

CONTRIBUTION A LA TOMOGRAPHIE ACOUSTIQUE PASSIVE – ALGORITHMES D'INVERSION TEMPS-FREQUENCE-ESPACE MUSIC ADAPTES AUX SOURCES NATURELLES TRANSITOIRES

C. Gervaise¹, E. Bou-Mansour¹, S. Vallez¹, H. Le Floch¹, A. Martin¹, A. Khenchaf¹, Y. Simard²

¹ Laboratoire E3I2, EA 3876, ENSIETA, 2 Rue François Verny, 29806 Brest, France,

² Institut des Sciences de la Mer, Université de Québec à Rimousky, 310 Allée des Ursulines, Rimouski, Québec G5L 3A1, Canada,

cedric.gervaise@ensieta.fr, simardy@dfo-mpo.gc.ca

1. RESUME

La présente communication aborde la définition d'algorithmes d'estimation aveugle de la réponse spatio-temporelle d'un canal acoustique sous-marin lorsqu'il est insonifié par un signal transitoire à la signature temps-fréquence marquée comme des vocalises de mammifères marins ou des signaux d'interceptions d'une activité sonar. Ces algorithmes constituent le premier étage d'un système de tomographie acoustique passive et permettent d'observer les distorsions induites par la propagation, ces observations étant ensuite utilisées pour retrouver par inversion les paramètres d'intérêt du milieu. Une description des algorithmes est effectuée et leur validation est envisagée par leur application à des données réelles issues d'une campagne expérimentale dédiée à l'étude des mammifères marins dans l'estuaire du Saint-Laurent réalisée entre 2002 et 2003.

2. INTRODUCTION

La tomographie acoustique océanique développée depuis 1979 et initialement proposée par Munk et Wunsch [1] constitue un moyen rapide et précis d'évaluation des propriétés acoustiques ou physiques d'un milieu marin sur de larges zones. A partir d'une expérimentation de tomographie constituée d'une phase d'émission, de propagation et de mesure du champ acoustique induit, les distorsions causées par la propagation permettent de retrouver par inversion les propriétés d'intérêt du milieu. Trois grandes classes de méthodes de tomographie (*Matched Time Delay Processing* [1] , *Matched Field Processing* [2] et *Matched Impulse Response Processing* [3]) peuvent être mises en avant suivant le type de milieu à étudier (eaux profondes et eaux peu profondes) et suivant le type de propriétés visées (profils de célérité, propriétés géo-acoustiques du fond, profils de courants). Sous l'hypothèse d'une propagation par rayons acoustiques, la nature multi-trajets des arrivées constitue la principale distorsion observable par la mesure des temps de trajets, des atténuations et des angles d'arrivées de différents rayons acoustiques. La précision de ces mesures conditionne la qualité des inversions et peut être optimisée par des émissions acoustiques puissantes, récurrentes et résolvantes et pour des positions de sources et de récepteurs connues et maîtrisées. Cependant, le recours à de telles caractéristiques est parfois interdit, notamment dans le contexte d'une utilisation militaire où la discrétion acoustique peut être exigée et dans le cadre du respect de la faune marine que ces émissions peut perturber.

La communauté scientifique a proposé l'utilisation des sources acoustiques d'opportunité naturellement présentes dans le milieu afin de réaliser l'inversion et d'éviter une émission active, donnant ainsi naissance à la tomographie acoustique passive. Les applications relatées dans la bibliographie utilisent le bruit de mer, le bruit rayonné par les navires et les vocalises de mammifères marins ainsi que des antennes horizontales ou verticales comme systèmes de

mesures [4] [5] [6] . En étudiant les points communs et différences de ces applications, une classification originale en trois niveaux de complexité croissante est proposée.

Le premier niveau de difficulté intitulé Tomographie Acoustique Océanique Discrète autorise une émission active mais utilise le niveau de bruit ambiant pour masquer celle-ci. Il faut, ici, choisir la forme d'onde à émettre et de développer l'algorithmie associée pour former un pré-processeur de traitement du signal afin de relever cette onde faiblement énergétique.

Le second niveau de difficulté intitulé Tomographie Acoustique Passive Assistée envisage la présence d'une entité coopérante à proximité du système de tomographie dont l'activité naturelle génère un rayonnement acoustique dans le canal (bruit de machinerie, bruit de rotation de l'hélice, activité acoustique non dédiée à la tomographie). La position de l'entité est supposée connue par le système de tomographie alors que le signal émis est inconnu. Il convient de développer des méthodes d'estimation aveugle de la réponse impulsionnelle adaptées aux sources de rayonnement des entités.

Le troisième niveau de difficulté intitulé Tomographie Acoustique Passive Autonome utilise la présence d'une ou plusieurs entités non coopérantes dont l'activité génère un rayonnement acoustique dans le canal. Pour cette tomographie l'a priori disponible est minimal, le signal émis par la source et la position de l'émission étant tous deux inconnus.

