

Séparation d'impulsions bio-acoustique par analyse du rythme

Olivier LE BOT^{1, 2}, Cédric GERVAISE^{2, 3}, Jérôme I. MARS², Julien BONNEL⁴

¹Laboratoire STIC/AP, ENSTA Bretagne (UEB)
2 François Verny, 29806 Brest Cedex 9, France

²GIPSA-lab, CNRS, Grenoble INP
11 rue des Mathématiques, Domaine Universitaire, 38402 Saint Martin d'Hères, France

³Chaire CHORUS, Fondation Grenoble INP
46 Rue Félix Viallet, 38031 Grenoble cedex, France

⁴LabSTICC/TOMS, CNRS (UMR 6285), ENSTA Bretagne (UEB)
2 rue François Verny, 29806 Brest Cedex 9, France

olivier.le.bot@ensta-bretagne.fr, cedric.gervaise@gipsa-lab.grenoble-inp.fr,
jerome.mars@grenoble-inp.fr, julien.bonnel@ensta-bretagne.fr

Résumé – Une majorité de mammifères marins émet de courtes impulsions acoustiques pour satisfaire une activité de localisation ou de chasse. Ces impulsions sont le plus souvent émises en trains rythmés et il est très fréquent d'enregistrer simultanément les clics de plusieurs animaux. Cet article présente une méthode permettant de séparer les trains de clics enregistrés sur un unique capteur afin de connaître le nombre d'animaux ayant émis simultanément. On transpose au domaine de la bio-acoustique des algorithmes de séparation de sources décrits dans le domaine radar. La méthode proposée n'utilise que les temps d'arrivées des impulsions et un analyseur de rythme pour séparer les trains, ce qui est une originalité en bio-acoustique sous-marine où habituellement des paramètres acoustiques tels que la pression efficace, la pression maximum ou la fréquence centrale sont utilisés pour classifier les impulsions. Le rythme est analysé par une fonction d'autocorrélation à valeur complexe qui permet de supprimer les harmoniques que l'on trouverait avec une autocorrélation classique. Les résultats se présentent sous forme d'une carte montrant l'évolution du rythme des trains entrelacés en fonction du temps. Ceci permet de connaître d'une part le nombre de trains entrelacés et d'autre part l'évolution du rythme de chacun de ces trains. Une telle représentation est nouvelle en bio-acoustique sous marine.

Abstract – All odontocetes produce short acoustic pulses called clicks to perform localization, hunt preys or communicate. These clicks are generally emitted in trains having a certain rhythm. They can be recorded using an hydrophone. Frequently, click trains from several animals are recorded simultaneously. This paper introduces a method for deinterleaving these click trains. The proposed algorithm uses only the time of arrival (TOA) of the clicks instead of the usual acoustical parameters like the average sound pressure level, the peak sound pressure level or the frequency contents. The method is based on a complex autocorrelation function that allows to analyze the rhythm of the interleaved click trains, while suppressing the subharmonics usually obtained by using a classical autocorrelation. As a final result, it gives a map showing the evolution of the rhythm of the interleaved click trains as a function of the time. This map highlights the number of animals clicking simultaneously and allows the tracking of rhythm variations within each train. The proposed algorithm is successfully tested on simulated data and validated on real data.

1 Introduction

Depuis plusieurs années, le monitoring du milieu marin par acoustique passive (PAM) a connu un essor important, tant pour la compréhension scientifique des espèces (éthologie, écologie) [1] que pour évaluer et prévenir les impacts des activités humaines (sonar, prospection sismique, trafic maritime) sur l'environnement et en particulier sur les mammifères marins [2].

Les odontocètes (cétacés à dent) émettent principalement deux types de sons : des modulations de fréquence et des clics. Les clics sont des sons impulsionnels très courts, généralement émis en trains rythmés. Ces clics permettent aux odontocètes de se localiser dans leur environnement, de localiser leurs proies, ainsi que de communiquer entre eux [3]. Les trains de clics sont no-

tamment caractérisés par l'intervalle inter-clic (ICI), qui correspond au temps écoulé entre deux clics successifs. L'ICI peut varier énormément en fonction de l'espèce (2 ms pour les dauphins [4] à 2 s pour les cachalots [5]) ou en fonction de l'activité des individus (chasse, écholocation). De nombreuses espèces d'odontocètes vivent en groupe dont la taille peut aller de quelques individus à plusieurs dizaines voir centaines d'individus selon les espèces [6]. Il est donc courant d'enregistrer sur les systèmes PAM des trains de clics provenant simultanément de différents individus. Pour compter le nombre d'individus, étudier leur comportement ainsi que pour leur localisation et leur suivi dans la colonne d'eau, il faut alors être capable de séparer les trains de clics de façon automatique.

