Tomographie acoustique passive. Nouveau concept d'observation du milieu océanique

Cedric Gervaise, Cornel Ioana, Simon Vallez, Arnaud Null Jarrot, André Quinquis

▶ **To cite this version:**

Cedric Gervaise, Cornel Ioana, Simon Vallez, Arnaud Null Jarrot, André Quinquis. Tomographie acoustique passive. Nouveau concept d'observation du milieu océanique. GRETSI 2007 - XXIème Colloque francophone de traitement du signal et des images, Sep 2007, Troyes, France. pp.605-608. hal-00349539

HAL Id: hal-00349539
https://hal.science/hal-00349539

Submitted on 31 Dec 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Tomographie acoustique passive – nouveau concept d'observation du milieu oceanique

C. GERVAISE[1], C. IOANA[2], S. VALLEZ[1], A. JARROT[1], A. QUINQUIS[1]
[1]: ENSIETA, Laboratoire E3I2 (EA 3876), 2 rue François Verny, 29806 Brest
E-mails : [cedric.gervaise, jarrotar,vallezsi,quinquis] @ensieta.fr
[2]: GIPSA Lab (CNRS UMR 5083), Département Images et Signaux, 961 rue de la Houille Blanche
38402 Saint Martin d'Herès – France, E-mail : cornel.ioana@lis.inpg.fr

Résume - Afin de répondre aux besoins de discrétion, d'écologie et de connaissance du milieu sous-marin sur des grandes distances, le concept de la tomographie océanique passive est devenue en domaine émergent dans la communauté mixte acoustique sous-marine et traitement du signal. Les difficultés en terme de traitement du signal sont liées à l'absence d'informations a priori sur la nature des signaux naturels ainsi qu'à la complexité du milieu sous-marin caractérisé par le niveau des perturbations (bruit, effet de propagation divers). Dans ce contexte, les méthodes développées ont pour objectif de base l'analyse des signaux ambiants permettant ainsi de retrouver les paramètres du canal étudié. Le principe général que nous utilisons repose sur la combinaison des aspects physiques du contexte de travail et des outils d'analyse des signaux aptes à offrir une représentation appropriée à l'extraction des paramètres. Les résultats obtenus sur des signaux obtenus à partir de configurations réelles justifient la feasbilité de ce concept ainsi que les pistes de travail futures.

Abstract - In order to provide the discretion, ecology and large range underwater characterization capabilities, the concept of oceanic passive tomography became an emergent field of interest for both acoustic and signal processing communities. The difficulties in terms of signal processing are mainly related to the lack of information about the nature of received signals as well as to the complexity of underwater environment. In this context, the proposed method is aimed to analyse the environmental signals in order to find the parameter of the channel. The general concept is based on the combination of physical context and the signal analysis tools, the objective being the setup of an appropriate representation space for channel parameter extraction. The results provided by real data prove the feasibility of this concept.

1. Introduction

Recouvrant 70% de la surface terrestre, les océans jouent un rôle essentiel dans le système terre. L'océanographie s'intéresse tant à la compréhension des phénomènes physiques en son sein qu'à leur modélisation, leurs prévisions et les prévisions de leurs impacts. Afin d'alimenter ces études, le recueil de mesures *in situ* nécessaires par sondes conduit souvent à un sous-échantillonnage spatial et une mise en place coûteuse compte tenu de l'étendue et de l'hostilité des milieux océaniques. Cependant, lorsque les phénomènes physiques étudiés ont une influence sur les propriétés acoustiques du milieu, il est possible d'étudier ces derniers au travers de la mesure acoustique du canal océanique. La mesure acoustique du canal consiste à faire propager une onde acoustique dans celui-ci et a observé les distorsions introduites par la propagation pour retrouver les propriétés du canal. Cette méthodologie, nommée tomographie acoustique océanique et développée depuis les années 80, permet d'inférer les propriétés des océans sur des échelles spatiales et temporelles variables [1]. La tomographie est utilisée tant dans les milieux profonds où elle conserve son nom que dans les milieux petits fonds où elle devient inversion géo-acoustique (où on recherche les propriétés de la colonne d'eau et du fond).

