
Détection et classification automatique de signaux acoustiques de baleines à bec

Odile Gérard¹, Craig Carthel², Stefano Coraluppi²

1. DGA TN

Avenue de la Tour Royale, F-83000 Toulon, France
odile.gerard@intradef.gouv.fr

2. Systems & Technology Research

600 W Cummings Park, Woburn, MA_ 01801, États-Unis

RÉSUMÉ. Les baleines à bec sont difficiles à observer et font partie des espèces les plus sensibles au bruit anthropique. L'acoustique passive est donc un outil privilégié pour étudier ces espèces et minimiser l'impact du bruit. Cet article présente une méthode de reconnaissance automatique de signaux de baleines à bec, qui se décompose en trois étapes : la détection de transitoires, la classification individuelle d'un clic, et enfin l'association de clics en trains de clics, grâce à un tracker. L'association en trains de clics permet de renforcer la classification car un clic n'est pas émis seul. De plus les trains de clics ont des caractéristiques qui peuvent être typiques de l'espèce (l'intervalle entre les clics par exemple). Les résultats sur trois espèces de baleines à bec sont présentés : le mésoplodon de Blainville, la baleine à bec de Cuvier et le mésoplodon de Gervais. Les résultats obtenus sont très encourageants.

ABSTRACT. Beaked whale are difficult to observe visually and are among the most sensitive species to anthropogenic noise. Thus passive acoustic monitoring is particularly interesting to study these species and mitigate noise impact. This paper presents the outline of an automatic recognition method of beaked whale signals. This method has three steps: a transient detector, individual click classification and click association in click trains using a multi-hypothesis tracker. Click train association enhances classification because a click is not emitted alone and click trains have properties that can be characteristic of a species (e.g. inter-click-interval). The results are presented for three species: Blainville's, Cuvier's and Gervais beaked whale. The results obtained are very encouraging.

MOTS-CLÉS : détection, classification, baleine à bec, association, pistage.

KEYWORDS: detection, classification, beaked-whale, target tracking, data association.

DOI:10.3166/TS.33.73-94 © Lavoisier 2016

Extended abstract

Beaked whale are difficult to observe visually and are among the most sensitive species to anthropogenic noise. Thus, passive acoustic monitoring is particularly interesting to study these species and mitigate noise impact. This paper presents the outline of an automatic recognition method and gives the results on three species: Blainville's, Cuvier's and Gervais beaked whale.

We first describe the click characteristic of these three species. Then datasets used for this article are presented.

This method has three steps: a transient detector, individual click classification and click association in click trains using a multi-hypothesis tracker. The transient detector is based on Page test. Individual click classification is based on typical species click characteristics, mainly using spectral characteristics.

The tracker associates click in click trains. Signal processing of hydrophone data results in a single time series of clicks. This time series includes sub-sequences that originate from an unknown number of vocalizing whales, as well as possible spurious clicks. For each marine mammal originated sub-sequence, we assume the click amplitudes (dB), Inter-Click Intervals (ICI) and spectrum are slowly varying. The tracker processes the click time series in sequence. At each step, the set of tentative track hypotheses is updated with the current click. With a fixed latency, known as n-scan, track hypotheses are resolved.

The originality of this method is that the click train association enhances classification because a click is not emitted alone and click trains have properties that can be characteristic of a species (e.g. ICI). In addition the number of co-existing track gives an estimation of the number of whales vocalizing at the same time.

This method has been tested on Blainville's, Cuvier's and Gervais beaked whale. For the first species, the method has been tested in presence of buzz clicks and in presence of dolphin clicks. For the second species, it has been tested in presence of dolphin clicks. In all cases the method associated beaked whale clicks in trains that have the typical species ICI. In one case the number of beaked whale was known and our method gave an estimate close to the real number.

1. Introduction

Des mammifères marins ont été retrouvés échoués suite à des exercices sonar (Frantzis, 1998 ; Balcomb et Claridge, 2001 ; D'Amico, 2009). Les baleines à bec sont les espèces les plus représentées lors de ces échouages atypiques. Depuis la fin des années 1990 et le début des années 2000, un lien entre ces échouages et les exercices sonar a commencé à être suspecté. Il est maintenant reconnu, même si ce phénomène n'est pas expliqué. Il semblerait que ces échouages soient dus à un effet secondaire d'une modification de comportement plutôt qu'à un impact acoustique direct (Cox *et al.*, 2006).

La famille des baleines à bec comprend plus de vingt espèces. Elles faisaient partie des moins connues jusqu'à ce que ce lien soit établi. Depuis une bonne dizaine d'années, un important effort de recherche a été fait par la communauté scientifique internationale et tout particulièrement par les États-Unis.

On sait maintenant qu'elles vivent en général plutôt en eau profonde dans des zones accidentées (canyons ou montagnes sous-marines). Elles peuvent atteindre des profondeurs importantes et passent très peu de temps à la surface (Baird *et al.*, 2006 ; Tyack *et al.*, 2006). Elles détiennent le record d'immersion jamais enregistré pour un mammifère marin aussi bien en profondeur qu'en durée : 2992 mètres et 137 minutes (Schorr *et al.*, 2014). Elles ont aussi tendance à être « timides » et à éviter les bateaux. Ces comportements expliquent pourquoi elles faisaient partie des espèces les moins connues. Quelques articles décrivaient les sons de certaines espèces avant ce grand effort de recherche, mais la bande de fréquence des enregistrements était souvent trop limitée. Depuis 2004, les signaux de différentes espèces sont de plus en plus connus (Johnson *et al.*, 2004 ; 2006 ; Madsen *et al.*, 2005 ; Zimmer *et al.*, 2005 ; Gillespie *et al.*, 2009 ; Baumann-Pickering *et al.*, 2010 ; 2013a ; 2013 b ; 2013c ; Rankin *et al.*, 2011 ; Wahlberg *et al.*, 2011 ; Cholewiak *et al.*, 2013). Elles émettent principalement des clics, qui ont une modulation de fréquence ascendante à un rythme régulier. Bien qu'ayant des caractéristiques communes, ces signaux semblent être spécifiques à chaque espèce (Baumann-Pickering *et al.*, 2013c). Au total, les signaux de quatorze espèces sont connus : treize sont assignés de façon certaine ou très probable à une espèce.