Ce papier présente une méthode permettant de séparer des

trains de clics enregistrés par un seul hydrophone, en ne s'appuyant que sur les temps d'arrivée des clics (TOA) et sous l'hypothèse que leur source les a émis en rythme. Pour effectuer cette détection des trains bioacoustiques et leur séparation, nous allons utiliser des méthodes développées ces dernières années dans le domaine du radar. La séparation de trains d'impulsions a initialement été basée sur l'autocorrélation du train, menant à la construction d'un histogramme [7, 8, 9]. L'histogramme présente alors des pics aux périodes ICI correspondant aux trains présents dans le signal. Cependant, l'autocorrélation entraîne également l'apparition de pics à des valeurs multiples entiers des ICI fondamentaux (harmoniques), ce qui rend alors les résultats difficilement lisibles. Pour remédier à ce problème, un algorithme d'autocorrélation à suppression d'harmonique (ASH) est introduit dans [10]. Celui-ci est ensuite repris sous le nom de PRI-transform dans [11] et amélioré afin de permettre la séparation de trains dont l'ICI est altéré par un jitter. Cette dernière version est performante si les trains entrelacés existent sur l'ensemble du temps d'observation. En revanche les résultats se dégradent dès lors qu'un train est beaucoup plus court que le temps d'observation. Nishiguchi [12] introduit le concept d'analyse temps-rythme qui permet de détecter des trains de courtes durées entremêlés à des trains de durées plus longues en suivant l'évolution des rythmes au cours du temps. Nous appliquons à un contexte de bio-acoustique sous-marine ce concept d'analyse temps-rythme basé sur l'algorithme ASH. La méthode proposée est testée avec succès sur des données réelles.

La suite du papier s'organise comme suit. La partie 2 présente l'algorithme ASH, puis étend son utilisation à l'analyse temps-rythme. La partie 3 discute de la robustesse de la méthode et la partie 4 montre les résultats de l'algorithme sur des données réelles. La partie 4 discute de la robustesse de la méthode et fournit quelques conclusions.

2 Méthode

2.1 Autocorrélation à Suppression d'Harmoniques

Soit un train composé de N clics caractérisés par leurs TOA respectifs t_n , $n = 0, \dots, N-1$. Nous considérons uniquement le TOA de chaque clic comme paramètre pour modéliser le train. Le train de clics peut alors être décrit comme une somme d'impulsions de Dirac,

$$g(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - t_n) \quad (1)$$

avec δ la fonction de Dirac et t_n le temps d'arrivée du n^{ieme} clic.

La formule de l'autocorrélation permettant la suppression d'harmoniques (ASH) introduite dans [10] et [11] est définie par :

$$D(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)g(t - \tau)exp(2\pi it/\tau)dt \quad (2)$$

En substituant (1) dans (2), nous obtenons alors :

$$D(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=0}^{n-1} \delta(\tau - (t_n - t_m))exp(2\pi it_n/(t_n - t_m)) \quad (3)$$

La différence entre l'autocorrélation classique et l'autocorrélation à suppression d'harmonique réside donc dans l'ajout du facteur de phase $exp(2\pi it_n/(t_n - t_m))$. Cette exponentielle va être importante dans la suppression des harmoniques qui apparaissent avec l'autocorrélation classique.

