

# Détection de signaux acoustiques large bande par étude de l'enveloppe de la fonction de corrélation

Benjamin OLLIVIER<sup>1</sup>, Frédéric MAUSSANG<sup>1</sup>, Christophe SINTÈS<sup>1</sup>, René GARELLO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Mines-Télécom, Télécom Bretagne, UeB, CNRS UMR 6285 Lab-STICC\CID  
Technopôle Brest-Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex 3, France

benjamin.ollivier@telecom-bretagne.eu, frederic.maussang@telecom-bretagne.eu  
christophe.sintes@telecom-bretagne.eu, rene.garello@telecom-bretagne.eu

**Résumé** – Dans un contexte de détection de signaux acoustiques sous-marins, de nombreuses méthodes sont basées sur l'information d'amplitude du signal observé ou de la fonction de corrélation entre le signal observé et le signal recherché. La méthode présentée dans ce papier repose sur les informations que l'on a *a priori* sur le signal recherché et leurs impacts sur sa fonction d'autocorrélation (largeur du pic de corrélation en particulier). Cette méthode permet alors de déterminer si un pic de corrélation correspond au signal recherché ou à la présence du bruit.

**Abstract** – In the context of acoustical signals detection, several approaches are based on the magnitude information of observed signal or cross-correlation between observation and researched signal. In this paper, we propose a method based on a priori information of the researched signal, which formed the correlation signal shape. This approach allows us to discriminate searched signal from noise.

## 1 Introduction

La détection de signaux acoustiques constitue une étape essentielle dans le positionnement d'objets sous-marins, les communications sous-marines, etc. Afin qu'un récepteur puisse se localiser par rapport à un réseau d'émetteurs de positions connues, il est nécessaire d'estimer le temps d'arrivée de chaque signal émis. Cela passe par la détection puis la datation des signaux acoustiques en réception.

Les travaux présentés dans cet article traitent de la détection de ces signaux. Ces signaux sont déterministes et l'on fait l'hypothèse que le bruit  $w_g$  est additif, blanc et gaussien, de moyenne  $m_g$ , de variance  $\sigma_g^2$  et de rapport signal sur bruit  $RSB_g$ . Le filtrage adapté est donc optimale dans ce contexte [1], et la littérature propose un grand nombre de méthodes de détection, basées sur les tests d'hypothèse [2], [3], [4]. Un seuil de détection est ainsi estimé en fonction des informations *a priori* du bruit  $w_g$  et d'une probabilité de fausse alarme fixée ( $P_{FA}$ ). La valeur maximale du signal observé (ou de sa fonction de corrélation) est comparée à ce seuil pour ensuite prendre une décision sur la présence du signal. Cette méthode, basée sur l'enveloppe de la fonction de corrélation, est sensible à du bruit interférent, blanc additif et gaussien, représenté par  $w_i$ , de moyenne  $m_i$ , de variance  $\sigma_i^2$  et de rapport signal sur bruit  $RSB_i \gg RSB_g$ , introduisant de fausses alarmes. La solution proposée dans cet article permet de discriminer ces fausses alarmes.

Sachant qu'un pic de corrélation peut être dû à la présence du signal recherché, mais aussi à du bruit, nous développons dans

cette article une méthode permettant de discriminer ces deux cas [5]. En utilisant les propriétés temporelles et fréquentielles du signal émis, nous modélisons sa fonction d'autocorrélation, puis nous la confrontons à la fonction d'intercorrélation du signal en réception. Une erreur est ensuite estimée autour du pic d'intercorrélation, afin de déterminer si le pic analysé correspond à la présence du signal ou non.

Nous introduisons le signal étudié et la mise en forme de la fonction de corrélation dans la partie 2. Un test d'hypothèse est défini et testé dans la partie 3. Nous détaillons la méthode de discrimination dans la partie 4. La combinaison de ces deux méthodes sera ensuite présentée dans la partie 5.

## 2 Fonction de corrélation et mise en forme

La méthode présentée dans cet article repose sur les propriétés du pic de corrélation. Nous allons dans cette partie calculer la fonction d'autocorrélation, qui définira le modèle dans la méthode de détection proposée.

