
Débruitage et séparation dans le plan temps-fréquence des contributions sonores de navires en mouvement

Yann Le Gall, Julien Bonnel

*Lab-STICC (UMR CNRS 6285), équipe TOMS
ENSTA Bretagne (UEB)
2, rue François Verny
F-29806 Brest cedex 9
{yann.le_gall,julien.bonnel}@ensta-bretagne.fr*

RÉSUMÉ. Cet article présente une méthode de filtrage adaptée à l'écoute passive monocapteur du bruit rayonné par des navires en mouvement dans un environnement océanique petit fond. Elle permet d'améliorer le rapport signal à bruit et de séparer les contributions de deux navires dans le plan temps-fréquence. La méthode exploite le principe de l'invariant océanique ainsi qu'une faible connaissance a priori des célérités du canal océanique pour réaliser le filtrage dans le domaine de la transformée de Fourier 2D du spectrogramme. La nature du bruit sur le spectrogramme est également prise en compte en incorporant une non-linéarité au filtrage. Les performances du filtrage sont évaluées sur données simulées respectivement pour le débruitage et pour la séparation de navires. Les résultats obtenus mettent en évidence les bonnes performances du débruitage et de la séparation. Des exemples de résultats sur données réelles attestent de l'efficacité du filtrage.

ABSTRACT. This paper presents a physics-based filtering scheme for passive underwater acoustics. The algorithm focuses on moving ship noise and single receiver configuration. It allows to denoise the received spectrogram and to separate the contributions of two different moving ships. The proposed method considers filtering the 2D Fourier transform of the received spectrogram. The filter design is based on the waveguide invariant principle and on some a priori knowledge on the oceanic waveguide. The noise nature on the spectrogram is taken into account by introducing a non-linearity to the filtering scheme. The algorithm thus corresponds to a non-linear homomorphic filter. The method is validated on both simulated data and experimental marine data.

MOTS-CLÉS : acoustique sous-marine, bruit de bateau, spectrogramme, filtrage, transformée de Fourier 2D, séparation de sources, débruitage, filtre homomorphique.

KEYWORDS: underwater acoustics, ship noise, spectrogram, filtering, 2D Fourier transform, signal separation, denoising, homomorphic filter.

DOI:10.3166/TS.30.149-168 © 2013 Lavoisier

Extended abstract

Context

When a ship is moving toward an acoustic receiver in an oceanic waveguide, the time-frequency representation of the recorded signal exhibits a striation pattern that can be useful in numerous applications such as ship localization or geoacoustic inversion. However, this striation pattern is usually corrupted with noise that may hinder the application. Moreover, if there are many ships, the striation patterns add up and must be separated to be considered separately.

In this paper, we present a physics-based filtering scheme for single receiver passive sonar configurations in shallow water environments. The algorithm allows to denoise the received spectrogram and to separate the contributions of two different moving ships.

Method

The time-frequency striations are characterized by their directionality. Following the waveguide invariant principle, the slope of the striations is positive for a ship approaching the receiver and negative for a ship moving away from the receiver. In the 2D Fourier domain, positive and negative striations occupy separated and localized regions while noise is spread everywhere. Hence, the proposed method considers filtering the 2D Fourier transform of the received spectrogram. The useful signal is selected in the 2D Fourier domain with the help of the waveguide invariant principle and some a priori knowledge on the oceanic waveguide, and the filtered spectrogram is obtained by computing the inverse 2D Fourier transform.

We also show that the spectrogram always contains multiplicative noise that prevents the 2D Fourier filter to work alone. Its effect is mitigated by introducing a non-linearity to the filtering scheme. The previous filtering is applied to the logarithm of the spectrogram instead of the spectrogram itself, before taking the exponential of the result to get the filtered spectrogram. The algorithm thus corresponds to a non-linear homomorphic filter.

Results and conclusions

The method has been validated on both simulated data and experimental marine data. It is shown that the signal to noise ratio of the spectrogram can be improved by 10 dB and that two ship contributions can be well separated provided that one is moving away from the receiver while the other is approaching. This filtering scheme thus offers good prospects for all applications using ship noise and a single receiver.

1. Introduction

Les bruits de bateaux apportent une large contribution au bruit ambiant présent dans l'océan (Hildebrand, 2009). Ainsi l'étude des bruits rayonnés par les navires constitue l'une des grandes thématiques de l'acoustique passive, science basée sur l'écoute des sons qui offre une alternative originale et efficace au sonar actif pour l'analyse du milieu océanique. Le signal rayonné par un navire, combinaison d'un bruit large bande et d'harmoniques sinusoïdales (Ross, 1976), peut être utilisé dans de nombreuses applications : le spectre de raies peut être extrait (Ogden *et al.*, 2011) et utilisé pour identifier et classifier les navires (Sorensen *et al.*, 2010), alors que la propagation du bruit large bande combinée au mouvement du navire induit un phénomène d'interférences visible dans le plan temps-fréquence qui peut être exploité pour localiser le navire (Turgut *et al.*, 2010 ; Cockrell, Schmidt, 2010) ainsi que pour estimer l'environnement marin (Heaney, 2004 ; Gervaise *et al.*, 2012).

La fiabilité de ces méthodes peut être considérablement accrue si le signal exploité a été amélioré par un prétraitement. Ces méthodes peuvent être mises en défaut lorsque plusieurs navires sont présents en même temps ou lorsque le signal exploité est trop bruité, ce qui est malheureusement courant dans un contexte opérationnel. Il n'est pas rare que plusieurs navires soient présents simultanément comme par exemple sur le rail d'Ouessant, au large de la Bretagne, fréquenté par environ 150 navires par jour. De plus, les sources de bruit parasites sont multiples dans l'océan : bruit des vagues et du vent, bruits d'origine biologique (crevettes, mammifères marins...) ou encore bruit de trafic maritime lointain. Cet article propose une méthode de traitement du signal permettant d'améliorer les motifs d'interférences qui apparaissent sur le spectrogramme du signal rayonné par un navire en mouvement dans un environnement petit fond. La méthode proposée permet de séparer les contributions de deux navires et d'améliorer le rapport signal à bruit (RSB). Des méthodes de traitement d'antenne peuvent aussi remplir ces objectifs (Heaney, 2004 ; Turgut *et al.*, 2010). Cependant, la méthode présentée ici s'applique dans un contexte monocapteur, configuration opérationnelle simple et peu coûteuse qui peut être utilisée en tant qu'observatoire long terme.

Cet article s'organise comme suit. La deuxième section expose les bases théoriques nécessaires pour comprendre l'origine des motifs d'interférences temps-fréquence enregistrés lors du passage d'un navire à proximité d'un hydrophone. La troisième section présente le spectrogramme en tant qu'outil de représentation de ces motifs d'interférences. La quatrième section est consacrée à la méthode de débruitage et de séparation appliquée au spectrogramme. Les deux sections suivantes présentent les résultats obtenus en simulation et sur données réelles. La septième section est consacrée à quelques points de discussions. Enfin la dernière section dresse le bilan.