Les baleines à bec sont en général très difficiles à observer et semblent être parmi les plus sensibles au bruit anthropogénique. Comme les signaux acoustiques de plusieurs espèces sont maintenant relativement bien connus, la surveillance acoustique est particulièrement adaptée, car elle peut contribuer à minimiser l'impact du bruit anthropique sur les animaux en améliorant la connaissance de la distribution des espèces, en surveillant une zone avant et pendant une période de bruit (exercice sonar...) et en facilitant la recherche sur l'impact des bruits anthropiques sur ces espèces (Cox *et al.*, 2006). Il est pour cela très utile de savoir reconnaître leurs signaux de façon automatique. Cet article propose une méthode qui le permet. Son originalité est que la classification est établie en deux étapes : la première porte sur les clics individuels, la deuxième consiste à associer les clics d'un individu à l'aide d'une méthode de pistage, afin d'en extraire les trains de clics. En effet, comme beaucoup de cétacés à dents, les baleines à bec recherchent leurs proies en émettant des clics d'écholocation de façon régulière. La reconnaissance des trains de clics est une étape très importante car en général l'animal n'émet pas un clic isolé. De plus, les trains de clics ont des propriétés qui sont propres à une espèce. Cette méthode est testée sur trois espèces : les mésoplodons de Blainville (*Mesoplodon densirostris*), les baleines à bec de Cuvier (*Ziphius cavirostris*) et les mésoplodons de Gervais (*Mesoplodon europaeus*).

Cet article reprend les résultats présentés lors de la troisième édition du workshop SERENADE (Surveillance, Etude et Reconnaissance de l'Environnement mariN par Acoustique DiscrètE), qui a eu lieu en novembre 2014 à Grenoble. La section 2 décrit brièvement les caractéristiques des signaux émis par chacune de ces

trois espèces. La section 3 décrit les données utilisées dans cet article. La méthode est présentée dans la section 4. Les trois sections suivantes donnent les résultats pour chacune des trois espèces, respectivement mésoplodon de Blainville, baleine à bec de Cuvier et enfin mésoplodon de Gervais. Les conclusions et perspectives sont données dans la section 8.

2. Rappel des caractéristiques des clics émis par les trois espèces étudiées

Pour trouver leur nourriture, les cétacés à dents émettent des clics (appelés clics d'écholocation). Certaines espèces, dont notamment les baleines à bec, sont connues pour émettre ces clics de façon régulière (André et Kamminga, 2000 ; Johnson *et al.*, 2004, Gillespie *et al.*, 2009, Baumann-Pickering *et al.*, 2013c). Le temps qui sépare deux clics est appelé ICI (*Inter-Click Interval*). Des Dtag (Johnson et Tyack 2003) ont été posés sur des mésoplodons de Blainville et des baleines à bec de Cuvier. Il a été observé sur ces deux espèces qu'à partir d'une profondeur de quelques centaines de mètres, elles commencent à cliquer. Elles émettent de façon quasiment continue jusqu'à ce qu'elles commencent à remonter (Johnson 2004).

Une séquence de clics réguliers peut être suivie soit d'une pause, soit d'une séquence de clics dont le rythme est très accéléré. Une telle séquence est appelée *buzz* et correspond au moment de capture de la proie. La période d'écholocation peut donc être divisée en deux phases : la période de recherche de la nourriture, pour laquelle les clics sont émis de façon régulière et la période de capture, pour laquelle les clics sont émis de façon très accélérée. La période de recherche est beaucoup plus longue que la période de capture. Les clics ont la propriété d'être très directifs aussi bien dans le sens horizontal que vertical (Au, 1993).

Même si les clics sont émis de façon quasi continue durant la plongée, étant donné leur directivité, le nombre de clics visibles sur un enregistrement est très limité. Ce dernier peut varier de deux à trois clics à plusieurs dizaines selon les trains de clics. Ce nombre dépend de la distance, et de l'orientation de l'animal par rapport à l'hydrophone. La distance maximum pour laquelle les clics de baleines à bec sont détectables par un hydrophone a été estimée à 4 km dans les meilleures conditions (Zimmer *et al.*, 2008).

À noter que pour toutes les figures de spectrogramme de cet article, le nombre de points de la DFT est de 60, le signal est pondéré par une fenêtre de Hanning et le recouvrement est de 98 %. Ces valeurs sont similaires à celles de l'article Baumann-Pickering 2013c, dans un but d'harmonisation, ce dernier présentant les signaux de douze espèces.

2.1. Mésoplodon de Blainville

Ces mammifères sont connus pour émettre des clics différents selon la phase d'écholocation : recherche ou capture de la proie (Johnson *et al.*, 2006). Les clics réguliers ont un ICI compris entre 0.2 s et 0.4 s et sont connus pour avoir les caractéristiques suivantes : maximum d'énergie entre 25 et 50 kHz, modulation de

fréquence ascendante, durée d'environ 270 μ s. La remontée du spectre aux alentours de 25 kHz est drastique. Ils ont un niveau sonore de l'ordre de 200-220 dB réf. 1 μ Pa à 1 m (Johnson *et al.*, 2004 ; 2006 ; Madsen *et al.*, 2005).

Ces propriétés correspondent aux clics qui se trouvent sur l'axe. La figure 1 donne la forme temporelle, le spectre et le spectrogramme d'un clic régulier sur l'axe ou proche de celui-ci, provenant des enregistrements décrits dans le paragraphe suivant. Nous constatons que les caractéristiques données ci-dessus sont vérifiées.

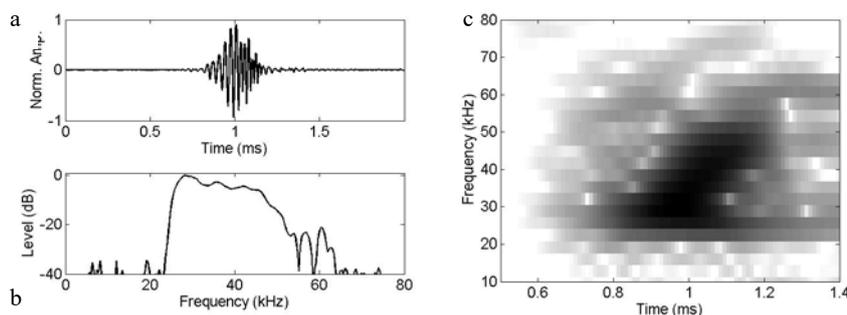


Figure 1. a) signal temporel d'un clic de mésoplodon de Blainville ;
b) spectre de ce même clic ; c) spectrogramme de ce même clic

2.2. Baleine à bec de Cuvier

Pour cette espèce, les clics sur l'axe ont une durée d'environ 200 μ s. Ils présentent une modulation de fréquence ascendante, une fréquence centrale aux alentours de 42 kHz, et une largeur de bande à -10 dB de 22 kHz. L'ICI typique est de 0.4 s. Les clics sont très directionnels. Ils ont un indice de directivité estimé à 25 dB, le niveau sonore atteint 214 dB réf. 1 μ Pa à 1 m (Johnson *et al.*, 2004 ; Zimmer *et al.*, 2005). Une estimation de la directivité peut être trouvée dans les articles de Zimmer (2005 ; 2008).