Le présent article aborde la définition du premier étage d'un système de tomographie passive réalisant l'estimation aveugle de la structure spatio-temporelle des arrivées à partir du champ de pression mesuré par un ou plusieurs capteurs sous les hypothèses d'une propagation par rayons acoustiques et d'une source ponctuelle émettant un signal transitoire à la signature temps-fréquence marquée. Pour la tomographie passive assistée, l'estimation de la réponse impulsionnelle du canal est réalisée par un processeur temps-fréquence aveugle alors que pour la tomographie passive autonome, les potentialités des représentations temps-fréquence-espace récemment proposées par Amin [7] [8] sont explorées et les voies nécessaires à leur adaptation au contexte de l'acoustique sous martine sont identifiées. Une validation sur données réelles est finalement proposée pour les algorithmes dédiés à la tomographie passive assistée.

3. ALGORITHMES TEMPS FEQUENCE AVEUGLE POUR L'ESTIMATION DE LA REPONSE IMPULSIONNELLE D'UN CANAL ACOUSTIQUE

Concernant le concept de la tomographie acoustique passive assistée, la position de la source est connue alors que le signal émis est inconnu et la phase d'inversion nécessite la connaissance de la réponse impulsionnelle du canal acoustique entre la source et le récepteur [12]. Cette section a pour objectif de fournir un processeur temps-fréquence permettant l'estimation aveugle de la réponse impulsionnelle avec une perte de l'origine des temps et des niveaux absolues des amplitudes. Sous les contraintes et hypothèses énoncées dans l'introduction, le modèle de mesures disponibles est fourni par :

$$m(t) = h \otimes e(t) + b(t) = \left[\sum_{i=1}^{+\infty} a_i \delta(t - \tau_i) \right] \otimes e(t) + b(t) = \sum_{i=1}^{+\infty} a_i e(t - \tau_i) + b(t) \quad (1)$$

où $\delta(t)$ est l'impulsion de Dirac, $e(t)$ est le signal émis, $h(t)$ est la réponse impulsionnelle du canal, τ_i est le temps de propagation le long du rayon acoustique d'indice i et a_i l'atténuation de ce rayon, $b(t)$ est un bruit supposé stationnaire d'ordre 2, blanc, distribué suivant une loi normale de moyenne nulle et de variance σ^2 .

L'étage de pré-traitement de la tomographie acoustique doit estimer les temps d'arrivée τ_i et les atténuations a_i , $i \in \{1, +\infty\}$ à partir de la donnée d'une série de N mesures échantillonnées à la période T_e , $m(jT_e)$, $j \in \{1, N\}$.

Lorsque le signal $e(t)$ émis par la source est connu et que la mesure est constituée uniquement d'une arrivée décalée et atténuée, l'estimateur du maximum de vraisemblance du temps de propagation et de l'atténuation s'exprime simplement à partir de l'intercorrélation entre la mesure et le signal émis ou de manière équivalente à partir de la sortie du filtrage adapté :

$$\hat{\tau} = \underset{\tau}{\operatorname{argmax}}(\Gamma_{me}(\tau)); \hat{a} = \frac{\Gamma_{me}(\hat{\tau})}{\Gamma_{ee}(0)} \text{ où } \Gamma_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g^*(t-\tau)dt \quad (2)$$

Dans le cas d'une mesure constituée de plusieurs arrivées, sous la condition que les arrivées soient toutes résolues (l'écart temporel minimum entre deux arrivées successives est supérieur à l'inverse de la bande passante du signal), les estimateurs du maximum de vraisemblance des temps de propagation et des amplitudes s'obtiennent à partir de l'équation 2 en cherchant le i -ème maximum local pour le chemin d'indice i .

Lorsque $e(t)$ est un signal transitoire, l'espace de représentation temps-fréquence met bien en avant ses caractéristiques. Les transformées de Wigner Ville d'un signal $s(t)$ ou d'inter Wigner Ville de deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ définies par les équations 3 peuvent être de bons candidats pour réaliser ce changement d'espace de représentation.

$$\begin{aligned} \text{WV}_s(t, f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} s(t - \frac{\tau}{2})s^*(t + \frac{\tau}{2}) \exp(-2\pi j f \tau) d\tau \\ \text{WV}_{xy}(t, f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \frac{\tau}{2})y^*(t + \frac{\tau}{2}) \exp(-2\pi j f \tau) d\tau \end{aligned} \quad (3)$$

Flandrin [9] a fourni un équivalent du filtrage adapté dans l'espace temps-fréquence fondé sur l'intercorrélation entre les transformées de Wigner Ville : ainsi si une mesure $m(t)$ est constituée de la somme d'un signal $e(t)$ et d'un bruit $b(t)$, le détecteur optimal de la présence de $s(t)$ est basé sur l'intercorrélation $Q_1(\tau)$ entre les deux représentations temps-fréquence :

$$Q_1(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{WV}_{mm}(t, f) \text{WV}_{ee}(t - \tau, f) dt df \quad (4)$$

Lorsque le signal $e(t)$ est inconnue avec la loi de fréquence instantanée $f_i(t)$ est connue, un détecteur sous optimal peut être proposé [12] et est basé sur l'intercorrélation $Q_2(\tau)$ entre la transformée temps-fréquence de la mesure et une transformée idéale du signal source $s(t)$:

$$Q_2(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{WV}_{mm}(t, f) \times \delta(f - f_i(t - \tau)) dt df \quad (5)$$

où $\delta(t)$ est l'impulsion de Dirac.