2. Propagation acoustique du bruit large bande des navires

Dans un guide d'onde océanique, l'intensité du champ acoustique créé par un navire présente des striations lorsqu'on la représente dans le plan distance-fréquence (fi-

gure 1). Ces striations, que l'on qualifie aussi de motifs d'interférences, se révèlent être bien décrites par un scalaire β que l'on appelle l'invariant océanique. Dans le cadre de cet article, on se place dans un contexte de milieu marin petit fond (< 300 m), et on s'intéresse à la partie basse fréquence (< 1 kHz) du bruit large bande des navires car c'est celle qui se propage le mieux en milieu petit fond. La représentation de la propagation par la théorie des modes (Jensen *et al.*, 2011) est bien adaptée au contexte des petits fonds et des basses fréquences. Elle permet en outre par son formalisme mathématique de décrire explicitement les striations.

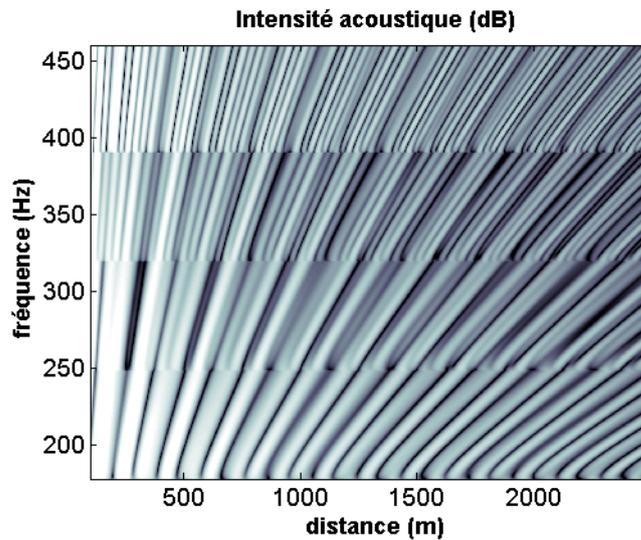


Figure 1. Intensité acoustique $I(r, f)$ en dB créée par une source large bande dans un guide de Pekeris

2.1. Modélisation de la propagation

Dans un canal océanique invariant en distance, lorsque la source et le récepteur sont éloignés d'une distance r , d'après la théorie des modes normaux la fonction de transfert du guide peut s'écrire (Jensen *et al.*, 2011) :

$$h(r, f) \propto \sum_{m=1}^N \psi_m(z_s, f) \psi_m(z, f) \frac{e^{ik_{rm}(f)r}}{\sqrt{k_{rm}(f)r}}, \quad (1)$$

où z_s et z sont respectivement les profondeurs de la source et du récepteur, N le nombre de modes propagatifs, $k_{rm}(f)$ le nombre d'onde horizontal du mode m et $\psi_m(z, f)$ la fonction modale du mode m . Les quantités $k_{rm}(f)$ et $\psi_m(z, f)$ dépendent de l'environnement (profil de célérité dans l'eau et propriétés du fond océanique). En définissant :

$$A_m = \frac{\psi_m(z_s, f) \psi_m(z, f)}{\sqrt{k_{rm}(f)}}, \quad (2)$$

la fonction de transfert s'écrit :

$$h(r, f) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_m A_m e^{ik_{rm}(f)r}. \quad (3)$$

La quantité A_m varie lentement en fonction de f comparé au terme en exponentiel, on peut donc ignorer sa dépendance en f (Jensen *et al.*, 2011). Pour une source large bande de densité spectrale de puissance $\gamma_b(f)$ l'intensité acoustique vaut alors :

$$I(r, f) = \gamma_b(f) \cdot |h(r, f)|^2, \\ \propto \frac{\gamma_b(f)}{r} \left[\sum_m A_m^2 + \sum_{m, n, m \neq n} A_m A_n \cos(\Delta k_{mn}(f)r) \right], \quad (4)$$

avec $\Delta k_{mn}(f) = k_{rm}(f) - k_{rn}(f)$. L'intensité acoustique est donc une somme de cosinus où chaque cosinus résulte de l'interférence entre deux modes propagatifs. Ces termes en cosinus sont à l'origine des striations qui apparaissent quand on représente l'intensité acoustique dans le plan distance-fréquence (figure 1).

2.2. Invariant océanique

Ces striations ont des pentes qui sont généralement très bien décrites par un scalaire β . Ce scalaire est qualifié d'invariant océanique (ou *waveguide invariant* dans la littérature anglophone). La notion d'invariant océanique est largement couverte dans la thèse de (Cockrell *et al.*, 2010) et les résultats qui suivent en sont issus.

Chaque terme en cosinus de l'expression (4) donne des striations dont la pente $\frac{\delta f}{\delta r}$ se détermine en trouvant la direction du plan (r, f) pour laquelle l'intensité du cosinus ne change pas. On peut montrer que pour le couple de modes m et n la pente vaut :

$$\frac{\delta f}{\delta r} = - \frac{\Delta k_{mn}(f)}{r \cdot \frac{\delta \Delta k_{mn}(f)}{\delta f}}. \quad (5)$$

Pour le couple de mode m et n , la pente des striations peut donc s'écrire :

$$\frac{\delta f}{\delta r} = \beta_{mn} \cdot \frac{f}{r}, \quad (6)$$

avec

$$\beta_{mn} = - \frac{1}{f} \frac{\Delta k_{mn}(f)}{\frac{\delta \Delta k_{mn}(f)}{\delta f}}. \quad (7)$$

Il s'avère que dans bien des cas, les striations sont bien décrites par une unique valeur de β qui ne dépend pas de la fréquence, de la distance et des numéros des modes (Chuproff, 1982). Les striations sont alors décrites par :

$$\frac{\delta f}{\delta r} = \beta \cdot \frac{f}{r}. \quad (8)$$

Dans un guide idéal, on peut montrer analytiquement que $\beta = 1$ (Jensen *et al.*, 2011). (Cockrell, Schmidt, 2011) suggèrent que $\beta \approx 1$ pour des modes qui se propagent par réflexion aux interfaces du guide, alors que β peut prendre un large éventail de valeurs pour les modes dont la propagation est réfractée. En eau peu profonde, la propagation est majoritairement réfléchive (c'est d'autant plus vrai quand la source est en surface comme c'est le cas ici avec les navires) et on peut généralement considérer que $\beta \approx 1$ (Jensen *et al.*, 2011). C'est le contexte dans lequel on se place et c'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de l'article.

3. Spectrogramme et RSB

Dans le plan distance-fréquence, l'intensité acoustique $I(r, f)$ créée par le bruit large bande d'un navire comporte donc des motifs d'interférences qui se présentent sous forme de striations (figure 1). Lorsque le navire est mobile par rapport au récepteur, la distance r varie en fonction du temps. Une représentation temps-fréquence $I(t, f) = I(r(t), f)$ du signal reçu fait donc apparaître les striations (figure 2).