La figure 2 donne la forme temporelle, le spectre et le spectrogramme d'un clic provenant des enregistrements décrits dans le paragraphe suivant. On peut noter que le niveau du spectre entre 0 et 25 kHz est plus important que pour le mésoplodon de Blainville.

2.3. Mésoplodon de Gervais

Les clics de mésoplodon de Gervais ont d'abord été décrits par Gillespie *et al.*, (2009). Ces clics ont une durée d'environ 200 μ s et présentent aussi une modulation de fréquence ascendante. La fréquence dominante des clics est située entre 30 et 50 kHz. Il est mentionné que ces clics ressemblent aux clics de baleines à bec de Cuvier et de mésoplodon de Blainville, mais sont à une fréquence légèrement supérieure.

L'article de Baumann-Pickering *et al.*, (2013c) donne des caractéristiques de douze signaux de baleines à bec, dont le mésoplodon de Gervais. Dans cet article, les caractéristiques fréquentielles des clics de ce dernier semblent encore légèrement plus élevées que celles décrites par Gillespie *et al.*, (2009). La figure 3 donne la forme temporelle, le spectre et le spectrogramme d'un clic provenant des enregistrements décrits dans le paragraphe suivant. On peut noter que la remontée du spectre se situe plutôt aux alentours de 30 kHz, et que le spectre monte à une fréquence plus élevée que pour les deux espèces précédentes.

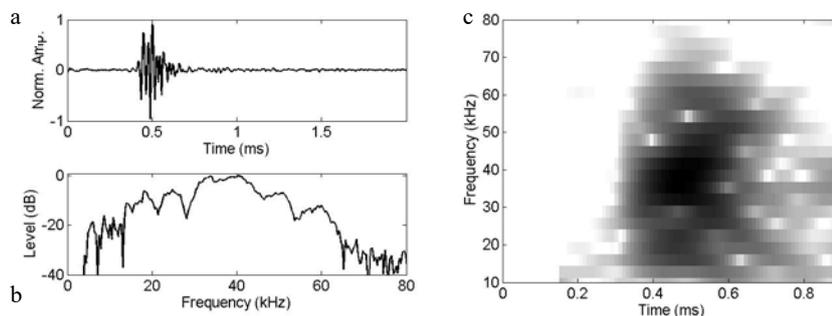


Figure 2. a) signal temporel d'un clic de baleine à bec de Cuvier ;
b) spectre de ce même clic ; c) spectrogramme de ce même clic

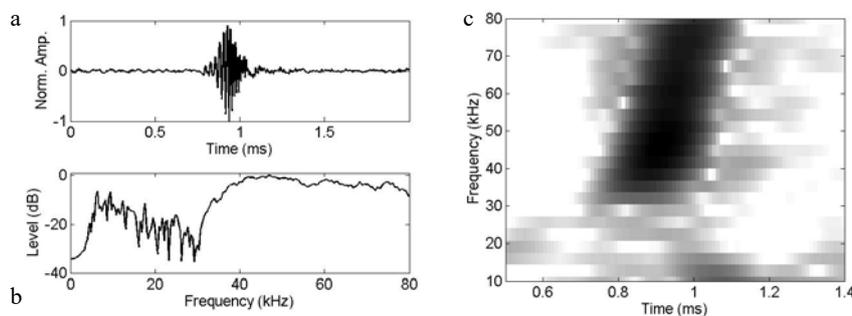


Figure 3. a) signal temporel d'un clic de mésoplodon de Gervais ;
b) spectre de ce même clic ; c) spectrogramme de ce même clic

3. Données utilisées

Les données utilisées pour cette étude proviennent de trois sources. Les premières ont été mises à disposition par les organisateurs du 3rd *International Workshop on the Detection and Classification of Marine Mammals using Passive Acoustics*, Boston, Juillet 2007 (Moretti *et al.*, 2008). Ce workshop sera nommé

DCL dans la suite du texte. Le second jeu de données a été enregistré aux îles Canaries par un DTAG. Ces deux jeux de données peuvent se trouver sur le site internet de Mobysound¹, maintenu par le CIMRS (*Cooperative Institute for Marine Research Studies*) à the Oregon State University, USA. Le troisième jeu de données utilisé a été enregistré par le CPAM (*Compact Passive Acoustic Monitoring*, Grandi *et al.*, 2010), à bord du navire Alliance lors de différentes campagnes du NURC (NATO *Undersea Research Centre*, devenu *Centre for Maritime Research and Experimentation* (CMRE)).

Une estimation du rapport signal sur bruit a été faite pour les signaux présentés ci-dessous. Il varie de 10 à 35 dB. Il faut signaler que les données acoustiques ne sont pas calibrées. Dans les paragraphes illustrant les résultats, l'amplitude donnée n'a pas de signification en soi : les fichiers provenant de différentes sources, l'amplitude des clics peut être très différente d'un fichier à l'autre. Pour cette méthode, seule la différence d'amplitude est utilisée.

3.1. Enregistrement du workshop DCL

Les données de ce workshop ont été enregistrées sur deux polygones de la marine américaine : AUTEK aux Bahamas et SCORE en Californie. Un jeu de données d'entraînement et un jeu de données de test ont été fournis.

Le polygone d'AUTEK est localisé aux Bahamas. Sur le fond, sont montés des hydrophones dont la largeur de bande est de 50 Hz à 45 kHz ou de 8 à 50 kHz (Moretti *et al.*, 2008). La fréquence d'échantillonnage est de 96 kHz. Sur le polygone de SCORE, les hydrophones sont aussi disposés sur le fond. La bande passante de ces enregistrements varie de 8 à 39 ou 50 kHz, selon les hydrophones (Moretti *et al.*, 2008).

Le jeu de données d'entraînement contient seize échantillons d'enregistrement de mésoplodons de Blainville variant de 0.5 à 3 minutes, ainsi que des enregistrements d'autres espèces. Le jeu de données de test comprend neuf enregistrements de dix minutes. Des clics de mésoplodons de Blainville sont présents dans trois fichiers. Dans deux d'entre eux, une autre espèce est également présente. Dans le reste du texte, ce jeu de données sera appelé DCL.

3.2. Enregistrement DTAG

Ce second jeu de données a été enregistré en présence de mésoplodons de Blainville par un DTAG flottant entre deux eaux, aux Canaries et il a été mis à disposition par Mark Johnson. L'enregistrement dure 21 minutes, la fréquence d'échantillonnage est de 192 kHz. La qualité des données diminue en fonction du temps probablement parce que la distance entre le DTAG et les animaux augmente. Dans les notes accompagnant cet enregistrement, il est indiqué que trois animaux sont présents. Dans le reste du texte, ce jeu de données sera appelé DTAG.