Après avoir prouvé la faisabilité d'une inversion géo-acoustique des milieux petits fonds dans les années 90 [2], depuis le début des années 2000 de nouvelles contraintes sont posées à l'inversion acoustique pour produire des solutions opérationnelles :

- la rapidité de mise en œuvre du procédé tomographique, sachant que la tomographie active fait habituellement appel à des réseaux de capteurs dont le déploiement est relativement coûteux en temps opérationnel et moyens
- la discrétion acoustique du procédé sachant que lors de l'étude des caractéristiques du canal interfère avec les autres acteurs de la scène sous-marine, naturels (la faune) et/ou artificiels (systèmes de communication, militaires).

Ces contraintes ont donné lieu à la naissance du concept de tomographie acoustique passive où l'on remplace les émissions acoustiques actives par les sources d'opportunité naturellement présentes dans le milieu [2]. Ce concept a été développé lors de notre participation au projet étude amont MODE CA/2003/06/CMO (du Janvier 2004 au Janvier 2007). Les difficultés en terme de traitement du signal sont liées à l'absence d'informations a priori sur la nature des signaux naturels ainsi qu'à la complexité du milieu sous-marin caractérisé par le niveau des perturbations (bruit, effet de propagation divers). Dans ce contexte, les méthodes développées ont pour objectif de base l'analyse des signaux ambiants permettant ainsi de retrouver les paramètres du canal étudié. Le principe général que nous utilisons repose sur la combinaison des aspects physiques du contexte de travail et des outils d'analyse des signaux aptes à offrir une représentation appropriée à l'extraction des paramètres. Ce principe fait l'objet de cette communication. Lors de la prise en compte des aspects physiques liés au milieu, nous pouvons construire un modèle réaliste du signal traversant ce milieu [2]. Ensuite, des méthodes d'analyse, prévues pour le travail

sans a priori sur le type de signal à traiter, permettront de fournir une caractérisation du contenu temps-fréquence du signal reçu.

Le papier est structuré de la façon suivante. Dans le paragraphe 2 nous présentons la problématique de la tomographie océanique passive. Nous allons mettre en évidence les problèmes de traitement du signal induits par le contexte de la tomographie océanique passive. Le paragraphe 3 sera consacré à l'architecture générale d'analyse des signaux. Le fonctionnement de cette architecture, dans le contexte des configurations et données réelles, fera l'objet du paragraphe 4. Le paragraphe 5 présente les conclusions ainsi que les travaux futurs dans ce domaine.

2. Le concept de tomographie océanique passive

Afin de répondre aux besoins de discrétion (souhaitable par les opérations militaires), d'écologie (afin de protéger la faune marine) et de connaissance du milieu sous-marin sur des grandes distances, le concept de la tomographie océanique passive est devenue en domaine émergent dans la communauté mixte acoustique sous-marine (l'utilisateur premier de ce concept) et traitement du signal (en raison des problématiques nouvelles imposées par ce concept). Conceptuellement, la tomographie acoustique passive est constituée par l'ensemble de méthodes d'analyse des signaux d'*opportunité* existants dans le milieu à caractériser et d'estimation des paramètres physiques du canal à partir de l'analyse des signaux d'opportunité. Le bruit naturel de la mer, le bruit de bateaux et les mammifères sous-marins constituent trois exemples de sources de signaux d'opportunité. Lorsque les méthodes d'inversion à partir du bruit naturel et de bateaux demeurent actuellement inappropriées au contexte de la tomographie passive [2], un nombre important de chercheurs ont commencé, à la fin des années 90, à s'intéresser aux vocalises de mammifères sous-marins. Nous citons ici les travaux de Thode et *all* [3] qui propose l'utilisation d'une antenne linéaire verticale et l'inversion du fond de la mer en utilisant les signaux de baleines. Dans le contexte du projet MODE, nous avons étudié les techniques d'inversion en aveugle basées sur les méthodes temps-fréquence. Lors de ce projet, nous nous sommes aperçus des difficultés d'analyse des signaux causées principalement par le manque d'hypothèse quant aux signaux émis et à la position de la source. Le bruit spécifique au milieu sous-marin ainsi que les effets de propagation aléatoires sont des difficultés supplémentaires devant le système d'analyse des signaux faisant partie du concept de la tomographie.