Dans le cas d'une mesure $m(t)$ constituée de plusieurs répliques décalées et atténuées d'un même signal $e(t)$, les quantités $Q_1(\tau)$ et $Q_2(\tau)$ peuvent servir à la définition d'estimateurs des dates d'arrivée et des atténuations des répliques :

$$\hat{\tau}_i = \underset{\tau}{\operatorname{arg max}_i}(Q_1(\tau)); \hat{a}_i = \sqrt{\frac{Q_1(\hat{\tau}_i)}{\Gamma_{ss}(0)}} \quad (6)$$

où $\operatorname{arg max}_i$ indique l'action de rechercher le i -ième maximum local,

$$\hat{\tau}_i = \underset{\tau}{\operatorname{arg max}_i}(Q_2(\tau)); \hat{a}_i = \sqrt{Q_2(\hat{\tau}_i)} \quad (7)$$

Ainsi en tomographie passive, lorsque le signal $e(t)$ est inconnu et que $m(t)$ est disponible, on peut estimer la loi de fréquence instantanée d'une des répliques par une procédure adaptée comme la recherche et le suivi de maxima locaux sur une représentation temps-fréquence de $m(t)$ à faibles termes d'interférences (périodogramme, pseudo Wigner Ville lissée, transformée de Baraniuk [10]) ou par des approches paramétriques avec un a priori porté sur la loi de modulation comme par exemple une loi de phase polynomiale [11]. Une fois estimée cette loi de fréquence instantanée, on peut appliquer les estimateurs des temps et atténuations des arrivées par les équations 7 et définir ainsi un processeur temps-fréquence aveugle (voir figure 1) pour l'estimation de la réponse impulsionnelle du canal entre l'émetteur et le récepteur. Il doit être remarqué que les estimations des temps d'arrivées et atténuations sont données respectivement à une constante additive et multiplicative près.

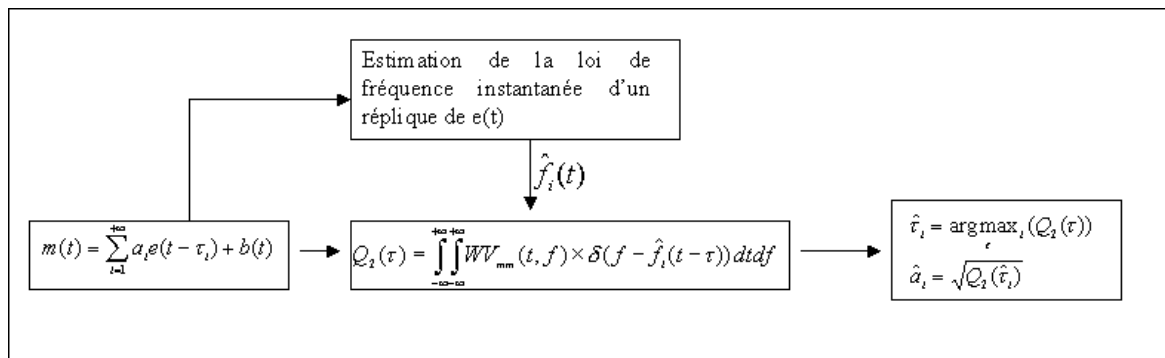


Figure 1 : Synoptique du processeur Temps Fréquence Aveugle pour la tomographie passive assistée

A partir de cette définition initiale du processeur temps-fréquence aveugle pour la tomographie passive assistée, plusieurs raffinements ont été fournis pour offrir une estimation du signal émis par la source [13], des performances d'estimation haute résolution de la réponse impulsionnelle [14], l'introduction d'outils temps-fréquence différents des transformées quadratiques de la classe de Cohen [15]. Cette section a proposé un traitement aveugle mono-capteur, cependant lorsque la position de la source est inconnue une redondance d'informations peut être exigée et obtenue par l'utilisation d'un réseau de capteurs. Ainsi la section suivante propose des algorithmes de traitement dédiés à cette configuration multi-capteurs.

4. ALGORITHMES TEMPS-FREQUENCE-ESPACE MUSIC POUR L'ESTIMATION AVEUGLE DE LA STRUCTURE SPATIO-TEMPORELLE DES ARRIVEES

Pour évaluer l'environnement acoustique, la tomographie passive autonome utilise des sources d'opportunité non coopérantes de positions inconnues et rayonnant un signal inconnu. La méconnaissance de la position de la source provoque une forte dégradation de la précision des estimations des paramètres d'intérêt. D'une part concernant l'estimation des paramètres de la colonne d'eau, une étude de prévision de performances et de conception optimale présentée dans [16] a démontré que l'on pouvait atteindre le même niveau de précision entre une tomographie active inversant les temps d'arrivées et une tomographie passive autonome inversant les temps et les directions d'arrivées des rayons acoustiques. D'autre part, les travaux présentés par Amin [8] [7] fournissent une solution pour mesurer les directions d'arrivée d'une série d'ondes planes insonifiant une antenne linéaire lorsque chacune de ces ondes est porteuse d'un signal transitoire à la signature temps-fréquence marquée. Ainsi ces outils semblent être prometteurs pour la tomographie acoustique passive autonome. Cette fonction de goniométrie est

réalisée dans un espace de représentation temps-fréquence-espace par des algorithmes à sous-espaces du type MUSIC [18] .