3.3. Enregistrement CPAM

Les signaux utilisés pour cette étude ont été enregistrés lors des campagnes Sirena 2010 et 2011 du NURC (Hughes *et al.*, 2010). La première a eu lieu en Atlantique Est, au large du Portugal, de l'Espagne et du Maroc. La deuxième s'est déroulée en Méditerranée dans le golf de Gênes. Le CPAM, conçu par le NURC, a une bande passante de 80 kHz. La fréquence d'échantillonnage est de 192 kHz. Les deux espèces de mésoplodons, objets de cette étude, ont été enregistrées en Atlantique. Les baleines à bec de Cuvier ont été enregistrées en Méditerranée. Dans le reste du texte, ce jeu de données sera appelé CPAM.

4. Description de la méthode

L'intérêt pour la détection et classification de signaux de mammifères marins a augmenté de façon très importante ces dernières années. Plusieurs auteurs se sont intéressés aux baleines à bec (Gillespie et Caillat, 2008 ; Harland, 2008 ; Jarvis *et al.*, 2008 ; Roch *et al.*, 2008 ; Mellinger, 2008). D'autres méthodes de classification sont aussi citées dans l'article de Yack *et al.* (2010). Elles s'intéressent toutes à la classification du clic individuel. Celles décrites dans le dernier article s'intéressent à l'ICI, sans toutefois associer les clics par animaux ; dans ce cas, quand plusieurs animaux sont présents ou s'il y a des réflexis, l'ICI n'est plus représentatif de l'espèce. À notre connaissance il n'y avait pas de méthode d'association de clics par animaux avant le développement de celle décrite dans cet article. Les méthodes utilisées pour la détection et la première étape de classification sont présentées brièvement. D'autres méthodes, dont celles évoquées ci-dessus, pourraient servir d'entrée à la deuxième étape de classification : l'association des clics par animaux.

4.1. Généralités sur la méthode

La méthode est basée sur celle décrite dans les articles de Gerard *et al.* (2008a ; 2008c). Un détecteur de transitoires basé sur le test de Page (Page, 1954 ; Abraham et Willett 2002) est utilisé pour la détection des clics : l'instant d'arrivée, la durée, l'amplitude et la forme spectrale du clic sont stockés. Le clic est ensuite classifié comme pouvant appartenir ou non à une des trois espèces d'intérêt. Un MHT tracker (*Multi-Hypothesis Tracker*) est utilisé pour associer les clics par animaux. L'association est basée sur l'hypothèse que l'amplitude, l'ICI et le spectre entre les clics consécutifs varient peu. L'association par animal permet de reconnaître un train de clics, un clic étant rarement émis seul. De plus, les trains de clics peuvent avoir des propriétés caractéristiques des espèces, tels que l'ICI par exemple. En cas de présence de plusieurs animaux, il est difficile d'estimer l'ICI. Mais, en associant les clics par animaux, cette méthode permet de le calculer. La classification est donc faite en deux étapes : la première basée sur une classification individuelle du clic, la deuxième basée sur la reconnaissance d'un train de clics. La classification comme appartenant à une espèce est donc faite seulement si plusieurs clics d'un même animal ont été associés et si ce train de clics possède les propriétés caractéristiques

de cette espèce. De plus, l'association des clics par animal permet de donner une estimation du nombre d'animaux présents. Cependant, un animal peut s'arrêter de cliquer ou, plus probablement, le contact peut être perdu à cause de la directivité des signaux à l'émission. En général, la piste d'un animal donné est donc fragmentée, et non pas continue. Puisque, pour l'instant nous ne connaissons pas de critères qui nous permettent d'attribuer les clics à un animal plutôt qu'à un autre, l'estimation du nombre d'animaux sera donnée par le plus grand nombre de pistes qui coexistent à un instant donné, ce qui correspond au nombre d'animaux émettant des trains de clics détectés en même temps.

4.2. Détecteur de transitoires

Dans un premier temps le signal temporel est filtré passe-haut afin de s'affranchir de la plus grande partie du bruit (qui est généralement plus important en basse fréquence). La fréquence de coupure du filtre dépend de la qualité des signaux et des espèces sur lesquelles l'accent est mis. Le signal est ensuite élevé au carré et normalisé de la façon suivante :

$$Z_i = X_i / \lambda_i \quad (1)$$

$$\lambda_{i+1} = (1 - \alpha)\lambda_i + \alpha X_i \quad (2)$$

où X_i est le signal filtré élevé au carré, pour l'échantillon i , λ_i est l'estimée du bruit pour l'échantillon i , et Z_i est le signal filtré élevé au carré normalisé. L'estimation du bruit est mise à jour en dehors des détections. L'initialisation se fait par une moyenne de quelques secondes du signal filtré et élevé au carré. Les valeurs utilisées sont $\alpha = 0.0001$ quand il n'y a pas de détection et $\alpha = 0$ quand il y a détection.

Le test de Page est un détecteur séquentiel (Wald, 1947) qui permet de fournir de la robustesse pour des signaux dont la durée n'est pas connue a priori, car il permet de détecter le début et la fin d'un signal. Ce test séquentiel permet, à chaque étape, de choisir entre les trois possibilités suivantes : présence de signal, absence de signal ou report de la décision à l'étape suivante. Le temps d'arrivée, la durée, l'amplitude et l'information spectrale du clic sont stockés pour les étapes successives. La statistique du test de Page W est calculée pour chaque échantillon i de signal. Elle est définie de la façon suivante :

$$W_{i+1} = W_i + Z_{i+1} - b \quad (3)$$

Dans l'équation (1), W_i est la statistique du test de Page pour l'échantillon i , Z_i est le signal filtré, élevé au carré et normalisé pour l'échantillon i , et b est le biais du test de Page, à l'initialisation $W_1 = 0$. Le choix de commencer, arrêter ou reporter la décision est fait en comparant la statistique du test de Page à un seuil.

4.3. Classification d'un clic

Les caractéristiques décrites dans la section 2 correspondent aux clics sur l'axe. Toutefois, les domaines de fréquence des clics sur l'axe et ceux hors de l'axe restent proches. De plus, la forme temporelle des clics de baleine à bec est assez typique (Jarvis *et al.*, 2008). L'article de Baumann-Pickering *et al.* (2013c) donne les caractéristiques de tous les clics (aussi bien sur l'axe que hors de l'axe) de douze espèces de baleines à bec, dont les trois espèces objet de cette étude.