### 2.1 Définition du signal

Nous avons choisi un signal large bande fréquemment utilisé, le *chirp*, défini comme suit :

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos\left[2\pi\left(f_0 + \frac{k}{2}\right)t\right] \quad (1)$$

avec  $f_0$  la fréquence centrale,  $T$  la durée du signal et  $k$  la pente du *chirp* telle que :

$$k = \frac{B}{T} \quad (2)$$

$B$  étant la bande fréquentielle du signal.

L'objectif dans cette section étant de calculer la fonction d'autocorrélation du signal  $s$ , nous définissons un signal équivalent en bande de base  $s_{eq}$  (que nous noterons par la suite  $s$  pour des raisons de clarté) :

$$s(t) = \Re \left\{ \text{rect} \left( \frac{t}{T} \right) e^{j2\pi \left( f_0 + \frac{k}{2} \right) t} \right\} \quad (3)$$

$$s(t) = \Re \{ s_{eq} e^{j2\pi f_0 t} \} \quad (4)$$

$$s_{eq}(t) = \text{rect} \left( \frac{t}{T} \right) e^{j2\pi k t^2} \quad (5)$$

## 2.2 Fonction d'autocorrélation

La fonction d'autocorrélation est définie de la manière suivante :

$$\Gamma_s(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot s^*(t - \tau) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} \|s(t)\|^2 dt} \quad (6)$$

La démonstration présentée dans [6], nous permet d'écrire :

$$\Gamma_s(\tau) = \frac{T}{2} \text{tri} \left( \frac{T}{2} \right) \text{sinc} \left[ \pi k \tau T \text{tri} \left( \frac{T}{2} \right) \right] \quad (7)$$

avec  $\text{tri}$  la fonction triangle.

Dans cette partie, la fonction d'autocorrélation du *chirp* équivalent en bande de base a été modélisée

## 2.3 Fonction d'intercorrélation

L'intercorrélation est la fonction de corrélation entre le signal émis et le signal reçu. Le signal reçu est traité par bloc de durée égale à deux fois la durée du signal. Il est défini de la manière suivante :

$$r(t) = \alpha_s s(t - T_s) + w_g(t) + \alpha_i w_i(t - T_i) \quad (8)$$

avec  $T_s$  l'instant d'arrivée du signal,  $T_i$  l'instant d'arrivée du bruit interférent et  $(\alpha_s, \alpha_i)$  deux variables aléatoires indépendantes suivant des lois de Bernoulli de probabilités respectives  $(p_s, p_i)$ .

La fonction d'intercorrélation entre le signal émis et le signal reçu s'écrit alors :

$$\Gamma_{s,r}(\tau) = \alpha_s \Gamma_s(\tau - T_s) + \Gamma_{s,w_g}(\tau) + \alpha_i \Gamma_{s,w_i}(\tau - T_i) \quad (9)$$

# 3 Détection 1 : Test d'hypothèse

## 3.1 Détection en absence de bruit interférent

Le test d'hypothèse permet de détecter un signal en présence de bruit dont on a un *a priori* sur la distribution. Deux hypothèses sont alors définies : l'hypothèse  $H_0$  ou le signal reçu

ne contient que le bruit  $w_g$ , et l'hypothèse  $H_1$  ou le signal reçu contient du bruit et le signal utile :

$$\begin{cases} H_0 & : r(t) = w_g(t) \\ H_1 & : r(t) = s(t - T_s) + w_g(t) \end{cases}$$

Les décisions associées sont respectivement  $D_0$  et  $D_1$ . En théorie de la décision, on appelle : probabilité de fausse alarme lorsque la décision  $D_1$  est prise sous l'hypothèse  $H_0$  telle que  $P_{FA} = P(D_1|H_0)$ , probabilité de manque lorsque la décision  $D_0$  est prise sous l'hypothèse  $H_1$  telle que  $P_M = P(D_0|H_1)$  et probabilité de détection lorsque la décision  $D_1$  est prise sous l'hypothèse  $H_1$  telle que  $P_D = P(D_1|H_1)$ .