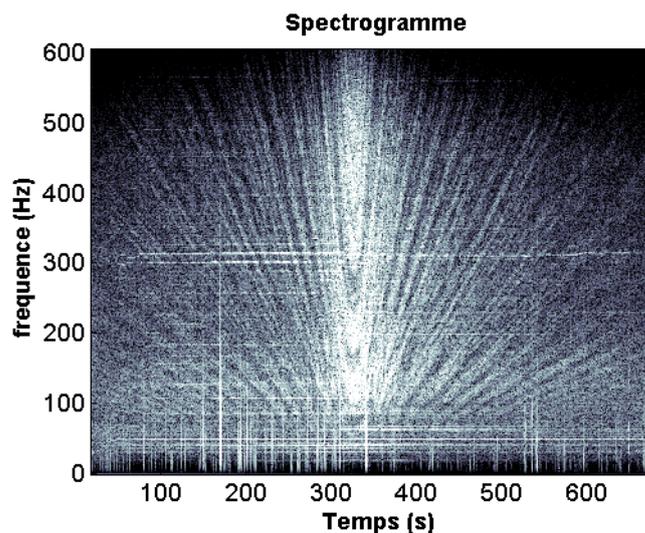


Figure 2. Spectrogramme du bruit rayonné par un navire (Campagne MOVEBOAT 2006 - Vilanova i la Geltru - LAB/UPC - (Gervaise *et al.*, 2012)) : le navire arrive au CPA (Closest Point of Approach) autour de $t = 320s$ puis s'éloigne de l'hydrophone

L'outil généralement adopté par la communauté acoustique sous-marine pour représenter les signaux dans le plan temps-fréquence est le spectrogramme (Boashash, 2003). La stratégie adoptée consiste à prendre le module carré de la transformée de Fourier à court terme (TFCT) du signal $s(t)$ reçu au niveau de l'hydrophone :

$$S(t, f) = |TFCT_s(t, f)|^2 = \left| \int s(\tau)w(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \right|^2, \quad (9)$$

où w est la fonction de fenêtrage. Le spectrogramme $S(t, f)$ est un périodogramme glissant sur une fenêtre w du signal s . Même s'il est bien connu que le spectrogramme n'est pas un bon estimateur de la densité spectrale de puissance dans le cas de signaux aléatoires non stationnaires (Kay, 1988) et que des approches alternatives existent (Aviyente, Williams, 2006), sa simplicité de mise en œuvre et d'interprétation ont systématisé son utilisation. Il est donc particulièrement intéressant d'apporter à cet outil simple et courant des méthodes de traitements adaptées permettant d'en améliorer les performances. C'est une des motivations du travail présenté dans cet article.

3.1. Modélisation du spectrogramme

Pour modéliser le spectrogramme, et ainsi mieux comprendre le bruit présent sur celui-ci, on peut se référer au périodogramme. Le périodogramme d'un signal aléatoire $x(t)$ est un estimateur $\hat{\gamma}_x(f)$ de la densité spectrale de puissance $\gamma_x(f)$ de ce signal. Cet estimateur basé sur la transformée de Fourier est asymptotiquement non biaisé mais il est aussi non consistant, et on peut généralement considérer que (Djuric *et al.*, 1999) :

$$\text{Var}(\hat{\gamma}_x(f)) = \gamma_x(f)^2. \quad (10)$$

On en déduit :

$$\hat{\gamma}_x(f) = \gamma_x(f)(1 + b_{er}(f)), \quad (11)$$

où $b_{er}(f)$ est un bruit de variance égale à 1 que l'on peut qualifier de bruit d'estimation. Le signal reçu au niveau de l'hydrophone lorsque le navire est à une distance r peut s'écrire :

$$s(t) = b_b(t) * h(r, t) + b_a(t), \quad (12)$$

où $b_b(t)$ représente le bruit large bande émis par le navire, $h(r, t) = TF^{-1}_f\{h(r, f)\}$ la réponse impulsionnelle du guide, $b_a(t)$ le bruit ambiant et $*$ l'opérateur de convolution temporelle. La densité spectrale de puissance $\gamma_s(f)$ de $s(t)$ vaut alors :

$$\gamma_s(f) = \gamma_b(f) \cdot |h(r, f)|^2 + \gamma_a(f), \quad (13)$$

où $\gamma_b(f)$ est la densité spectrale de puissance du bruit du bateau, et $\gamma_a(f)$ celle du bruit ambiant. En considérant l'équation (11), le périodogramme $\hat{\gamma}_s(f)$ de $\gamma_s(f)$ peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_s(f) &= \gamma_s(f)(1 + b_{er}(f)), \\ &= (\gamma_b(f) + b_{er}(f)\gamma_b(f)) \cdot |h(r, f)|^2 + (\gamma_a(f) + b_{er}(f)\gamma_a(f)). \end{aligned} \quad (14)$$

A chaque instant t le spectrogramme $S(t, f)$ est un périodogramme sur une fenêtre w du signal reçu quand le bateau est à une distance $r(t)$. En négligeant les problèmes

de résolution temporelle et fréquentielle et en considérant $r(t)$ constant sur la fenêtre w le spectrogramme peut alors s'approximer par :

$$\begin{aligned} S(t, f) \approx & \gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2 \\ & + b_{er}(t, f) \gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2 \\ & + \gamma_a(f) + b_{er}(t, f) \gamma_a(f), \end{aligned} \quad (15)$$

où $b_{er}(t, f)$ est le bruit d'estimation du périodogramme calculé à la date t sur la fenêtre w .

3.2. Définition du RSB

Le spectrogramme se compose donc du signal utile $\gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2$ auquel s'ajoute :

- un bruit dépendant du signal $b_{er}(t, f) \gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2$ que nous qualifierons de bruit multiplicatif,
- un bruit purement additif $\gamma_a(f) + b_{er}(t, f) \gamma_a(f)$ dû au bruit ambiant.

Le RSB sur le spectrogramme se définit alors comme le RSB d'une image dans laquelle le signal utile est $\gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2$:

$$RSB = \frac{\int_{t_{min}}^{t_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} (\gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2)^2 df dt}{\int_{t_{min}}^{t_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} (bruit(t, f))^2 df dt}, \quad (16)$$

où

$$bruit(t, f) = S(t, f) - \gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2. \quad (17)$$

Avant un quelconque traitement du spectrogramme on a :

$$bruit(t, f) = b_{er}(t, f) \gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2 + \gamma_a(f) + b_{er}(t, f) \gamma_a(f). \quad (18)$$

Il faut noter qu'une large partie du bruit présent est due aux mauvaises performances du périodogramme en tant qu'estimateur de la densité spectrale de puissance : les termes $b_{er}(t, f) \gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2$ et $b_{er}(t, f) \gamma_a(f)$ sont dus à l'imprécision statistique du périodogramme alors que seul le terme $\gamma_a(f)$ est dû au bruit ambiant à proprement parler. En conséquence, même en l'absence de bruit ambiant le spectrogramme est bruité et le RSB n'est pas infini car il subsiste le bruit d'estimation $b_{er}(t, f) \gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2$. A titre d'exemple, dans nos simulations (section 5), pour un bruit ambiant faible, le RSB est tout de même de -3 dB.