Pour cette étude, la classification se fait par une série de règles exploitant principalement les caractéristiques fréquentielles de tous les clics. Par exemple, pour les mésoplodons de Blainville, la montée en fréquence du spectre aux alentours de 24 kHz est vraie pour tous les clics, elle est simplement moins drastique pour les clics qui ne sont pas sur l'axe. Pour les clics de mésoplodon de Gervais, la remontée du spectre aux alentours de 30 kHz est exploitée. Il est important que le système d'enregistrement ait une réponse la plus uniforme possible dans la bande de fréquence analysée, pour l'utilisation de ces règles.

4.4. Utilisation du pisteur pour associer les clics par animaux.

L'entrée du pisteur (« tracker ») est une série temporelle de clics qui ont été classifiés comme appartenant à une des espèces recherchées. Cette série comprend des sous-séquences qui proviennent d'un nombre inconnu d'animaux, ainsi que des fausses détections. Pour chaque sous-séquence provenant du même animal, nous faisons les hypothèses suivantes : l'amplitude (dB), l'ICI et le spectre varient lentement d'un clic au suivant. Pour l'amplitude et l'ICI, le modèle dynamique pour chaque sous-séquence est donc le suivant :

$$20 \log x_{k+1} = 20 \log x_k + w_k \quad (4)$$

$$(t_{k+1} - t_k) = (t_k - t_{k-1}) + v_k \quad (5)$$

x_k est l'amplitude du clic détecté au temps t_k ; w_k et v_k sont des termes de bruit de variance respectives $q_w(t_k - t_{k-1})$ et $q_v(t_k - t_{k-1})$. En effectuant le changement de variables suivant $X_k = 20 \log x_k$, l'équation (4) devient :

$$X_{k+1} = X_k + w_k \quad (6)$$

Ce modèle s'applique à l'amplitude du signal reçu, et néglige la différence de pertes de transmission entre deux clics consécutifs.

L'identification des paramètres du modèle q_w , q_v devrait être établie à partir de quelques enregistrements de bonne qualité d'une durée suffisante pour lequel un seul animal est présent. Nous ne possédons pas de tels jeux de données. Toutefois,

les valeurs ont été estimées sur quelques jeux de données de mésoplodons de Blainville afin que l'association soit possible. Ces mêmes valeurs ont été utilisées pour les trois espèces. Les valeurs utilisées sont données à titre indicatif $q_w = 35s^{-2}$, $q_v = 0.028$.

Jusqu'alors, le travail des auteurs sur le MHT s'était focalisé sur la surveillance en mer ou à terre ; plus de renseignements peuvent être trouvés dans les articles de Coraluppi et Carthel (2004 ; 2005). Dans ce travail, nous utilisons la même méthodologie d'association et la même logique de gestion des pistes en effectuant les modifications appropriées. Les erreurs de mesure d'amplitude et de temps d'arrivée sont négligées.

Le MHT traite la série temporelle de clics de façon séquentielle. A chaque étape, toutes les hypothèses de pistes provisoires sont mises à jour pour chaque clic. Au bout d'une certaine valeur de latence, appelée *nscan*, une seule hypothèse globale est retenue, et toutes les hypothèses de pistes qui ne sont pas en accord avec cette dernière sont supprimées. La sélection de l'hypothèse globale est basée sur la maximisation de la somme de tous les scores de chaque piste. Le score de chaque piste est le logarithme du rapport de vraisemblance qui inclut un terme de pénalité à l'initialisation d'une piste. La valeur de *nscan* utilisée dans les exemples des paragraphes suivants est de 10.

Les hypothèses sur chaque piste sont générées sur la base d'un critère de validation :

- chaque clic a toujours la possibilité d'initier une piste provisoire ;
- un clic sera associé à une piste existante si l'amplitude, l'ICI et le spectre correspondant sont suffisamment proches du précédent.

Pour les figures illustrant le MHT dans les paragraphes suivants, une nouvelle couleur est utilisée pour chaque piste. Cinq couleurs sont utilisées. Pour une piste donnée, la couleur est la même sur la figure de l'amplitude et sur celle de l'ICI.

5. Résultats obtenus sur les clics de mésoplodon de Blainville

Un exemple de résultats est donné pour un cas simple dans la section 5.1. Dans le paragraphe suivant, les résultats obtenus pour l'enregistrement DTAG sont présentés. Cet exemple est particulièrement intéressant car c'est le seul pour lequel le nombre d'animaux présents (trois) est connu. Ce jeu de données permet ainsi de comparer le nombre d'animaux estimé par notre méthode à la réalité. Le dernier exemple illustre les résultats obtenus sur des données CPAM enregistrées en Atlantique en présence de dauphins.

5.1. Résultats sur un fichier DCL

Dans l'exemple ci-dessous, un des fichiers du jeu de données d'entraînement du workshop DCL, pour lequel peu d'animaux sont présents (un ou deux maximum) est

utilisé. La première étape de classification n'est pas significative car seuls des clics de mésoplodons de Blainville sont enregistrés. Toutefois, il est intéressant de voir les résultats du tracker. La figure 4 donne l'amplitude des clics détectés par le détecteur de transitoires et des pistes des clics associés par le tracker ainsi que l'ICI correspondant aux clics associés. On peut voir que la majorité des clics sont associés, et que l'ICI obtenu est caractéristique d'un mésoplodon de Blainville.

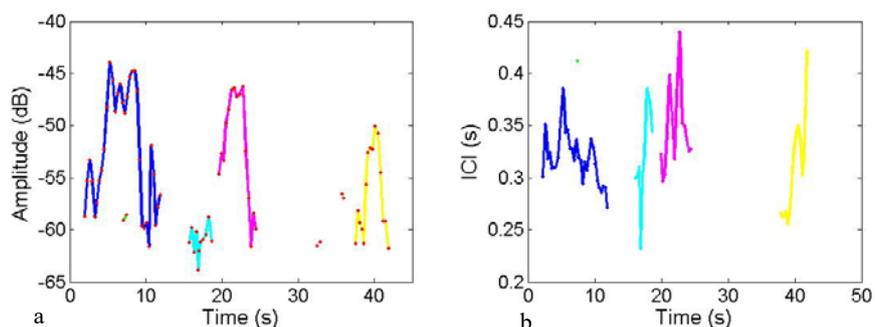


Figure 4. a) Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le tracker (autres couleurs) ; b) séquence d'ICI des pistes générées par le tracker