Pour présenter les outils temps-fréquence-espace, une antenne linéaire uniforme constituée de P capteurs espacés de q mètres est considérée. Cette antenne est supposée être insonifiée par N_s ondes planes avec des directions d'arrivées (mesurées par rapport à la normale de l'antenne) $\theta_s(i) \ i \in \{1, N_s\}$, chaque onde plane est supposée porter un signal transitoire de fréquence centrale f_0 et de bande B à la signature tempo-fréquentielle marquée vérifiant la condition 8.

$$\frac{1}{B} \gg \frac{L}{c} \quad (8)$$

où L est la longueur de l'antenne de mesure et c la vitesse du son

Après retour en bande de base et en supposant que $\mathbf{m}(t)$ est le vecteur des P mesures effectuées par les capteurs à l'instant t , le modèle de mesures est le suivant :

$$\mathbf{m}(t) = [\mathbf{A}]\mathbf{s}(t) + \mathbf{b}(t) \quad (9)$$

où $\mathbf{s}(t)$ est le vecteur des N_s signaux émis après retour en bande de base par les sources à l'instant t ,

$\mathbf{b}(t)$ est le vecteur des P bruits de mesure sur les P capteurs de l'antenne à l'instant t ,

$[\mathbf{A}]$ est une matrice $P \times N_s$ ayant pour colonne les 'steering' vecteurs des sources, soit :

$$[\mathbf{A}](u, v) = \exp(-2\pi j u f_0 \frac{q \sin(\theta_s(v))}{c}). \quad (10)$$

A partir d'un enregistrement de $\mathbf{m}(t) \ t \in [0, T]$ et pour un couple temps fréquence (t, f) , il est possible de bâtir une matrice carrée $P \times P$ nommée représentation temps-fréquence-espace de la mesure \mathbf{m} et notée $[\text{RTFE}_m]$ par :

$$[\text{RTFE}_m(t, f)](i, j) = \text{WV}_{m_i, m_j}(t, f), \ i \in \{1, \dots, P\}, \ j \in \{1, \dots, P\} \quad (11)$$

En se basant sur l'équation 9, la représentation temps-fréquence-espace du vecteur de mesures suit le modèle suivant :

$$[\text{RTFE}_m(t, f)] = [\mathbf{A}][\mathbf{S}](t, f)[\mathbf{A}]^H + [\text{RFTE}_b](t, f) \quad (12)$$

où la matrice $[\mathbf{S}](t, f)$ est une matrice carrée N_s par N_s composée des auto et inter-Wigner Ville des sources.

Il est à noter La matrice $[\text{RTFE}_m]$ suit une relation équivalente à celle de la matrice d'auto-corrélation spatiale des mesures lorsque les signaux sont aléatoires et stationnaires. La goniométrie peut donc être réalisée à partir de la matrice $[\text{RTFE}_m]$ et de sa décomposition en sous-espaces signal et bruit et donne naissance à la méthode du goniomètre temps-fréquence-espace MUSIC.

Le choix du couple (t, f) où est calculée la matrice-temps-fréquence-espace ainsi que la possibilité de moyennner cette matrice sur un domaine temps-fréquence donné sont deux degrés de liberté qui constituent les principaux apports de cette classe de méthodes et expliquent leurs gains de performances.

Ainsi ce choix permet de sélectionner les zones temps-fréquences à fort rapport signal à bruit, ceci ayant pour effet d'améliorer le contraste entre les valeurs propres du sous-espace signal et celles du sous-espace bruit et par voies induites d'améliorer la détection et la résolution angulaire du traitement.

D'autre part, quel que soit le nombre de sources, si il existe une zone temps-fréquence correspondant à une seule source, la matrice temps-fréquence-espace moyennée sur cette zone ne correspondra qu'à elle seule. Ainsi la goniométrie par la méthode temps-fréquence-espace MUSIC sera facilitée avec un sous-espace signal de dimension 1. La sélection de plusieurs zones temps-fréquence et la mise en parallèle de plusieurs goniomètres (un pour chaque zone) temps-fréquence-espace MUSIC permet alors le positionnement angulaire d'un nombre de sources supérieur au nombre de capteurs.

La figure 2 fournit un schéma synoptique de la mise en œuvre du processeur temps-fréquence-espace MUSIC aveugle pour la tomographie passive autonome.

