spatio-temporels basés sur la méthode PCI pour la détection en présence de réverbération*. Journées d'Acoustique Sous Marine. Brest, Décembre, 2000.
- [6] N. Le Bihan et G Ginolhac. *Subspace methods for 3D arrays*. PSIP'01. Marseille, Janvier, 2001.