4. Méthode de filtrage

Pour améliorer la représentation temps-fréquence du signal reçu, nous proposons une méthode de traitement du signal qui permet d'améliorer le RSB sur le spectrogramme, ainsi que de séparer les contributions de deux navires dont les striations se superposent (figure 3).

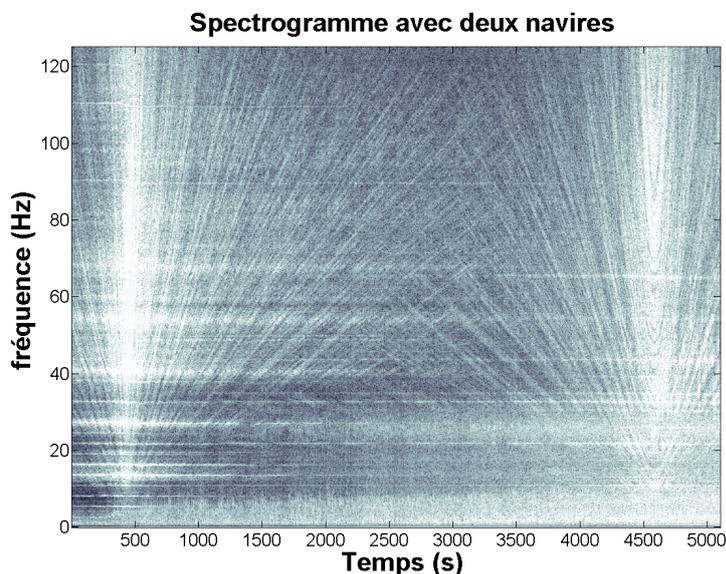


Figure 3. Spectrogramme du bruit rayonné par deux navires (Campagne MATANE - 2005 - Fleuve Saint-Laurent, Québec - UQAR, ISMER, Pêches et Océans Canada - (Simard et al., 2010)) : le premier navire arrive au CPA (Closest Point of Approach) autour de $t = 400s$ puis s'éloigne de l'hydrophone, le deuxième navire s'approche de l'hydrophone pour arriver au CPA autour de $t = 4600s$

4.1. Principe

Le spectrogramme obtenu se présente comme une image texturée comportant des striations. Ces striations se caractérisent par leur directionnalité : pour un navire en phase d'approche la pente des striations est négative sur le spectrogramme alors que pour un navire en phase d'éloignement la pente est positive. La méthode utilisée afin de débruiter le spectrogramme et séparer les navires exploite cette directionnalité en réalisant la transformée de Fourier 2D (TF2D) du spectrogramme. Dans le domaine de la TF2D, les striations de pentes positives sont localisées dans les quadrants supérieur gauche et inférieur droit alors que les striations de pentes négatives sont localisées dans les quadrants inférieur gauche et supérieur droit. Le bruit quant à lui se répartit dans tous les quadrants (figure 4b). Il est donc possible de séparer les striations de pente positive des striations de pente négative et d'éliminer une partie du bruit en ne conservant que les quadrants d'intérêts. Pour un géophysicien, la méthode s'apparente à un filtrage f-k qui permet de séparer ondes montantes et ondes descendantes (Mari, Coppens, 2000). L'invariant océanique qui décrit la pente des striations ainsi qu'une certaine connaissance *a priori* du milieu de propagation sont exploités pour affiner le filtrage. De plus, une non-linéarité est incorporée au processus de filtrage afin de prendre en compte le bruit multiplicatif sur le spectrogramme.

4.2. Filtrage de la TF2D

4.2.1. Processus de filtrage

Le débruitage et la séparation sont effectués en appliquant un gabarit à la TF2D du spectrogramme afin d'éliminer les régions ne comportant pas de signal utile, puis en réalisant la TF2D inverse pour obtenir le spectrogramme filtré. Le gabarit le plus simple est celui qui conserve les deux quadrants utiles et élimine les deux autres. Cependant, ce gabarit est assez grossier dans la mesure où le signal utile peut être localisé plus précisément sur la TF2D. Il est possible de resserrer le gabarit sur le signal utile si l'on dispose d'une certaine connaissance *a priori* sur le milieu de propagation et la distance $r(t)$ séparant le navire de l'hydrophone, celle-ci pouvant généralement être obtenue à l'aide du système AIS (*Automatic Identification System*) ou alors être estimée par Target Motion analysis (Stergiopoulos, 2000). Le processus de filtrage se déroule alors selon les étapes suivantes (cf. figure 4) :

1. Conversion du spectrogramme temps-fréquence $S(t, f)$ en spectrogramme distance-fréquence $S(r, f)$
2. Sélection de la fenêtre $S_{win}(r, f)$ du spectrogramme que l'on souhaite filtrer, la seule contrainte étant de ne pas sélectionner à la fois une partie en approche et une partie en éloignement du même bateau
3. Calcul de la TF2D $S_{TF2D}(u, v)$ de $S_{win}(r, f)$
4. Filtrage de $S_{TF2D}(u, v)$ à l'aide d'un gabarit pour obtenir $\tilde{S}_{TF2D}(u, v)$
5. Calcul de la TF2D inverse de $\tilde{S}_{TF2D}(u, v)$ pour obtenir le spectrogramme filtré $\tilde{S}_{win}(r, f)$

4.2.2. Dimensionnement du gabarit

La TF2D $S_{TF2D}(u, v)$ est en fait une représentation fréquentielle bidimensionnelle de $S_{win}(r, f)$ pris en tant qu'image. Si on peut déterminer les fréquences maximales auxquelles $I(r, f)$ oscille en r et en f alors on est capable de déterminer les bornes supérieures u_{max} et v_{max} du signal utile dans le domaine de la TF2D. D'après l'équation (4), chaque terme en cosinus de l'intensité acoustique oscille à une fréquence u_{mn} selon r telle que :

$$u_{mn} = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta(\Delta k_{mn}(f)r)}{\delta r} = \frac{1}{2\pi} \Delta k_{mn}(f), \quad (19)$$

et oscille à une fréquence v_{mn} selon f telle que :

$$v_{mn} = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta(\Delta k_{mn}(f)r)}{\delta f} = \frac{1}{2\pi} r \cdot \frac{\delta(\Delta k_{mn}(f))}{\delta f}. \quad (20)$$

Dans tous les guides d'ondes océaniques, les nombres d'ondes $k_{rm}(f)$ sont compris dans l'intervalle $[\frac{2\pi f}{c_{max}}, \frac{2\pi f}{c_{min}}]$ (Jensen *et al.*, 2011), où c_{max} et c_{min} désignent les

célérités maximales et minimales du guide. Donc $\Delta k_{mn}(f)$, différence entre nombre d'onde, est bornée par $2\pi f(\frac{1}{c_{min}} - \frac{1}{c_{max}})$. Ainsi

$$u_{max} = f \left(\frac{1}{c_{min}} - \frac{1}{c_{max}} \right). \quad (21)$$

De plus, d'après l'équation (7), en considérant que $\beta = 1$ on a

$$r \cdot \frac{\delta(\Delta k_{mn}(f))}{\delta f} = -\frac{r}{f} \Delta k_{mn}(f), \quad (22)$$

on en déduit que

$$v_{max} = r \left(\frac{1}{c_{min}} - \frac{1}{c_{max}} \right). \quad (23)$$

Sachant que la fenêtre $S_{win}(r, f)$ à filtrer est bornée par r_{max} et f_{max} , une connaissance *a priori* des paramètres c_{min} et c_{max} permet de dessiner un gabarit dans le domaine de la TF2D.