Afin de voir comment les harmoniques sont supprimées, considérons le cas particulier d'un train de clics venant d'une source unique. Les TOA des clics de ce train sont donnés par la relation :

$$t_n = (n + \eta)p \quad (4)$$

où $n = 1, \dots, N$; p est l'ICI et $\eta \times p$ la phase initiale. Avec cette expression pour les TOAs, l'autocorrélation classique donne le résultat suivant :

$$C(\tau) = \sum_{l=1}^{N-1} (N - l)\delta(\tau - lp) \quad (5)$$

Il apparaît clairement dans cette équation (5) que pour $l \geq 2$, l'amplitude de l'autocorrélation $C(\tau)$ dépend de N lorsque τ est un multiple entier de l'ICI p du train. Aussi, plus N est grand, plus les harmoniques sont visibles. Dans le cas de l'autocorrélation à suppression d'harmoniques, l'équation (3) devient :

$$D(\tau) = (N - 1)\delta(\tau - p)exp(2\pi i\eta) + \sum_{l=2}^{N-1} \delta(\tau - lp) \frac{\sin(N\pi/l)}{\sin(\pi/l)} e^{\pi i(N+1+2\eta)/l} \quad (6)$$

Le premier terme à droite de l'équation (6) représente la contribution des clics correspondants à l'ICI fondamental $\tau = p$ et son module est $N - 1$. Le second terme représente la contribution des clics localisés à des valeurs multiples entiers de l'ICI fondamental $\tau = lp$ et donne donc l'amplitude des harmoniques. Pour $l \in [2; N - 1]$ l'amplitude des harmoniques se résume donc à :

$$\left| \frac{\sin(N \times \pi/l)}{\sin(\pi/l)} \right| \quad (7)$$

Si pour un nombre de clics N donné, on calcule l'amplitudes de chaque harmonique l des autocorrélations classique et complexe obtenues à partir des équation 5 et 7 respectivement, on observe que les amplitudes des harmoniques de l'autocorrélation complexe sont nettement inférieures à celles de l'autocorrélation classique.

La figure 1 présente un exemple de résultat obtenu avec une autocorrélation classique d'une part et l'autocorrélation à suppression d'harmoniques d'autre part, dans le cas de 3 trains entrelacés d'ICI constants. L'ICI de chacun des trains est 0.01 s, 0.014 s et 0.022 s respectivement. À l'inverse de la fonction d'autocorrélation classique, on remarque que la fonction d'autocorré-

lation complexe supprime complètement les harmoniques, ce qui permet de rendre plus lisible les résultats et en particulier de trouver facilement le nombre de trains entrelacés et leurs ICI respectifs.

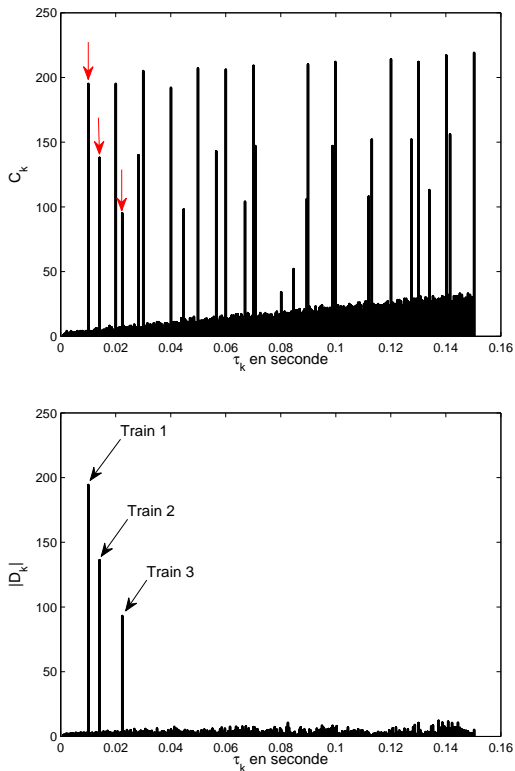


FIGURE 1 – Comparaison entre le spectre de l'autocorrélation classique (à gauche) et le spectre de l'autocorrélation complexe (à droite) pour 3 trains de clics d'ICI constants entrelacés. Les ICI des trois trains sont respectivement 0.01 s, 0.014 s, 0.022 s. Les positions des trois trains sont repérées par des flèches.