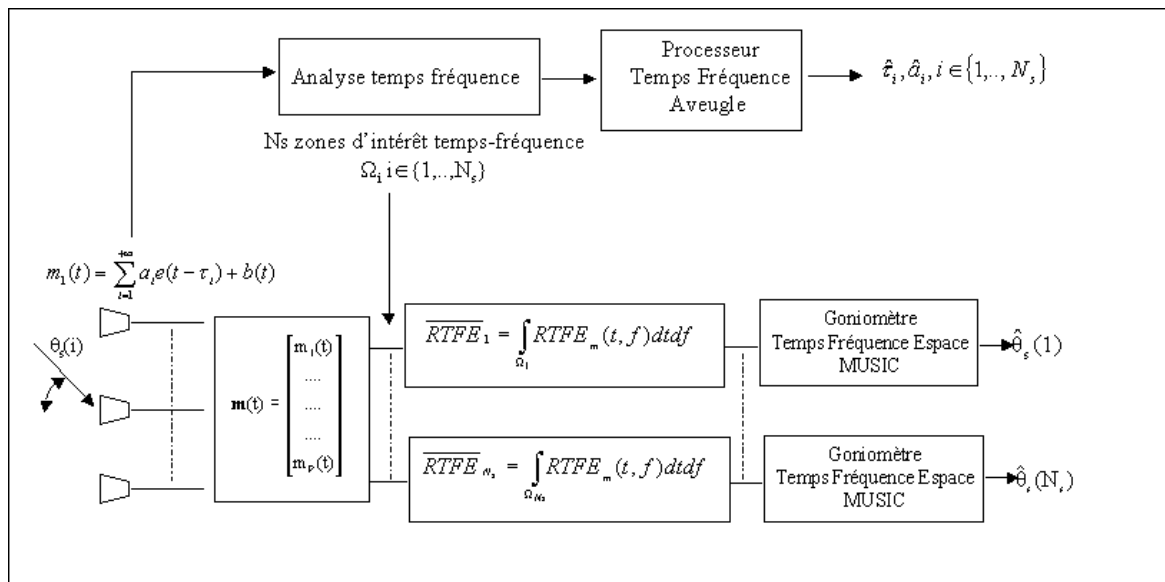


Figure 2 : Synoptique du processeur temps-fréquence-espace aveugle pour la tomographie passive autonome

La figure 3 propose à titre d'exemple le résultat de la goniométrie (obtenue par la mise en parallèle de 6 goniomètres temps-fréquence-espace) pour une antenne constituée de 5 capteurs espacés d'une demi-longueur d'onde et insonifiée par 6 ondes planes dont les directions d'arrivées sont successivement 1°, 10°, 20°, 30°, 40° et 50° avec un nombre de snapshots disponibles égale à 256, un RSB de 20 dB et des zones temps fréquence constituées de 50 couples (t,f) par source. Chaque source est une modulation quadratique de fréquence.

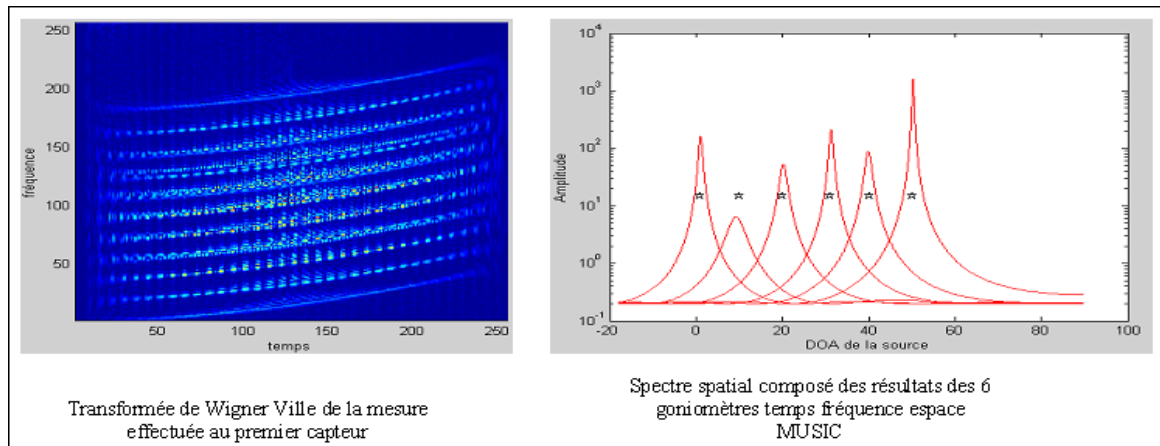


Figure 3 : Résultat du goniomètre temps fréquence espace MUSIC pour une antenne à 5 capteurs et 6 sources transitoires

Compte tenu des performances du goniomètre temps-fréquence-espace, celui-ci apparaît comme un bon candidat pour l'estimation aveugle de la structure spatio-temporelle des arrivées, donnée nécessaire à la tomographie passive autonome. Cependant une applicabilité complète pour des conditions réelles nécessite le dimensionnement de l'antenne pour que celle-ci soit effectivement insonifiée par des ondes planes et demande une adaptation large bande du goniomètre.

5. VALIDATION EXPERIMENTALE

Cette section est dédiée à la validation expérimentale du processeur temps fréquence aveugle pour la tomographie passive assistée à partir d'une série d'enregistrements de vocalises de mammifères marins réalisés dans l'estuaire du Saint Laurent à l'été 2003. Cette campagne [17] menée par l'Institut des Sciences de la Mer de Rimousky avait pour but l'étude de la répartition et du comportement des mammifères marins dans les lieux d'habitats sensibles. Ces expérimentations consistent à enregistrer les vocalises à partir d'un réseau très lâche, de grande ouverture, de bouées autonomes dans un site sensible à la tête du chenal principal du continent ou à partir d'un réseau côtier plus dense mais de faible ouverture. Ces enregistrements permettent alors la détection, l'identification et finalement le positionnement de ces mammifères par voie acoustique passive. La figure 4 présente le site d'études ainsi que la bathymétrie, un profil de célérité moyen et la position des bouées et du réseau côtier.