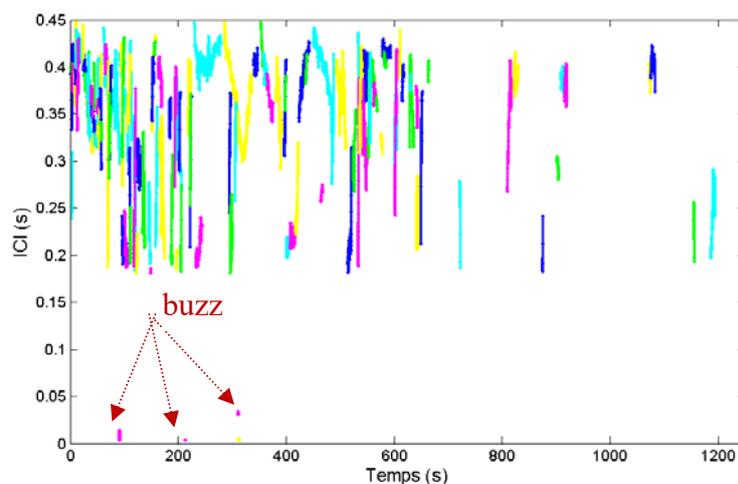


Figure 5. ICI des pistes générées par le tracker

5.2. Résultat sur le fichier DTAG

La figure 5 présente l'ICI des pistes générées par le MHT. Nous pouvons observer les pistes correspondant aux clics réguliers et dont l'ICI varie entre 0.2 s et

0.45 s, mais également de brèves pistes formées à trois moments distincts et dont l'ICI est très faible. Ces pistes correspondent à la présence de « buzz ». Plus de détails peuvent être trouvés dans les articles Gerard *et al.* (2008b ; 2008c). La figure 6 présente un zoom sur la piste générée sur le premier buzz de l'enregistrement (amplitude et ICI). Sur la figure 6a, on remarque une piste turquoise, qui croise la piste générée sur les clics de buzz (en magenta). Elle correspond à une piste générée sur des clics réguliers d'amplitude équivalente aux clics de buzz. Il est intéressant de noter que le tracker a réussi à générer deux pistes différentes.

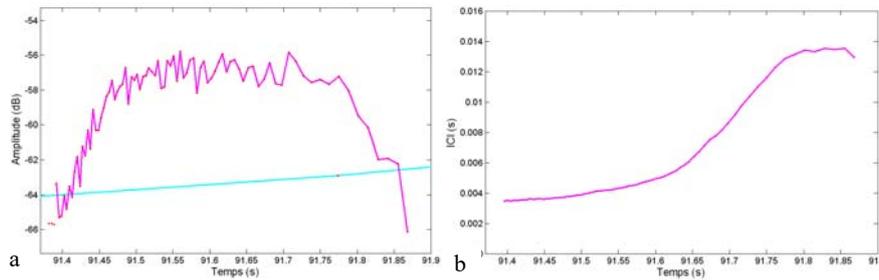


Figure 6. Amplitude (a) et ICI (b) de la piste obtenue par le MHT sur le premier buzz

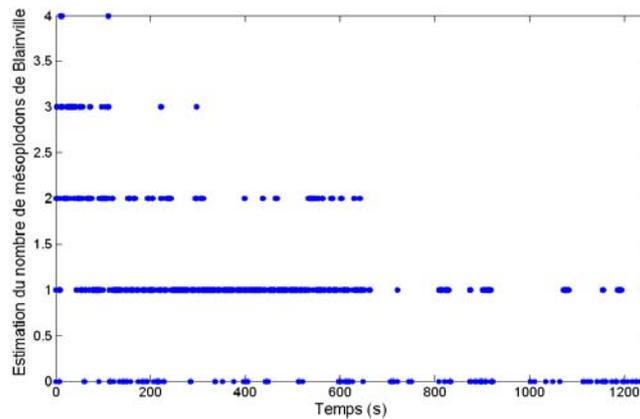


Figure 7. Estimation du nombre d'animaux en fonction du temps

La figure 7 présente le nombre d'animaux estimé en fonction du temps. Excepté deux courts instants où quatre animaux ont été détectés, nous voyons que trois animaux sont estimés présents au début du fichier, puis deux, puis un. Il est bien précisé dans le fichier d'annotation de cet enregistrement que la qualité des données diminue avec le temps. Ceci est certainement dû au fait que les animaux s'éloignent

du DTAG, et explique pourquoi le nombre de pistes co-existantes diminue avec le temps pour finalement arriver à 0. Pour un des deux courts instants où quatre animaux ont été estimés, une observation plus minutieuse des pistes permet de constater qu'une piste a été formée sur des échos. Effectivement, quand deux pistes qui ont le même ICI à chaque instant coexistent, cela doit correspondre à la présence d'un écho. Car la probabilité que deux animaux émettent des clics exactement au même rythme en même temps paraît très faible. Pour le deuxième cas, il est probable qu'il y ait une erreur d'association à cet instant-là.

5.3. Exemple sur un fichier CPAM enregistré en présence de dauphins

Ce fichier a été enregistré lors de la campagne Sirena 2010 en Atlantique. Dans cet exemple des clics ont été classifiés par notre méthode comme provenant de mésoplodons de Blainville parmi de nombreux clics de dauphins.

La figure 8a donne l'amplitude des clics détectés par le détecteur de transitoires (en noir les clics non classifiés dans la première étape et en rouge les clics classifiés comme provenant de mésoplodon de Blainville). Sur cette figure, on peut observer aussi les pistes correspondant aux clics de mésoplodons de Blainville associés par le tracker. La figure 8b donne l'ICI correspondant aux clics associés par le tracker.

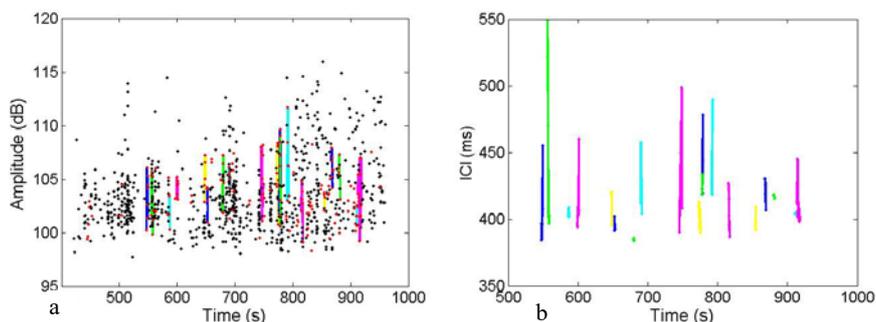


Figure 8. a) Amplitude des clics détectés (noir pour ceux non classifiés et rouge pour ceux classifiés comme provenant de mésoplodon de Blainville) et des pistes générées par le tracker (autres couleurs) ;
b) séquence d'ICI des pistes générées par le tracker

Pour s'assurer que les clics associés par le tracker provenaient de mésoplodon de Blainville, le signal temporel, le spectre et le spectrogramme des clics ont été contrôlés. La figure 9 en donne un exemple pour un clic. On peut constater que ces trois courbes ont la forme typique attendue d'un clic de mésoplodon de Blainville.