Du point de vue opérationnel, nous avons proposé et étudié trois concepts de tomographie passive, définis en fonction du contexte et des hypothèses sur la nature de source :

- La tomographie discrète qui repose sur un système actif émettant des signaux *proches* du bruit ambiant. La similarité du contenu temps-fréquence du signal émis par rapport au bruit existant dans le milieu confère le caractère discret à ce concept. En terme de traitement du signal, une analyse efficace des signaux ambiants s'impose afin de trouver les composantes appropriées pour la procédure d'inversion [5];
- La tomographie assisté qui utilise comme source d'opportunité une entité coopérante dont on connaît la position. La seule inconnue est le signal émis qui devra être estimé [2] ;
- La tomographie autonome qui est le concept le plus complexe en raison de la méconnaissance du signal émis ainsi que de la position de la source. Mise à part l'estimation de la forme du signal émis, la prise en compte du mouvement devra aussi être envisagée [2].

En terme de traitement du signal nous proposons une architecture d'analyse unique qui repose sur l'utilisation de la description physique du contexte lors de la caractérisation paramétrique de la phase instantanée du signal reçu. La déscription de cette architecture ainsi que son adaptation aux trois principes de la tomographie passive font l'objet du paragraphe suivant.

Le développement de ces concepts a nécessité la mise en oeuvre de plusieurs campagnes de mesure en mer destinées à fournir les scenarii requis par la construction des outils d'analyse de signaux et d'inversion. Une de ces campagnes a été réalisée en octobre 2005 dans le golfe de Gascogne et a été appelée PASSTIME2005 [4].

Fig. 1 : Configuration utilisée lors de la campagne PASSTIME

En terme de signal émis, nous avons utilisé des signaux « classiques » (sinusoïdes , chirps linéaires et cubiques) ainsi que des signaux similaires aux vocalises des mammifères sous-marins. La maîtrise de la forme d'onde émise nous a permis d'avoir une estimation théorique du milieu caractérisé qui a été utilisée comme référence pour l'étude des méthodes en contexte aveugle. Les configurations de réception ont été définies par rapport aux trois principes introduits ci-dessus. Plus précisément, dans le cas de la tomographie discrète, un nombre de 320 d'enregistrements de vocalises de mammifères a été effectué, l'objectif étant de caractériser ces signaux afin de synthétiser la forme d'onde utilisée par l'inversion active [5]. Concernant la tomographie assistée, le but est de remonter aux paramètres du canal (ie la réponse impulsionelle) exclusivement par des moyens passifs. La vérification avec la référence est effectuée à partir de plus de 2000 enregistrements. Enfin, la tomographie autonome a été matérialisée par l'introduction de scénarii réalistes de mouvement dans les configurations utilisées pour la tomographie assistée.

3. Architecture d'analyse des signaux

Comme le contenu temps-fréquence des signaux est généralement non-linéaire nous avons orienté nos recherches sur des techniques de modélisation

polynomiale de la phase et/ou de déformation (warping) [3]. Indépendamment du contexte d'emploie, le signal reçu par le système de tomographie passive, *x*, est généralement composé des versions atténuées et retardées du signal émis, *s*, par la source d'opportunité.

$$x(t) = \sum_k \alpha_k s(t - \tau_k) + n(t) \qquad (1)$$

où *n* est l'ensemble de perturbations (bruits, signaux parasites, etc). Comme ce signal *s* est inconnu, l'analyse paramétrique de sa phase instantanée, dans le contexte du mélange convolutif (1), a été envisagée. Comme modèle paramétrique nous avons choisi celui polynomial, grâce à son caractère général.

$$s(t) = \exp\left[j2\pi\phi(t) \right]; \phi(t) = \sum_{i=1}^{N} a_i t^i \qquad (2)$$

De plus, des outils d'estimation des paramètres polynomiaux performants, en termes de robustesse au bruit et de résolution, ont été proposés (voir [6] pour en aperçu sur ces méthodes) à partir du concept de la fonction d'ambiguïté d'ordre supérieur.