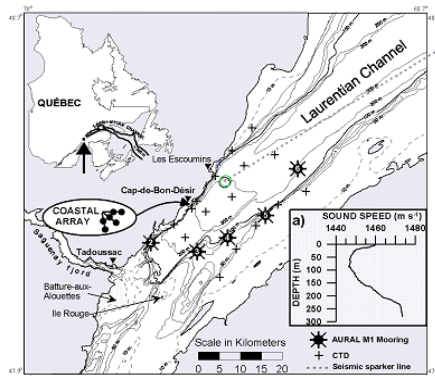


Figure 4 : Géométrie du site de la validation expérimentale

5.1 Validation sur données synthétiques réalistes

La première validation proposée est effectuée sur données synthétiques réalistes. La première phase de la création des données synthétiques a été l'obtention d'une réponse impulsionnelle caractéristique des sites d'expérimentation. Pour créer cette réponse impulsionnelle, le logiciel Bellhop a été utilisé pour simuler la propagation entre une source et un récepteur dont les caractéristiques sont fournies dans le tableau 1.

	Latitude	Longitude	Profondeur (m)
Source	48,25883	-69,47130	10
Récepteur	48,27149	-69,46090	175

Tableau 1: positions de l'émetteur et du récepteur pour la construction des données synthétiques

Ces coordonnées ont été retenues car elles correspondent aux positions d'un émetteur et du premier récepteur du réseau côtier pour lesquelles une émission active a été réalisée pour réaliser le positionnement acoustique de ce réseau. La réponse impulsionnelle mesurée lors de cette phase a alors permis de valider la réponse impulsionnelle théorique obtenue par le logiciel Bellhop.

La seconde phase de création des données synthétiques a été la création d'une excitation réaliste. Pour cela, une vocalise de béluga présent lors de la phase de positionnement du réseau a été sélectionnée, sa fréquence instantanée a été mesurée et une émission synthétique a été créée avec les caractéristiques données par l'équation 12.

$$e(t) = \exp(2\pi j \int_0^t f_i(u) du), t \in [0, 0.6s]; f_i(t) = 10^4 (-1.78t^3 + 1.43t^2 - 0.4t + 0.18) \text{ (en Hz)} \quad (12)$$

Finalement une mesure synthétique a été créée en appliquant l'équation 1 et la réponse impulsionnelle fut estimée par traitement actif en appliquant l'équation 2 et par traitement passif en réalisant une phase d'identification de la fréquence instantanée sur le périodogramme des mesures et en appliquant l'équation 5 avec la transformée de Wigner Ville lissée (voir figure 5).