Le bruit  $w_g$  étant gaussien, la fonction d'intercorrélation dans l'hypothèse  $H_0$  suit également une loi gaussienne. Elle est définie comme suit :

$$P(\Gamma_{s,r}|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} \exp \left( -\frac{(\Gamma_{s,r} - m_g)^2}{2\sigma_g^2} \right) \quad (10)$$

Le seuil de détection est ensuite défini à partir de la probabilité de fausse alarme, telle que :

$$P_{FA} = P(\Gamma_{s,r} > \alpha | H_0) \quad (11)$$

D'après les équations (10) et (11), on peut écrire :

$$P_{FA} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} \int_{\alpha}^{+\infty} e^{-\frac{(\Gamma_{s,r} - m_g)^2}{2\sigma_g^2}} d\Gamma_{s,r} \quad (12)$$

On déduit alors le seuil de détection :

$$\alpha = \sqrt{2}\sigma_g \text{erfc}^{-1}(2P_{FA}) + m_g \quad (13)$$

avec  $\text{erfc}^{-1}$  l'inverse de la fonction erreur. Les paramètres  $m_g$  et  $\sigma_g^2$  étant systématiquement estimés, le seuil de détection est alors adapté au rapport signal sur bruit  $RSB_g$ . Ainsi la décision  $D_1$  est prise lorsque :  $\text{argmax}(\Gamma_{s,r}) > \alpha$

## 3.2 Détection en présence de bruit interférent

Le bruit interférent étant de faible durée ( $\ll 2T$ ) et de forte amplitude ( $RSB_i \gg RSB_g$ ), il induit des pics importants dans la fonction d'intercorrélation. Considérons le cas où  $\alpha_s = 0$  et  $\alpha_i = 1$  :

$$r(t) = w_g(t) + w_i(t - T_i) \quad (14)$$

$w_g$  et  $w_i$  sont deux variables aléatoires indépendantes telle que  $w_g \sim \mathcal{N}(m_g, \sigma_g^2)$  et  $w_i \sim \mathcal{N}(m_i, \sigma_i^2)$ . Alors  $r$  suit également la loi normale tel que  $r \sim \mathcal{N}(m_g + m_i, \sigma_g^2 + \sigma_i^2)$ . Le seuil de détection  $\alpha$  estimé précédemment n'est alors plus adapté. La présence de  $w_i$  fait donc partie de l'hypothèse  $H_1$ , et introduit ainsi de fausses alarmes.

### 3.3 Simulation

Afin de simuler plusieurs réalisations du signal reçu,  $N$  blocs, chacun de durée égale à  $2T$ , sont générés, contenant :

- $s$  avec une probabilité d'apparition  $p_s = 0,1$
- $w_g$  de  $RSB = [-15dB, -12dB, -10dB]$
- $w_i$  de durée  $\ll 2T$ , de  $RSB = -25dB$ , avec une probabilité d'apparition  $p_i = 0,2$

Pour  $N = 1000$ , on teste plusieurs  $P_{PA}$  allant de 0,1% à 1%. Pour chaque seuil, on associe à l'issue de la simulation, un pourcentage de détection et un pourcentage de fausse alarme. Ces résultats sont représentés sur la courbe ROC (*Receiving Operating Characteristics*) présentée Figure 1.

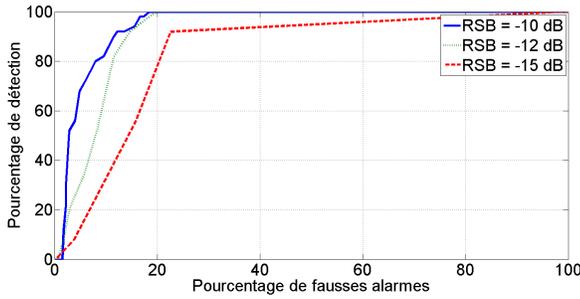


FIGURE 1 – Courbes ROC du test d'hypothèse pour plusieurs  $RSB_g$

### 3.4 Conclusion

Pour les  $RSB_g$  allant de  $-10dB$  et  $-12dB$ , les seuils ayant un pourcentage de détection proche de 100% présentent un pourcentage de fausses alarmes minimum de 20%. On retrouve ici la probabilité d'apparition  $p_i$  du bruit interférent injecté dans les simulations. On confirme alors de cette méthode de détection quelle n'est pas robuste à ce type de bruits interférents.