La caractérisation obtenue par cette méthode permet de construire l'espace de représentation le plus approprié pour l'extraction des paramètres du canal. Cet espace est défini par la stationarisation du mélange (1) réalisée par déformation (warping) temps-fréquence, possible grâce à l'estimation du modèle (2). Ce principe est illustré par l'exemple suivant. L'espace déformé est constitué par un domaine temps-fréquence « tourné » où les différentes arrivées seront stationnarisées. Ensuite, une simple analyse spectrale à haute résolution permet d'obtenir les fréquences – directement reliées aux paramètres du canal matérialisés par des retards et atténuations.

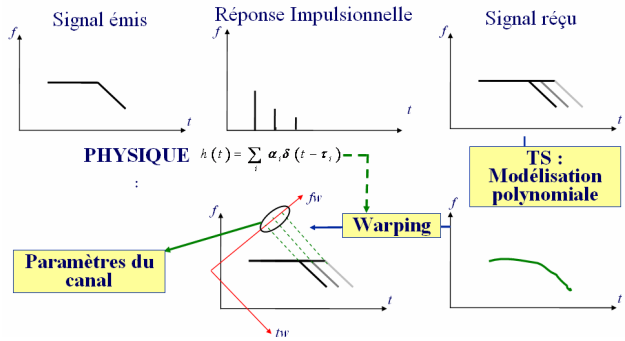

Fig. 2 : Principe général utilisé pour la caractérisation du milieu marin en utilisant des signaux ambiant

Dans cet exemple nous remarquons la symbiose qui caractérise l'architecture que nous proposons. Grâce à l'analyse polynomiale de la phase (requise par l'absence des informations sur le signal émis) et la description de la physique du problème, nous pouvons, via l'opération warping, relier les paramètres du signal de ceux du milieu. Ce principe est à la base de l'architecture du traitement associée à chacun de concepts et il est illustré par la suite.

Dans le cas de la tomographie discrète nous remarquons (Fig 3) que seule la modélisation polynomiale est nécessaire afin de fournir les paramètres requis pour la synthèse du signal proche, en terme de perception audio, du fond acoustique du milieu.

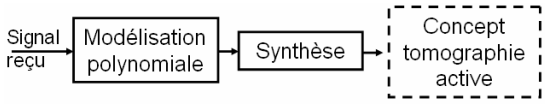

Fig. 3 : Architecture d'analyse pour la tomographie discrète

Par la suite, ce signal synthétique est utilisé, comme signal de référence, dans une configuration tomographique active. Le principe dévient plus compliqué lorsqu'on se place dans en contexte assisté. Comme nous ne sommes pas autorisés à émettre, seul le signal reçu sera utilisé conformément au principe illustré par la figure 4.

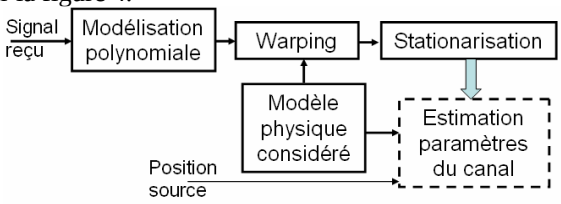

Fig. 4 : Architecture d'analyse pour la tomographie assistée

Le signal reçu sera analysé afin de retrouver, dans en contexte multi-composants, les coefficients polynomiaux caractérisant la phase. Ces paramètres ainsi que les hypothèses permises concernant la modélisation physique du canal permettront de définir l'espace de représentation approprié pour l'extraction des paramètres du canal. Ceux-ci seront reliés géométriquement grâce à la position de la source supposée connue (Fig. 4). Ceci n'étant plus le cas de la tomographie autonome, nous constatons sur la figure 5 que l'analyse de la dynamique de la source s'impose ce qui implique en traitement multi-capteurs