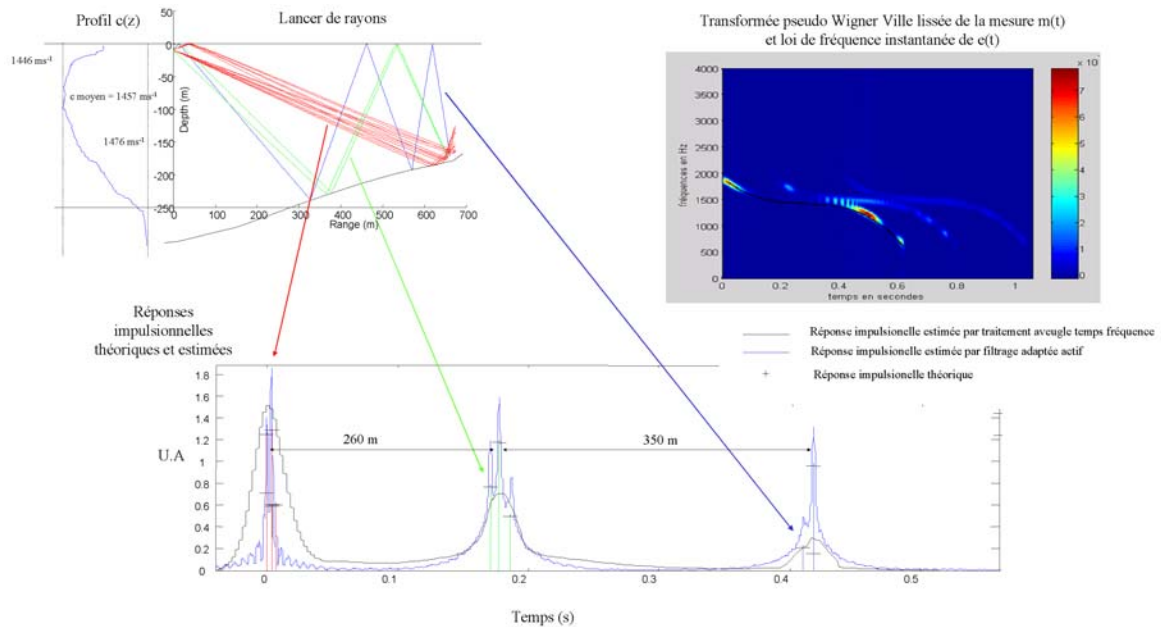


Figure 5 : Résultats des simulations sur les données synthétiques réalistes

Les positions de l'émetteurs et du récepteur situés à proximité de la surface et au niveau du fond ainsi que le profil de célérité provoquent l'apparition de trois paquets d'arrivées ayant une réflexion fond ou une réflexion surface, une réflexion fond et une réflexion surface puis deux réflexions surface et deux réflexions fond. La différence de temps d'arrivées entre les premier et second paquets est de l'ordre de 0.18 seconde ce qui correspond à une différence d'abscisse curviligne de l'ordre de 260 mètres (calculée avec la célérité moyenne de la colonne d'eau égale à 1457 ms^{-1}) et une différence entre les deuxième et troisième de l'ordre de 0.24 seconde correspondant à une différence d'abscisse curviligne de l'ordre de 350 mètres. A l'intérieur d'un paquet des différences de temps de propagation entre les arrivées sont bien plus faibles et d'ordres de grandeur variant de la milliseconde à la dizaine de milliseconde.

Le traitement temps-fréquence aveugle permet de distinguer à la fois les temps d'arrivée des paquets, les amplitudes des arrivées. Il est par ailleurs incapable de séparer les trajets à l'intérieur d'un paquet alors que le filtrage adapté actif le permet. Cette perte de résolution peut être attribuée à l'utilisation de la transformée Pseudo Wigner Ville Lissée dont les réglages optimisés pour supprimer les termes d'interférences induisent une perte de résolution. Il semble probable que le traitement plus complexe proposé dans [14] fournirait de bonnes performances pour séparer les trajets à l'intérieur d'un paquet.

5.2 Validation sur données réelles

Simultanément à la phase de positionnement des hydrophones du réseau côtier, des mammifères marins ont vocalisé et parmi les émissions enregistrées par le premier capteur, certaines présentent la structure temps-fréquence détaillées de la figure 6. Cette structure semble faire apparaître la présence de répliques résolues par le périodogramme.

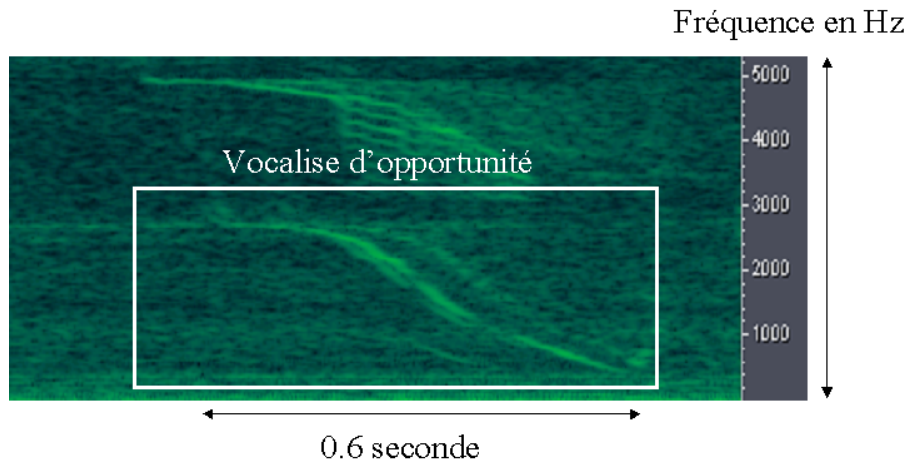


Figure 6 : Structure temps-fréquence d'une vocalise de béluga enregistrée par le premier capteur du réseau côtier d'hydrophones.

La figure 7 présente une estimation de la structure temporelle des arrivées par traitement aveugle temps-fréquence fournit une estimée de la réponse impulsionnelle du canal entre le mammifère marin et le récepteur. Cette structure temporelle fait apparaître deux paquets d'arrivées séparés de 0.32 seconde correspondant à une différence d'abscisse curviligne de 466 mètres. D'autre part, un zoom sur le premier paquet fait apparaître la présence de plusieurs trajets. Etant donné que la position du mammifère vocalisant est inconnue, cette réponse impulsionnelle ne peut être vérifiée, cependant sa structure est tout à fait compatible tant dans la forme que dans les ordres de grandeur avec celle de l'étude présentée dans la section 5.1 (elle correspondrait à une réponse impulsionnelle typique lorsque le mammifère est situé au milieu de la colonne en une profondeur proche du minimum de célérité).