En plus de refléter la périodicité, la TF2D reflète aussi l'orientation des textures du signal : il existe un écart de 90 degrés entre les directions spatiales et fréquentielles. Le principe de l'invariant océanique qui décrit la pente des striations selon l'équation (8) permet de déterminer les pentes maximale α_{max} et minimale α_{min} des striations dans la fenêtre $S_{win}(r, f)$:

$$\alpha_{max} = \beta \cdot \frac{f_{max}}{r_{min}}. \quad (24)$$

$$\alpha_{min} = \beta \cdot \frac{f_{min}}{r_{max}}. \quad (25)$$

Dans le domaine de la TF2D, le signal est donc borné par les pentes $p_{max} = \frac{-1}{\alpha_{min}}$ et $p_{min} = \frac{-1}{\alpha_{max}}$, ce qui permet d'affiner le gabarit (figure 4b).

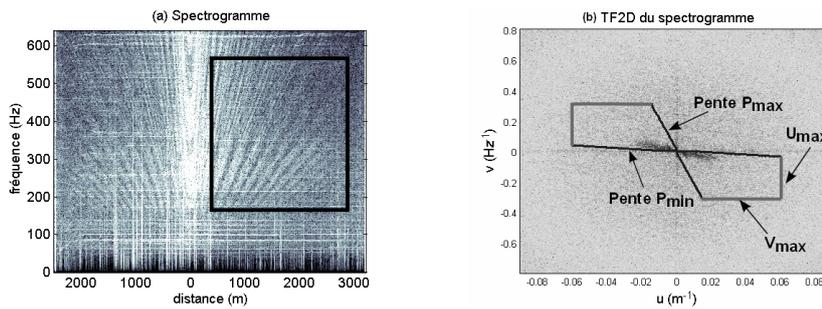


Figure 4. Méthode de filtrage : (a) spectrogramme du bruit rayonné par le navire et fenêtre à filtrer (b) TF2D de la fenêtre et limites du gabarit

A ce gabarit que l'on peut qualifier de gabarit physique il est possible d'ajouter un gabarit signal : en effet, lorsqu'il n'y a qu'un seul navire, deux des quadrants de

la TF2D sont uniquement occupés par le bruit (figure 4b) et la moyenne ainsi que la variance du bruit dans la TF2D peuvent donc y être estimées. Cela permet ensuite de réaliser un seuillage dans les quadrants occupés par le signal pour ne conserver que les zones où le signal est présent.

4.3. Filtrage non linéaire homomorphique

Le spectrogramme analysé contient du bruit multiplicatif ainsi que du bruit additif (cf. équation (15)). Pour prendre en compte le bruit multiplicatif, une non-linéarité est incorporée au processus de filtrage. L'idée est d'appliquer le filtrage précédent sur le logarithme du spectrogramme et de prendre l'exponentielle du résultat obtenu pour récupérer le spectrogramme filtré (figure 5). Le logarithme transforme le bruit multiplicatif en bruit additif, ce qui permet par la suite un meilleur filtrage du bruit (Oppenheim *et al.*, 1968). Cette opération se révèle quasiment indispensable dans le cas où deux navires sont présents. En effet, en l'absence du logarithme, le bruit multiplicatif se manifeste sous forme d'une convolution dans la TF2D :

$$TF2D\{b_{er}(t, f)\} * TF2D\{\gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2\}. \quad (26)$$

Cette convolution revient d'une certaine façon à étaler $TF2D\{\gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2\}$ partout où le bruit $TF2D\{b_{er}(t, f)\}$ est présent. La contribution $TF2D\{\gamma_b(f) \cdot |h(r(t), f)|^2\}$ de chaque navire envahit donc la TF2D par l'intermédiaire du bruit multiplicatif. Il est alors impossible de séparer complètement deux navires lors du filtrage puisque les contributions ne sont pas parfaitement localisées. Un bruit corrélé aux striations du deuxième navire est présent dans les quadrants du premier navire et *vice versa*. Le logarithme permet de régler ce problème en transformant la convolution de l'expression (26) en addition. Le filtre non linéaire présente également l'avantage de bien se comporter en présence de bruit additif (Pitas, Venetsanopoulos, 1986).



Figure 5. Illustration du filtrage non linéaire homomorphique

Par ailleurs, le logarithme permet de déconvoluer le spectre du navire $\gamma_b(f)$, la décroissance en $\frac{1}{r}$ et l'effet de la propagation. En effet, au lieu de filtrer

$$TF2D\{I(r, f)\} = TF2D\{\gamma_b(f)\} * TF2D\{\frac{1}{r}\} * TF2D\{propa(r, f)\}, \quad (27)$$

où

$$propa(r, f) = \sum_m A_m^2 + \sum_{m, n, m \neq n} A_m A_n \cos(\Delta k_{mn}(f)r), \quad (28)$$

on filtre

$$\begin{aligned} TF2D\{\log(I(r, f))\} &= TF2D\{\log(\gamma_b(f))\} + TF2D\{\log(\frac{1}{r})\} \\ &+ TF2D\{\log(propa(r, f))\}. \end{aligned} \quad (29)$$

Cela permet de filtrer indépendamment les trois composantes car elles sont localisées différemment sur la TF2D :

- le spectre du navire $\gamma_b(f)$ ne varie pas en r , $TF2D\{\log(\gamma_b(f))\}$ est donc localisé sur l'axe de fréquence nulle selon r ($u = 0$),
- la décroissance en $\frac{1}{r}$ ne varie pas en f , $TF2D\{\log(\frac{1}{r})\}$ est donc localisé sur l'axe de fréquence nulle selon f ($v = 0$),
- le terme dû à la propagation est approximativement localisé dans le gabarit physique décrit précédemment.

5. Débruitage

Dans cette section, la méthode de filtrage est testée dans une optique de débruitage. Le but est de réduire les bruits parasites sur le spectrogramme pour améliorer les striations.