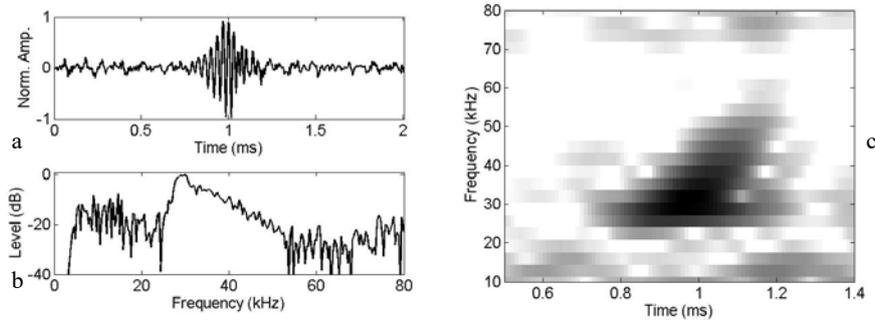


Figure 9. a) signal temporel d'un clic classifié comme provenant de mésoplodon de Blainville ; b) spectre de ce même clic ; c) spectrogramme de ce même clic

5.4. Conclusions

Lors du workshop de DCL, tous les fichiers test comportant des clics de mésoplodons de Blainville ont été identifiés par cette méthode. L'enregistrement DTAG montre que le tracker a associé les clics réguliers, même en présence de clics de buzz, et que l'estimation du nombre d'animaux proposé par notre méthode est proche de la réalité. Enfin, dans le dernier exemple, les clics de mésoplodon de Blainville ont été détectés même en présence de clics de dauphins. Ces résultats sont donc extrêmement encourageants.

6. Résultats obtenus sur les clics de baleines à bec de Cuvier

Lors d'un précédent travail présenté au workshop Serenade 2010, les résultats obtenus sur les baleines à bec de Cuvier étaient décevants. L'enregistrement en notre possession à cette époque n'était pas de qualité optimum, car l'hydrophone utilisé avait une fréquence de résonance dans la partie utile du spectre. La classification était rendue particulièrement difficile. Même sur des enregistrements comportant seulement des clics de baleines à bec de Cuvier, l'association des clics par animaux n'était pas satisfaisante. Les enregistrements de la campagne Sirena 2011, qui s'est déroulée en Méditerranée, nous a permis de tester cette méthode sur des signaux de meilleure qualité.

6.1. Exemple sur un enregistrement CPAM

Les résultats de ce paragraphe concernent un enregistrement où seules des baleines à bec de Cuvier sont présentes. La figure 10a donne l'amplitude des clics détectés par le détecteur de transitoires ainsi que les pistes des clics associés par le MHT. La figure 10b donne l'ICI correspondant aux clics qui ont été associés. On constate que de nombreux clics sont associés et que l'ICI obtenu est cohérent avec celui d'une baleine à bec de Cuvier.

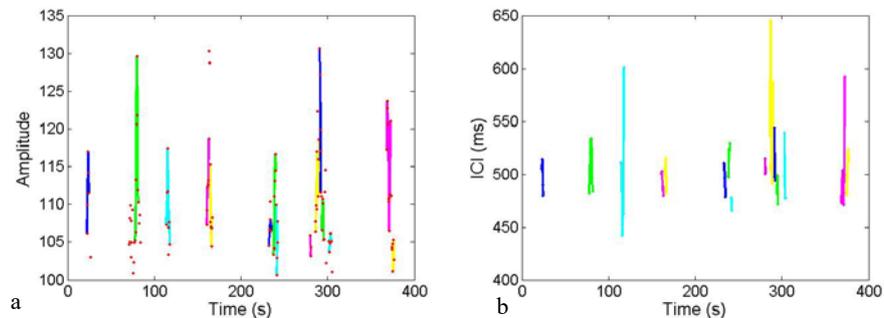


Figure 10. a) Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le tracker (autres couleurs) ; b) séquence d'ICI des pistes générées par le tracker

6.2. Exemple sur un enregistrement CPAM en présence de dauphins

Dans cet exemple, parmi de nombreux clics de dauphins, des clics ont été classifiés par notre méthode comme provenant de baleines à bec de Cuvier.

La figure 11a donne l'amplitude des clics détectés par le détecteur de transitoires (en noir les clics non identifiés comme appartenant à des baleines à bec et en rouge les clics classifiés comme provenant de baleines à bec de Cuvier). Sur cette figure on peut observer aussi les pistes correspondant aux clics de baleines à bec de Cuvier associés par le tracker. La figure 11b donne l'ICI correspondant aux clics associés. L'ICI obtenu est caractéristique de celui de baleines à bec de Cuvier.

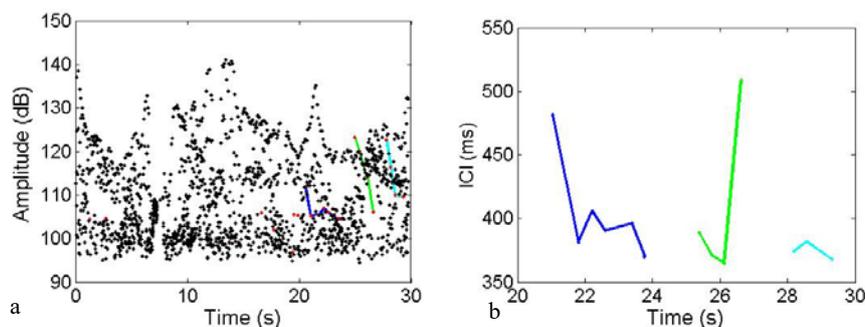


Figure 11. a) Amplitude des clics détectés (noir pour ceux non classifiés et rouge pour ceux classifiés comme provenant de baleine à bec de Cuvier) et des pistes générées par le tracker (autres couleurs) ; b) séquence d'ICI des pistes générées par le tracker

Pour s'assurer que les clics associés par le tracker provenaient de baleine à bec de Cuvier, le signal temporel, le spectre et le spectrogramme des clics ont été contrôlés. Et nous avons pu constater que ces clics avaient bien les caractéristiques de baleines à bec de Cuvier. La figure 12 en donne un exemple. A titre de comparaison, la figure 13 donne le signal temporel, le spectre et le spectrogramme d'un clic de dauphin, qui n'a pas été classifié par notre méthode comme provenant de baleine à bec ; on peut remarquer les différences avec les courbes de la figure 12. Cette méthode a donc réussi à détecter les clics de baleines à bec de Cuvier parmi tous les clics de dauphins. Et dans ce cas, la densité des clics de dauphins était très importante.