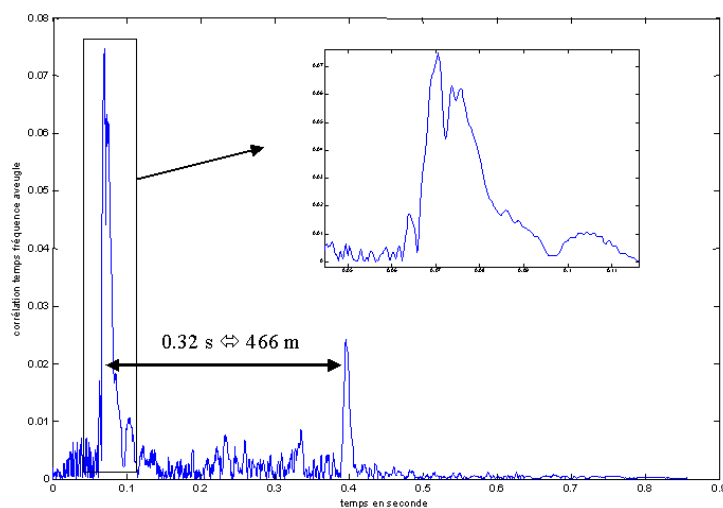


Figure 7 : Traitement temps-fréquence aveugle sur données réelles

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette communication a proposé deux étages de pré-traitement nécessaires à la tomographie passive sous les hypothèses d'une propagation multi-trajets par rayons acoustiques et d'une présence d'une source d'opportunité transitoire de signature temps-fréquence marquée. L'étage de pré-traitement destiné à la tomographie passive assistée permet une observation aveugle de la réponse impulsionnelle en ayant recours à la mise en série d'une phase d'identification de la loi de fréquence instantanée de la source et une phase d'estimation de la réponse impulsionnelle à partir d'une représentation temps-fréquence des mesures recueillies par un capteur. Concernant la tomographie passive autonome, afin d'assurer le bon conditionnement de l'inversion, l'étage de pré-traitement doit fournir la structure spatio-temporelle des arrivées. Le potentiel des méthodes temps-fréquence-espace a été testé et laisse envisager leur applicabilité à la tomographie après le développement d'une version large bande. Finalement, grâce à une campagne expérimentale menée dans le fleuve Saint Laurent destinée initialement à l'étude des mammifères marins, l'étage de pré-traitement pour la tomographie passive assistée a pu être testé et fournit des résultats très encourageants. Ces résultats permettent d'envisager la réalisation d'une expérimentation dédiée à la tomographie passive assistée et contribuent grandement à l'étude de son dimensionnement. D'autre part, des pistes d'amélioration algorithmique ont été identifiées (performances haute résolution pour l'étage de pré-traitement de la tomographie passive assistée et traitement large bande pour l'étage de pré-traitement de la tomographie passive autonome) et seront développées dans les mois à venir.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. Munk et C. Wunsch, Ocean acoustic tomography : rays and modes, Reviews of geophysics and space physics, vol. 21, n°4, p 777-793, May 1983
- [2] D. Gringas, Robust broadband matched filed processing : performance in shallow water, IEEE Journal of Oceanic engineering, vol 18, n°3, July 1993
- [3] JP. Hermand, Broad-band geoacoustic inversion in shallow water from waveguide impulse response measurements on a single hydrophone: theory and experimental results, IEEE Journal of Oceanic engineering, vol 24, n°1, January 1999
- [4] Buckingham, S.A.S. Jones, A new shallow ocean technique for determining the critical angle of seabed from the vertical directionality of the ambient noise in the water column, JASA, Vol. 81, n°4, April 1987.
- [5] S.M. Jesus, C. Soares, J. Onofre, P. Picco, Blind ocean acoustic tomography : experimental results on the Intifante'00 data set, ECUA 2002
- [6] A.M. Thode, G.L. D'Spain, W.A. Kuperman, Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations, JASA, vol. 107, n° 3, March 2000.
- [7] M.G. Amin, Y. Zhang, Direction finding based on spatial time frequency distribution matrices, Digital Signal Processing, 10, 325-339, 2000
- [8] M.G. Amin, A. Belouchrani, Spatial time frequency MUSIC: an array signal processing processing method based on time frequency signal representation, in Proceedings of SPIE Conference on radar processing, July 1998.
- [9] P. Flandrin, A time frequency formulation of the optimum detection, IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Porocessing, vol 38, n°9, pp 1377-1384, Sept 1998
- [10] R.G. Baraniuk, D.L. Jones, Signal dependent time frequency analysis using a radially Gaussian kernel, signal processing, vol 32, pp 263-284, 1993
- [11] Porat, Friedlander, asymptotic statistical analysis of the high order ambiguity function for parameters estimation of polynomial phase signal, IEEE Information Theory, 1996

- [12] N. Martins, S. Jesus, C. Gervaise, A. Quinquis, A time frequency approach o blind deconvolution in multipaths underwater channels, in Proceedings of ICCASP 2002
- [13] C. Gervaise, A. Quinquis, N. Martins, Time frequency approach to the study of underwater acoustic channel estimation and source reconstruction, in Proceedings of Physics in Signal and Image Processing, Marseille, France, January 2001
- [14] C. Gervaise, A. Quinquis, I. Luzin, High resolution identification of underwater channel from unknown transient stimuli, In proceedings of GRETSI 2001, Toulouse, France, September 2001
- [15] C. Ioana, A. Quinquis, C. Gervaise, J.C. Le Gac, Motion estimation of underwater mobiles in a multipaths channel using polynomial phase signal modelling, in Proceedings of European Conference of Underwater Acoustic, Delft, Netherland, July 2004
- [16] D. Gaucher, C. Gervaise, G.Jourdain, Feasibility of passive acoustic tomography in shallow water context : optimal design of experiments, in Proceedings of European Conference of Underwater Acoustic, Delft, Netherland, July 2004
- [17] Y. Simard, M. Bouhara, N. Roy, Acoustic detection and localization of whales in Bay of Fundy and St Lawrence Estuary critical habitats, Canadian Acoustics, june 2004
- [18] R.O. Schmidt, Multiple emitter location and signal parameter estimation, in Proceedings RADC, Spectral estimation workshop, Rome, Italy, pp 243-258, 1979