## 4 Détection 2 : distance entre autocorrélation et intercorrélation

### 4.1 Contexte

La méthode de détection présentée dans la section précédente, est basée en partie sur l'amplitude maximale de la fonction d'intercorrélation. C'est pourquoi elle n'est pas robuste au bruit interférent de courte durée et de forte amplitude.

On propose ici une méthode de détection basée sur la forme de l'enveloppe de la fonction d'intercorrélation en amplitude. Une distance entre cette fonction et un modèle, ce modèle étant la fonction d'autocorrélation du signal recherché, sera estimée via une estimation d'erreur.

Nous distinguons alors deux hypothèses : l'hypothèse  $H'_0$  lorsque le signal reçu est composé du bruit  $w_g$ , du bruit  $w_i$  et

du signal  $s$  si  $\alpha_s = \alpha_i = 1$  ; l'hypothèse  $H'_1$  lorsque le signal reçu est composé du bruit  $w_g$  et du signal  $s$ .

$$\begin{cases} H'_0 & : r(t) = w_g(t) + w_i(t - T_i) \\ H'_1 & : r(t) = s(t - T_s) + w_g(t) \end{cases}$$

### 4.2 Principe

Pour discriminer les deux hypothèses, la fonction d'intercorrélation est comparée avec le modèle en superposant les pics les plus élevés, soit  $\Gamma_{s,r}$  la fonction d'intercorrélation, et  $\Gamma_s$  le modèle.

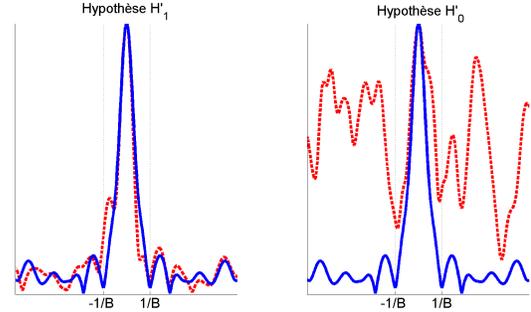


FIGURE 2 – en rouge, les fonctions d'intercorrélation sous les hypothèses  $H'_0$  et  $H'_1$  ; en bleu, le modèle

L'estimation d'une erreur permet d'obtenir une distance entre le pic détecté et le modèle :

$$err = \frac{1}{T_{err}} \int_{-\frac{T_{err}}{2}}^{+\frac{T_{err}}{2}} |\Gamma_s(t) - \Gamma_{s,r}(t - T_{pic})|^2 dt \quad (15)$$

avec  $T_{err}$  la durée d'estimation de l'erreur et  $T_{pic}$  l'instant correspondant à l'observation du pic d'intercorrélation.

Ainsi, dans l'hypothèse  $H'_1$ , la distance sera faible car le signal reçu est composé du signal utile (de bande de fréquence  $B$ ), et donc la fonction d'intercorrélation aura un lobe principal de même largeur que celui du modèle. En revanche, dans l'hypothèse  $H'_0$ , la bande de fréquence de  $w_i$  est dépendante du bruit, et l'erreur sera plus élevée. La partie suivante expérimente cette méthode de discrimination.

### 4.3 Simulation

La méthode de détection présentée est testée via les mêmes données simulées que dans la section précédente. Les courbes ROC sont représentées Figure 3.

### 4.4 Conclusion

Contrairement au test d'hypothèse, cette méthode est robuste au bruit interférent  $w_i$ . En revanche, lorsque la  $RSB$  devient trop important, les performances deviennent inférieures à celles du test d'hypothèse. On propose alors d'associer les deux méthodes de détection dans la section suivante.