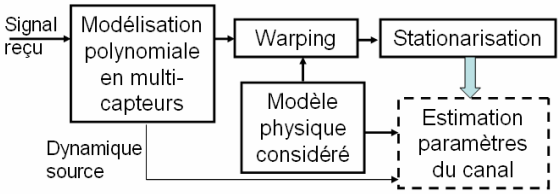

Fig. 5 : Architecture d'analyse pour la tomographie autonome

Plus précisement, compte tenu de l'approximation « classique » d'un vecteur de mouvement par une loi polynomiale, la modélisation polynomiale de la phase constitue donc un outil efficace pour l'analyse de la dynamique de la source [6]. Cependant, la difficulté principale consiste à séparer le contenu temps-fréquence du signal émis de celui introduit par l'effet Doppler. Comme solution, nous avons montré que la modélisation polynomiale à plusieurs capteurs pourrait offrir une solution efficace [papier ECUA06].

L'architecture de traitement proposée dans ce paragraphe a été testée à travers de nombreuses configurations réelles. Le paragraphe suivant n'illustre que les principaux résultats obtenus dans le contexte de la tomographie passive.

4. Résultats

L'efficacité de l'architecture présentée précédemment a été étudiée dans le cadre d'une campagne de mesure PASSTIME organisée en octobre 2005 dans le Golf de Gascogne [4].

Concernant la tomographie discrète, l'exemple suivant montre la capacité de l'architecture d'analyse des signaux à caractériser analytiquement la phase instantanée d'un signal réel. Nous constatons que, malgré le caractère multi-composants et perturbé du signal reçu, les deux structures sont bien estimées.

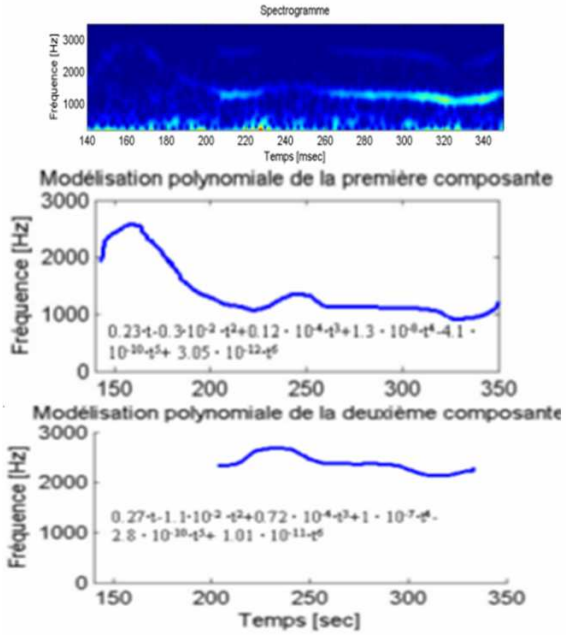

Fig. 6 : Modélisation polynomiale de phase d'une vocalise de mammifère sous-marin

Ceci est principalement expliqué par la caractérisation correcte qui conduit à une stationnarisation efficace du signal reçu (figure 7.b).