5.1. Application sur des données simulées

Les performances du débruitage ont été évaluées sur des données synthétiques. Pour la simulation, on considère un guide de type Pekeris (Pekeris, 1945) qui est un guide d'onde réaliste pour la propagation océanique en milieu petit fond. Il est constitué d'une colonne d'eau de hauteur D où la vitesse c_{eau} et la masse volumique ρ_{eau} sont constantes, et d'un fond fluide semi-infini de vitesse c_b et masse volumique ρ_b constantes. Les paramètres réalistes choisis pour la simulation sont les suivants : $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_b = 1850 \text{ kg/m}^3$, $c_{eau} = 1500 \text{ m/s}$, $c_b = 1800 \text{ m/s}$ et profondeur $D = 20 \text{ m}$. On choisit par ailleurs une fenêtre d'analyse couvrant $r = [200, 2500] \text{ m}$ et $f = [180, 460] \text{ Hz}$. Pour dimensionner le gabarit, on se donne une incertitude de $\pm 100 \text{ m/s}$ sur la célérité dans l'eau et $\pm 200 \text{ m/s}$ sur la célérité dans le fond de façon à se placer dans une situation où *a priori* sur le milieu de propagation est faible. Les paramètres du gabarit sont alors les suivants : $u_{max} \approx 0.10 \text{ m}^{-1}$, $v_{max} \approx 0.56 \text{ Hz}^{-1}$, $p_{min} \approx -0.43 \text{ m.s}$ et $p_{max} \approx -13.9 \text{ m.s}$. Dans cette simulation, on considère le bruit du bateau et le bruit ambiant comme étant des bruits blancs gaussiens. Pour différents niveaux de bruit ambiant, le RSB de départ sur le spectrogramme et le RSB après filtrage sont évalués tels que décrits dans la section 3.2. Il faut noter que le RSB n'est jamais élevé car comme cela est dit dans la section 3 une large partie du bruit présent est intrinsèque aux mauvaises performances du spectrogramme dans le cas où les signaux étudiés sont fortement aléatoires. Les résultats obtenus (figure 6) montrent que le filtrage non linéaire permet bien d'augmenter les

performances par rapport au filtrage linéaire. Le filtrage fait gagner plus de 10 dB de RSB sur le spectrogramme.

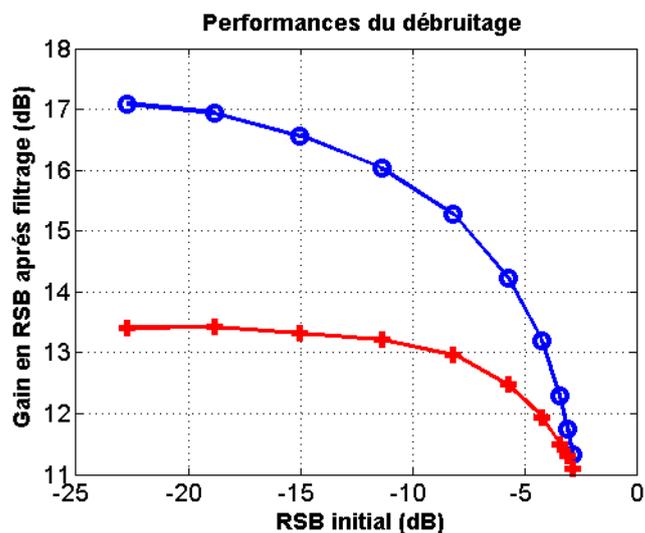


Figure 6. Performances de débruitage (100 réalisations pour chaque point) : croix pour le filtrage linéaire, ronds pour le filtrage non linéaire

5.2. Application sur des données expérimentales

Les données expérimentales présentées ici proviennent des données collectées pendant la campagne MOVEBOAT 2006 (Gervaise *et al.*, 2012). Cette campagne d'expérimentations menée près des côtes espagnoles de Vilanova i la Geltru a permis d'obtenir un certain nombre de radiales acoustiques de navires dans un canal d'une profondeur d'environ 15 m.

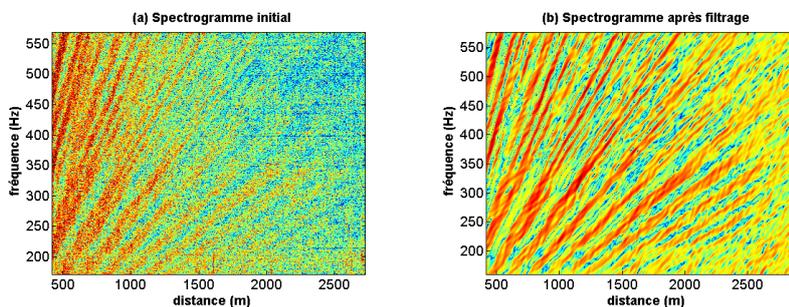


Figure 7. Débruitage sur données réelles : (a) spectrogramme initial (b) spectrogramme filtré (filtrage non linéaire)

Pour dimensionner le gabarit de notre filtre, on se donne un *a priori* faible sur les célérités du milieu de propagation : on considère que la célérité dans l'eau est comprise dans l'intervalle $[1450, 1550]$ m/s et que la célérité dans le fond est comprise dans l'intervalle $[1600, 2000]$ m/s. Pour le filtrage d'une fenêtre couvrant $r = [480, 2800]$ m et $f = [180, 550]$ Hz les limites du gabarit sont donc $u_{max} \approx 0.10 \text{ m}^{-1}$, $v_{max} \approx 0.53 \text{ Hz}^{-1}$, $p_{min} \approx -0.9 \text{ m.s}$ et $p_{max} \approx -15 \text{ m.s}$. Un *a priori* plus fort sur les célérités du guide donnera un gabarit plus sélectif et donc un meilleur débruitage, cependant même avec un *a priori* faible le débruitage fonctionne. Le résultat du débruitage est présenté figure 7. Le résultat est visuellement très bon, les striations ressortent mieux qu'avant le filtrage. Certaines striations qui n'étaient pas visibles auparavant apparaissent maintenant clairement.

Pour donner un éclairage quantitatif sur les performances du filtrage, le gain en RSB est approximativement estimé en utilisant les deux quadrants occupés uniquement par du bruit. On calcule la puissance du spectrogramme filtré pour lequel le filtrage a été réalisé en ne conservant que les deux quadrants occupés uniquement par du bruit, et on multiplie le résultat par deux pour avoir une estimée de la puissance du bruit avant filtrage (afin de faire comme si l'on avait quatre quadrants occupés uniquement par le bruit). Ensuite, on calcule la puissance du spectrogramme filtré pour lequel le filtrage a été réalisé en transférant par symétrie le gabarit sur les deux quadrants occupés uniquement par du bruit, ce qui donne une estimée de la puissance du bruit restant après filtrage. Le gain en RSB peut alors être évalué, on trouve ici un gain d'environ 9 dB. La même méthodologie appliquée sur d'autres radiales de la campagne MOVEBOAT 2006 donne des gains en RSB compris entre 9 et 12 dB.

6. Séparation

Dans cette section, la méthode de filtrage est testée dans une optique de débruitage mais aussi de séparation des motifs d'interférences de deux navires (cas illustré figure 3).

6.1. Application sur des données simulées

Pour évaluer les performances de la séparation, on se place dans le même contexte que celui de l'évaluation des performances du débruitage dans la partie précédente : on choisit le même guide de Pekeris et la même fenêtre d'analyse. On ajoute par contre la contribution d'un deuxième navire au spectrogramme. Pour évaluer les performances, deux paramètres sont donc à prendre en compte : la puissance du bruit ambiant ajouté et la puissance du deuxième navire sur le spectrogramme. Ainsi, on évalue le gain en RSB du filtrage :

- pour différents RSB de départ sur le spectrogramme sans le deuxième bateau,
- pour différents rapports de puissance entre le premier et le deuxième bateau.