2.2 Carte temps-rythme

La limite majeure de l'autocorrélation à suppression d'harmonique telle que décrite précédemment, est que chaque source doit exister pendant toute la longueur de la fenêtre d'observation pour que l'amplitude $|D(\tau)|$ associé à l'ICI τ de chaque train entrelacé ressorte du bruit de fond généré par les interférences mutuelles entre les clics des différents trains. Afin de palier à cet inconvénient, une méthode d'analyse temps-rythme est introduite dans [12]. Elle consiste à calculer l'autocorrélation complexe dans de petites fenêtres glissant le long des trains entrelacés. L'expression mathématique de cette analyse temps-rythme est donnée par l'équation (8) :

$$D(t, \tau) = \int_{s \in W(t, \tau)} g(s)g(s + \tau) \exp(2\pi i s / \tau) ds \quad (8)$$

où $W(t, \tau) = [t - \nu\tau/2, t + \nu\tau/2]$ est la fenêtre glissant le long des trains entrelacés. Les fenêtres sont centrées sur le

temps t et leur largeur est $\nu\tau$, où ν est un nombre réel positif. Le résultat de l'analyse temps-rythme s'exprime sous la forme d'une image représentant le spectre des ICI en fonction du temps : $|D(t, \tau)|$. Ce spectre peut être seuillé par la théorie de Neyman-Pearson [12].

3 Analyse des Performances

Les performances de cette méthode sont conditionnées par deux catégories de paramètres. D'une part les paramètres liés au design de l'algorithme en lui-même, tels que ν et la *Pfa*, d'autre part par les paramètres liés aux trains entrelacés. Parmi ces derniers il y a en particulier le jitter naturel qui affecte le rythme des trains produits par les odontocètes, le nombre de clics composant chaque train, et enfin la présence de clics non-rythmés mélangés aux trains de clics que l'on souhaite détecter.

Une étude exhaustive de l'influence de ces paramètres a été réalisée. Les résultats détaillés de cette étude ne sont pas présentés dans ce papier. Ils peuvent se résumer comme suit :

- Plus ν est petit (entre 5 et 20), meilleur est le suivi de l'ICI instantané sur la carte temps-rythme (bonne résolution en temps et en rythme).
- Plus ν est grand (supérieur à 20), meilleur est l'algorithme pour mettre en évidence la présence d'un train rythmé et donner une valeur très approximative de l'ICI.
- Plus ν est grand, plus il faut de clics dans le train pour que celui-ci soit détecté.
- Plus le train à détecter est affecté par du jitter, plus il faut de clics dans le train pour pouvoir le détecter.
- Plus il y a de clics non-rythmés mélangés aux clics rythmés, plus il est difficile de détecter le train de clics rythmé.

Cette analyse de performances nous a permis de choisir les paramètres qui semblent les mieux adaptés au contexte de la bioacoustique sous-marine. Ainsi, dans les résultats présentés dans la partie suivante, $\nu = 10$ et la *Pfa* est fixée à 10^{-4} .

4 Résultats

L'algorithme présenté précédemment est testé sur des trains de clics entrelacés de grands dauphins (*Tursiops truncatus*). Ils ont été enregistrés en Août 2010 à l'Ouest de la presque-île du Cotentin (France). Après extraction des TOA de ces clics, la liste des TOA est donnée comme entrée à notre algorithme de désentrelacement par analyse temps-rythme. Les résultats de l'algorithme sont présentés sur la figure 2. La figure du haut représente le spectre des ICI en fonction du temps : $|D(t, \tau)|$, tandis que la figure du bas représente le résultat obtenu après seuillage. Après le seuillage, 7 segments distincts correspondant à 7 trains de clics sont détectés et peuvent être clairement distingués. Dans la période 242-247 secondes on peut voir qu'en permanence 2 dauphins produisaient des clics simultanément. Jusqu'à 3 trains différents peuvent même être distingués simultanément entre 248 et 249 secondes. On remarque aussi la présence de quelques fausses alarmes dans l'intervalle

temporel [250 ; 251.5] s aux ICIs entre 0.1 et 0.2 s.