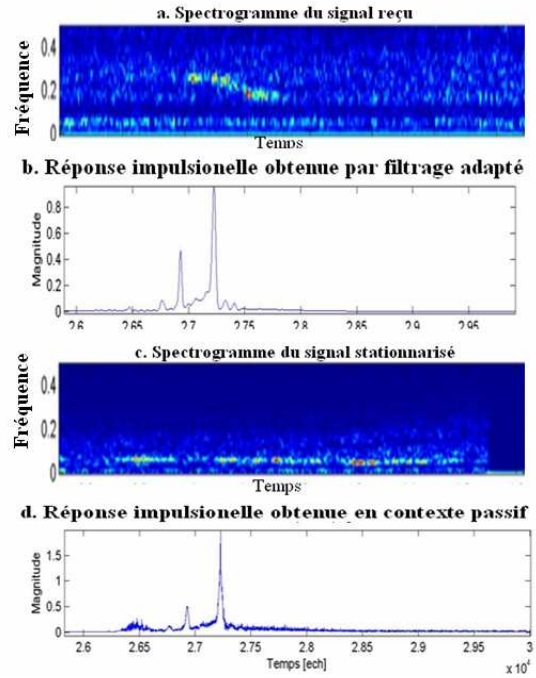

Fig. 7 : Exemple de résultat d'estimation des paramètres d'un milieu par le concept de la tomographie acoustique passive

Les résultats d'estimation des paramètres du canal obtenus en configuration passive ont été comparés avec les résultats du filtrage adapté - outil typique à la tomographie active et qui, dans le contexte de la tomographie passive, constitue la référence en terme de performances attendues. La figure 7 présent un résultat obtenu pour un des 2000 enregistrements de la campagne PASSTIME. Nous remarquons la bonne conconrdance entre les résultats obtenus en configuration passive (figure 7.c.) et ceux fournis par le filtrage adapté (figure 7.d).

5. Conclusions et perspectives

La tomographie océanique passive est un nouveau concept decaracterisation du milieu sous-marin qui présente un intérêt grandissant dans le contexte opérationnel actuel. Dans ce papier nous avons synthgetisé nos travaux dans ce domaine sous la forme d'une architecture générale pour l'analyse des signaux dans un contexte « aveugle » et perturbé – les difficultés principales en terme de représentation de signaux. Cette architecture s'articule autour de la modélisation polynomiale de la phase du signal reçu et de la transformation de celui-ci dans un espace approprié à l'estimation des paramètres du canal. Cette transformation repose sur l'utilisation conjointe des techniques de déformation et l'a priori sur le modèle physique du canal. Le nombre important des tests nous a permis de comparer objectivement plusieurs méthodes de traitement et, sur plan opérationnel, de prouver la faisabilité du concept de la tomographie acoustique passive.

En perspectives, nos travaux se concentrons sur la prise en compte des configurations de plus en plus complexes en prenant en compte des phénomènes diverses comme la dispersion et le mouvement généralisé.

REMERCIEMENTS : Les auteurs remercient au Centre Militaire d'Océanographie de Brest pour le support financier de ce travail, sous le contrat CA/2003/06/CMO, ainsi que pour les échanges scientifiques très riches.

Références

[1] Munk W., Worcester P., Wunsch C., *Ocean Acoustic Tomography*, Cambridge University Press, 1995.

[2] C. Gervaise, S. Vallez, C. Ioana, Y. Stéphan, & Y. Simard, "Passive acoustic tomography: review, new concepts and application using marine mammals", Accepted in *Journal of Marine Biology Association of United Kingdom*, January 2007.

[3] Thode A.M, D'Spain G.L, Kuperman W.A, Matched-field processing, geoacoustic inversion and source signature recovery of blue whale vocalizations, *J. Acoust.Soc.Am* **107**, n°3, 2000.

[4] C. Gervaise, S. Vallez, Y. Stephan, G. Theuillon, "PASSTIME2005 at sea trial : a passive acoustic tomography experiment", *Conférence Caractérisation du Milieu Marin*, Brest, Octobre 2006.

[5] L. Cros., C. Ioana, A. Quinquis, Synthesis from underwater data : application to the oceanic discrete tomography, *in the proceedings of OCEANS05*, Brest, France, 2005 [

[6] C. Ioana, A. Quinquis, "Time-Frequency Analysis using Warped-Based High-Order Phase Modeling", EURASIP Journal of Applied Signal Processing, Vol. 2005, No. 17, pp. 2856-2873, September, 2005.

[7] C. Ioana, A. Quinquis, Y. Stephan, "Feature Extraction from Underwater Signals using Time-Frequency Warping Operators", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 628-646, July 2006.