Le gain en RSB se définit comme la différence entre le RSB après filtrage et le RSB initial en considérant l'appart du deuxième bateau comme un bruit.

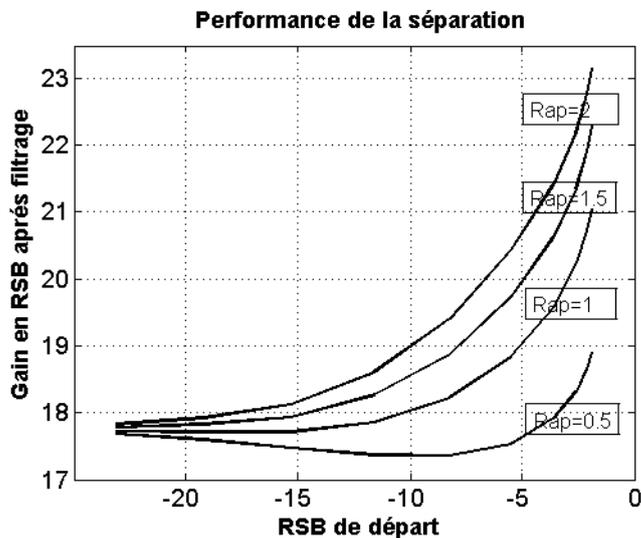


Figure 8. Performances de séparation pour le filtrage non linéaire (100 réalisations pour chaque point) : chaque courbe représente le gain en RSB du filtrage pour un rapport de puissance R_{ap} particulier entre le navire à conserver et le navire à éliminer

Les résultats pour le filtrage non linéaire sont présentés figure 8. Lorsque la puissance du deuxième navire augmente le gain en RSB augmente aussi ce qui témoigne de la bonne élimination du deuxième navire. Dans le cas du filtrage linéaire dont les résultats ne sont pas présentés ici une augmentation de la puissance du deuxième navire ne se traduit pas par une augmentation significative du gain en RSB ce qui montre que le deuxième navire n'est pas bien éliminé. Pour bien séparer deux navires il faut donc nécessairement utiliser le filtrage non linéaire.

6.2. Application sur des données expérimentales

Les données expérimentales présentées ici proviennent des données collectées pendant la campagne MATANE (Simard *et al.*, 2010). Cette campagne d'expérimentations menée dans le fleuve Saint-Laurent au Québec a permis d'obtenir un certain nombre de radiales acoustiques de navires dans un canal d'une profondeur d'environ 300m. Certaines des données comportent la présence simultanée de plusieurs navires près de l'hydrophone. Pour dimensionner le gabarit de notre filtre, on se donne la aussi un *a priori* faible sur les célérités du milieu de propagation : on considère que la célérité dans l'eau est comprise dans l'intervalle [1400 m/s, 1550 m/s] et que la célérité dans le fond est comprise dans l'intervalle [1500 m/s, 2000 m/s]. Pour le filtrage d'une fenêtre couvrant $r = [8 \text{ km}, 26 \text{ km}]$ et $f = [35 \text{ Hz}, 110 \text{ Hz}]$ les limites du gabarit sont donc $u_{max} \approx 0.025 \text{ m}^{-1}$, $v_{max} \approx 5.56 \text{ Hz}^{-1}$, $p_{min} \approx -73 \text{ m.s}$ et $p_{max} \approx -742 \text{ m.s}$. Un *a priori* plus fort sur les célérités du guide donnera un gabarit

plus sélectif et donc un meilleur débruitage, mais pour la séparation cela ne changera rien car la contribution du deuxième navire est dans tous les cas à l'extérieur du gabarit (les pentes des striations des deux navires sont opposées). Le résultat de la séparation est présenté figure 9b. Il est ici difficile de quantifier les performances mais le résultat est visuellement très bon. On peut constater que la contribution du deuxième navire a totalement disparu et que les striations du premier navire ressortent mieux. Pour montrer la nécessité d'incorporer la non-linéarité au filtrage, le résultat de la séparation est également présenté dans le cas du filtrage linéaire (figure 9c). Ce filtrage laisse des « trous » sur le spectrogramme et les striations sont moins contrastées.

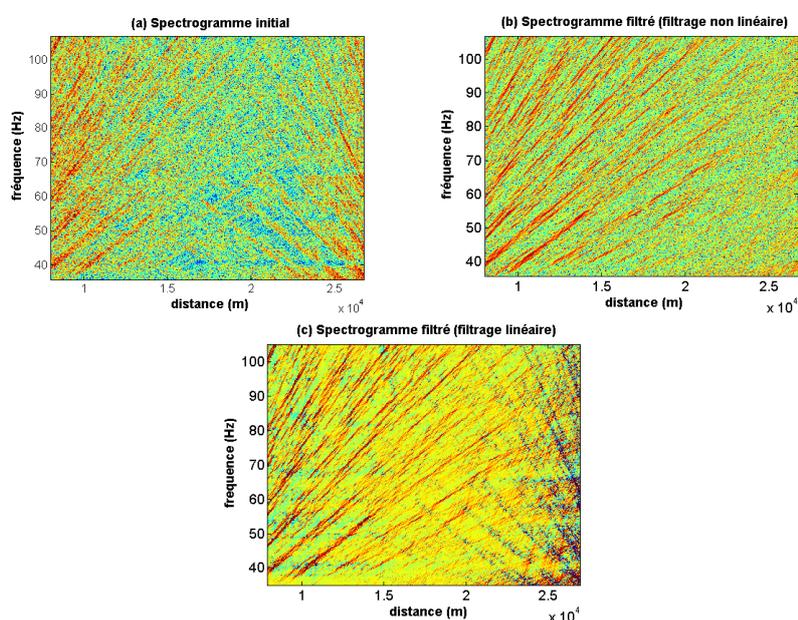


Figure 9. Séparation sur données réelles : (a) spectrogramme initial (b) spectrogramme filtré (filtrage non linéaire) (c) spectrogramme filtré (filtrage linéaire)

7. Discussion

7.1. Intérêt de la non-linéarité

Pour le débruitage, le filtrage linéaire donne de bons résultats, cependant les performances sont meilleures avec la non-linéarité. Cette non-linéarité permet de mieux gérer le bruit multiplicatif présent sur le spectrogramme en le rendant additif. L'utilisation de la non-linéarité pour le débruitage est confortée par le fait que la non-linéarité semble aussi mieux gérer le bruit impulsionnel. En effet, le débruitage a été testé sur une radiale de la campagne MOVEBOAT 2006 pour laquelle le spectrogramme comportait un bruit impulsionnel. Pour cette radiale, la non-linéarité donne visuellement de très bons résultats (non présentés ici) comparée au filtrage linéaire, l'amélioration

est dotant plus nette quand on visualise le spectrogramme dans le plan f-k (Gervaise *et al.*, 2012).