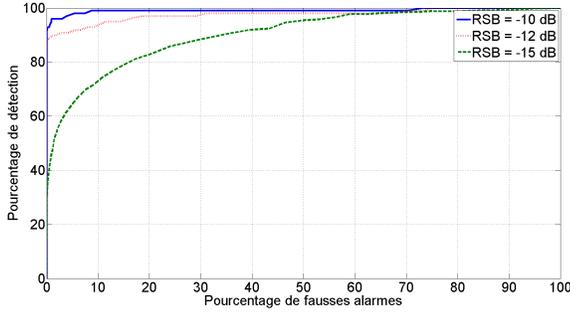


FIGURE 3 – Courbes ROC de la méthode de détection pour différents  $RSB$

## 5 Association des deux méthodes de détection

### 5.1 Introduction

Deux méthodes de détection ont été développées précédemment. La première (que l'on nommera « détection 1 ») est basée sur la connaissance a priori du bruit ainsi que sur l'amplitude de la fonction d'intercorrélacion, et la seconde (que l'on nommera « détection 2 ») repose sur la forme de la fonction de l'autocorrélacion. Il a été montré que la détection 1 est adaptée au  $RSB$ , mais elle est sensible au bruit interférent  $w_i$ . En revanche, la détection 2 est robuste à ce type de bruit, mais perd en efficacité lorsque le  $RSB$  devient trop important. La combinaison de ces deux méthodes est alors développée dans cette section.

### 5.2 Principe

L'idée est d'appliquer dans un premier temps la détection 1, et d'utiliser la détection 2 dans le but de discriminer les fausses alarmes, dues au bruit interférent.

Dans un premier temps, le seuil de la détection 1 est fixé de manière à avoir un compromis respectable entre pourcentage de détection et pourcentage de fausse alarme. Une fois ce seuil fixé, on applique la détection 2 aux cas où nous sommes dans l'hypothèse  $H_1$ . L'hypothèse  $H_1$  est alors scindée en deux sous-hypothèses :  $H_{10}$  lorsque le signal détecté est le bruit interférent  $w_i$  et  $H_{11}$  lorsque le signal détecté est le signal utile :

$$\begin{cases} H_0 & : r(t) = w_g(t) \\ H_{10} & : r(t) = w_g(t) + w_i(t - T_i) \\ H_{11} & : r(t) = s(t - T_s) + w_g(t) \end{cases}$$

### 5.3 Simulation

La combinaison des deux méthodes de détection est testée pour un  $RSB = -15dB$  Figure 4.

On remarque alors que l'association des deux détections améliore les performances de par l'adaptation au rapport signal sur bruit de la détection 1 et de par la robustesse au bruit interférent

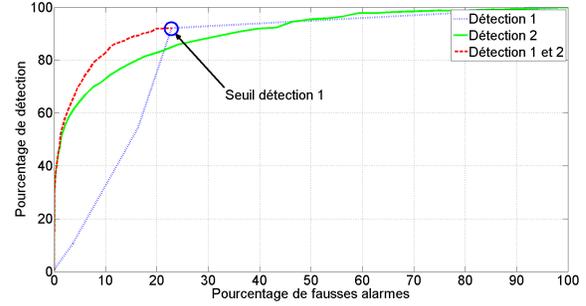


FIGURE 4 – Courbes ROC de la combinaison des 2 méthodes de détection pour un  $RSB = -15dB$

de la détection 2. En revanche, les performances seront limitées par le choix du seuil fixé par la détection 1.

### 5.4 Conclusion

Dans un contexte de détection de signaux acoustiques sous-marins large bande, il est courant d'être en présence de bruits de fortes intensités. Ces bruits engendrent de fausses détections pour des méthodes de type test d'hypothèse, basées sur l'amplitude de la fonction d'intercorrélacion entre le signal émis et le signal reçu.

La méthode proposée dans cet article se trouve alors être efficace pour la discrimination et la suppression de fausses alarmes. Les méthodes de détections présentées dans l'article sont appliquées à un *chirp*, mais sont adaptées pour tous les types de signaux large bande.

## 6 Remerciement

Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'une thèse CIFRE-DGA avec la société Alseamar, Meyreuil.

## Références

- [1] Harry L Van Trees. *Detection, estimation, and modulation theory*. John Wiley & Sons, 2004.
- [2] Robert N McDonough and Anthony D Whalen. *Detection of signals in noise*. Academic Press, 1995.
- [3] Louis L Scharf. *Statistical signal processing*, volume 98. Addison-Wesley Reading, MA, 1991.
- [4] Pierre Yves Arquès. *Décisions en traitement du signal*. 1979.
- [5] B Ollivier, F Maussang, Christophe Sintès, and René Garello. Detection improvement by phase study of the analytical cross-correlation signal. In *OCEANS, 2015-Genova*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [6] Achim Hein. *Processing of SAR data*. Springer, 2003.