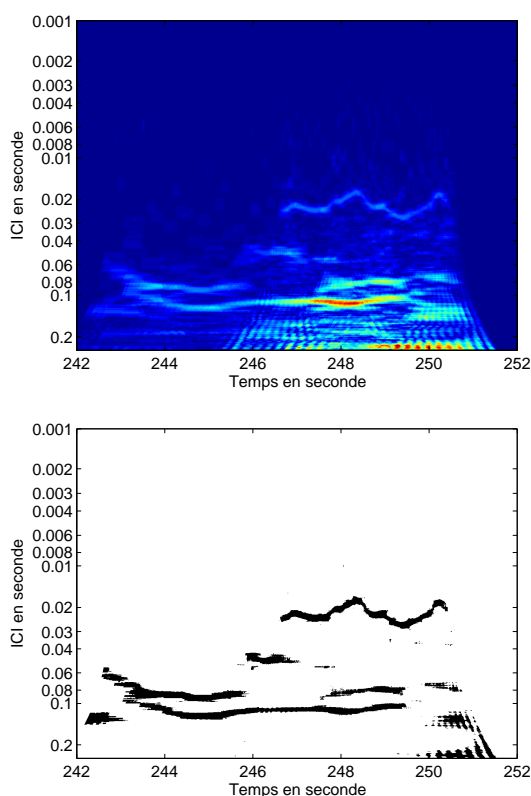


FIGURE 2 – Résultats de l’analyse temps-rythme sur des données réelles de grands dauphins. (a) Spectre temps-rythme $|D(t, \tau)|$. (b) Carte temps-rythme après l’étape de seuillage. L’axe des abscisses représente le temps et l’axe des ordonnées représente l’ICI.

5 Conclusion

Dans cet article nous avons proposé une méthode pour séparer les trains de clics de plusieurs mammifères marins émettant simultanément. Pour cela, nous avons utilisé une représentation temps-rythme basée sur le calcul d’une auto-corrélation à valeur complexe. Cette autocorrélation complexe permet de mettre en évidence les rythmes fondamentaux des trains entrelacés tout en supprimant les pics situés aux harmoniques supérieures que l’on obtient habituellement avec une autocorrélation classique. La méthode proposée n’utilise que les temps d’arrivée des impulsions, ce qui est une approche inédite dans le domaine de la bio-acoustique sous marine. Elle a été validée avec succès sur des données réelles de grands dauphins (*Tursiops truncatus*). Des simulations sur d’autres espèces telles que les bélugas ou les cachalots, nous ont également permis de voir que l’algorithme proposé est générique et nécessite peu voir pas de changements en terme de paramétrage lors du passage d’une espèce à une autre.

Remerciements

Les auteurs remercient F. Gally, Groupe d’Étude des Cétacés du Cotentin et L. Di Iorio, Chaire CHORUS, pour la mise à disposition des moyens nautiques et le soutien à la réalisation du recueil des données réelles ainsi que l’ANR pour le financement du projet (ANR-12-ASTR-0021-03 ”MER CALME”).

Références

- [1] W. W. L. Au et M. C. Hastings. *Principles of marine bioacoustics*, Springer, 2008.
- [2] J. Hildebrand. *Impact of anthropogenic sound on cetaceans*, volume 132, 2012.
- [3] W. W. L. Au. *The sonar of dolphins*, Springer, pages 78 et 115, 1993.
- [4] P. Simard, A.L. Hibbard, K.A. McCallister, A.S. Franke, D.G. Zeddies, G.M. Sisson, S. Gowans, E.A. Forsy, D.A. Mann. *Depth dependent variation of the echolocation pulse rate of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*)*, The Journal of the Acoustical Society of America, volume 127, number 1, pages 568–578, 2010.
- [5] R. Hirotsu, M. Yanagisawa, T. Ura, M. Sakata, H. Sugimatsu, J. Kojima, R. Bahl. *Localization of sperm whales in a group using clicks received at two separated short baseline arrays*, The Journal of the Acoustical Society of America, volume 127, pages 133, 2010.
- [6] W.F. Perrin, B.G. Würsig, J. G. M. Thewissen. *Encyclopedia of marine mammals*, Academic Press, 2008.
- [7] R. G. Wiley. *Electronic Intelligence : The Analysis of Radar Signals*, Artech House, Boston, 1993.
- [8] H. K. Mardia. *New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences*. Radar and Signal Processing, IEE Proceedings, volume 136, number 4, pages 149–154, 1989.
- [9] D. J. Milojevic et B. M. Popovic. *Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses*. Radar and Signal Processing, IEE Proceedings, volume 139, number 1, pages 98–104, 1992.
- [10] D. Nelson. *Special purpose correlation functions for improved signal detection and parameter estimation*. Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP, IEEE International Conference on, volume 4, pages 73–76, 1993.
- [11] K. Nishiguchi et M. Kobayashi. *Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals*, Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, volume 36, number 2, pages 407–421, 2000.
- [12] K. Nishiguchi. *Time-period Analysis for Pulse Train Deinterleaving*, Computers of the Society of Instrument and Control Engineers, Transaction on, volume E-4, pages 68–78, 2005.