Pour la séparation, le bruit multiplicatif met complètement en défaut le filtrage linéaire, la non-linéarité est donc impérative.

Par ailleurs, la non-linéarité permet de déconvoluer le spectre du navire et l'effet de la propagation. Elle peut donc aussi s'avérer utile dans une application d'identification de navire.

7.2. Influence de l'*a priori*

Le degré de connaissance *a priori* sur les célérités du guide d'onde océanique influe sur les performances du débruitage. Dans les parties précédentes, la connaissance *a priori* adoptée est minimale. Il est intéressant de savoir dans quelle mesure une connaissance *a priori* plus précise permet d'améliorer le filtrage. Si on suppose connaître parfaitement la célérité dans la colonne d'eau les résultats suggèrent que l'on gagne environ 1.5 dB de RSB. Si l'on suppose de plus connaître parfaitement la célérité dans le fond alors on gagne environ 3 dB de RSB supplémentaire. Même si cette connaissance plus précise permet d'améliorer le filtrage, cette amélioration n'est pas considérable comparée aux 10 dB que la méthode permet déjà de faire gagner avec une connaissance minimale.

7.3. Bénéfice du filtrage pour les applications visées

En permettant d'améliorer le RSB et de séparer les contributions de deux navires, la méthode de filtrage présentée offre de bonnes perspectives pour les applications qui utilisent le spectrogramme du bruit rayonné par les navires. Les applications comme la localisation ou l'inversion géoacoustique peuvent être mises en défaut quand deux navires sont présents ou quand le RSB n'est pas suffisant. Par exemple, les travaux d'inversion géoacoustique de (Gervaise *et al.*, 2012) font état d'une nécessité d'un RSB minimum pour éviter de biaiser l'estimation de la vitesse de compression. Le gain de 10 dB que la méthode de filtrage peut apporter doit donc permettre de rendre ces applications plus fiables.

Il faut toutefois faire attention à ne pas relier directement le gain en RSB du filtrage à un gain effectif pour l'application car il est possible que certaines parties du bruit présent ne perturbent pas l'application. C'est le cas par exemple dans la méthode d'inversion géoacoustique de (Gervaise *et al.*, 2012) pour laquelle le passage du spectrogramme dans le plan f-k permet de s'abstraire d'une partie du bruit. Pour cette application on peut garantir un gain effectif minimum de 3 dB par suppression des deux quadrants occupés uniquement par du bruit mais le gain effectif supplémentaire est plus difficile à évaluer même s'il est bien réel. De manière générale ce gain effectif est difficile à évaluer et dépend de la méthodologie utilisée dans l'application.

8. Conclusion

Une méthode basée sur le filtrage de la transformée de Fourier 2D du spectrogramme permettant de débruiter et de séparer les contributions de deux navires a été proposée. Il est en effet possible en utilisant le principe de l'invariant océanique et une certaine connaissance *a priori* du milieu de propagation de déterminer des bornes pour le signal utile dans le domaine de la TF2D et ainsi d'éliminer du bruit et éventuellement la contribution d'un deuxième navire. Une non-linéarité doit toutefois être incorporée au filtrage pour prendre en compte le bruit multiplicatif présent sur le spectrogramme.

Bibliographie

- Aviyente S., Williams W. (2006). Multitaper marginal time–frequency distributions. *Signal Processing*, vol. 86, n° 2, p. 279-295.
- Boashash B. (2003). *Time frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference*. Elsevier Science.
- Chuprov S. (1982). Interference structure of a sound field in a layered ocean. *Ocean Acoustics, Modern State*, p. 71-91.
- Cockrell K., Schmidt H. (2010). Robust passive range estimation using the waveguide invariant. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, p. 2780.
- Cockrell K., Schmidt H. (2011). A modal wenzel-kramers-brillouin approach to calculating the waveguide invariant for non-ideal waveguides. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 130, p. 72.
- Cockrell K., Schmidt H. *et al.* (2010). *Understanding and utilizing waveguide invariant range/frequency striations in ocean acoustic waveguides*. Thèse de doctorat non publiée, Massachusetts Institute of Technology.
- Djuric P., Kay S., Vijay K., Douglas B. (1999). Spectrum estimation and modeling. *Digital Signal Processing Handbook*.
- Gervaise C., Kinda B., Bonnel J., Stéphan Y., Vallez S. (2012). Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, n° 3, p. 1999-2010.
- Heaney K. (2004). Rapid geoacoustic characterization using a surface ship of opportunity. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 29, n° 1, p. 88-99.
- Hildebrand J. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 395, n° 5.
- Jensen F., Kuperman W., Porter M., Schmidt H. *et al.* (2011). *Computational ocean acoustics*, second edition.
- Kay S. (1988). *Modern spectral estimation: theory and application* (vol. 29). Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.

- Mari J., Coppens F. (2000). *Sismique de puits, chapitre 4*. Institut Français du Pétrole, Editions Technip.
- Ogden G., Zurk L., Jones M., Peterson M. (2011). Extraction of small boat harmonic signatures from passive sonar. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, p. 3768.
- Oppenheim A., Schafer R., Stockham Jr T. (1968). Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals. *Audio and Electroacoustics, IEEE Transactions on*, vol. 16, n° 3, p. 437-466.
- Pekeris C. (1945). *Theory of propagation of explosive sound in shallow water*. Office of Scientific Research and Development, National Defence Research Committee.
- Pitas I., Venetsanopoulos A. (1986). Nonlinear mean filters in image processing. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 34, n° 3, p. 573-584.
- Ross D. (1976). *Mechanics of underwater noise*. Rapport technique. DTIC Document.
- Simard Y., Lepage R., Gervaise C. (2010). Anthropogenic sound exposure of marine mammals from seaways: Estimates for lower st. lawrence seaway, eastern canada. *Applied Acoustics*, vol. 71, n° 11, p. 1093-1098.
- Sorensen E., Ou H., Zurk L., Siderius M. (2010). Passive acoustic sensing for detection of small vessels. *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2010 Seattle*, p. 1-8.
- Stergiopoulos S. (2000). *Advanced signal processing handbook: theory and implementation for radar, sonar, and medical imaging real time systems*. CRC Press.
- Turgut A., Orr M., Rouseff D. (2010). Broadband source localization using horizontal-beam acoustic intensity striations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, p. 73.

Yann Le Gall est doctorant à l'ENSTA Bretagne depuis octobre 2012. Il est membre du Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information (Lab-STICC). Ses recherches en traitement du signal et acoustique sous-marine portent sur la localisation de source et l'inversion géoacoustique.

Julien Bonnel a obtenu un doctorat en traitement du signal au GIPSA-Lab en 2010. Depuis 2010, il est enseignant-chercheur à l'ENSTA Bretagne (Lab-STICC) à Brest. Ses recherches en traitement du signal et acoustique sous-marine portent sur l'analyse temps-fréquence, la détection/localisation de source, l'inversion géoacoustique et la tomographie océanique ainsi que sur le monitoring passif de l'environnement marin et la bioacoustique.