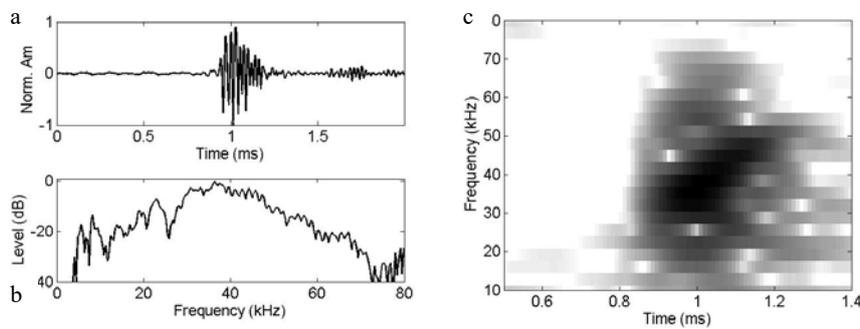


Figure 12. a) signal temporel d'un clic classifié comme provenant de baleine à bec de Cuvier ; b) spectre de ce même clic ; c) spectrogramme de ce même clic

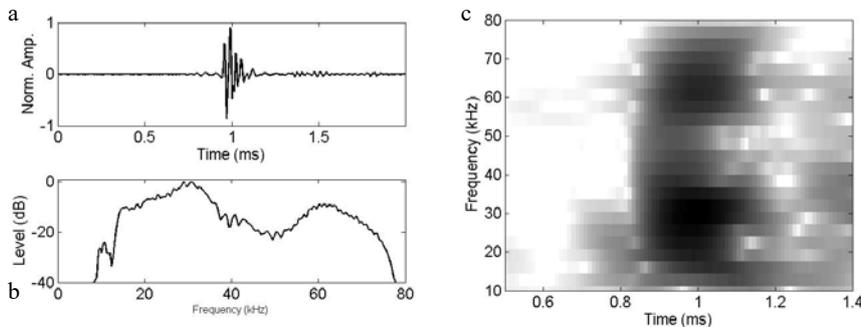


Figure 13. a) signal temporel d'un clic de dauphin ; b) spectre de ce même clic ; c) spectrogramme de ce même clic

6.3. Conclusions

L'exemple du § 6.1 montre que cette méthode associe des clics d'un train de clics de façon satisfaisante. L'exemple du § 6.2 montre que même en présence de

nombreux clics de dauphins, des clics de baleines à bec de Cuvier sont détectés et associés.

7. Résultats obtenus sur les clics de mésoplodon de Gervais

Dans les enregistrements décrits en section 3, il y a relativement peu de données provenant de cette espèce, et il n'y a pas d'enregistrement en présence d'autres espèces. Toutefois, nous avons voulu tester le tracker sur ces données, enregistrées en Atlantique par le CPAM, pour voir si l'association des clics donne des résultats plausibles.

La figure 14a donne l'amplitude des clics obtenus par le détecteur de transitoires, ainsi que les pistes obtenues par les clics associés par le tracker. La figure 14b donne l'ICI des pistes obtenues par le tracker. L'association des clics obtenue par le tracker semble raisonnable, l'ICI correspond bien à celui des mésoplodons de Gervais. Ces résultats sont donc prometteurs.

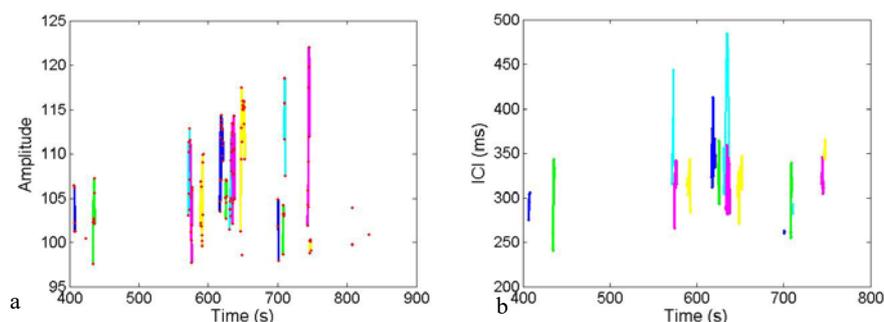


Figure 14. a) Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le tracker (autres couleurs) ; b) séquence d'ICI des pistes générées par le tracker

8. Conclusions et perspectives

Les baleines à bec font partie des espèces les plus sensibles au bruit anthropique. Ce sont les espèces les plus représentées lors des échouages qui ont eu lieu en coïncidence avec les essais sonar. Elles faisaient partie des espèces les moins connues, mais grâce aux efforts de recherche de ces quinze dernières années, les signaux de plusieurs espèces sont maintenant connus. La majorité de ces espèces sont aussi très difficiles à observer. Ces raisons font qu'il est particulièrement intéressant de les détecter de façon automatique par acoustique passive.

Dans cet article, nous proposons une méthode de reconnaissance automatique de clics de baleines à bec. Elle se décompose en trois étapes : la détection de transitoires, la classification d'un clic individuel, et enfin l'association de clics en trains de clics, grâce à un tracker. L'originalité de cette méthode est l'association en

trains de clics. Ceci permet de renforcer la classification pour les raisons suivantes : un clic n'est pas émis seul, et les trains de clics ont des caractéristiques qui peuvent être typiques de l'espèce (l'ICI par exemple). De plus, le nombre de pistes qui co-existent, donne une estimation du nombre d'animaux émettant des clics simultanément. Cette estimation est valable seulement quand les animaux ne sont pas trop nombreux.

Cette méthode a été testée sur trois espèces de baleines à bec : mésoplodon de Blainville, baleine à bec de Cuvier et mésoplodon de Gervais. Pour la première espèce, la méthode a été testée en présence de clics de buzz et en présence de clics dauphins. Pour la deuxième espèce, elle a été testée en présence de clics de dauphins. Dans tous les cas, la méthode a réussi à associer des clics de baleines à bec en trains de clics ayant un ICI correspondant à l'espèce considérée. Pour un jeu de données de mésoplodons de Blainville, le nombre d'animaux présents était connu et l'estimation obtenue par cette méthode est proche de la réalité.

Lors du workshop DCL de 2007, cette méthode a permis de détecter la présence de baleines à bec dans tous les fichiers pour lesquels des signaux de baleines à bec étaient présents. Elle a même détecté quelques clics de baleines à bec présents au milieu de nombreux clics de dauphins, alors qu'ils n'avaient pas été détectés lors de l'étiquetage des données. Une analyse fine a permis de confirmer qu'ils provenaient de baleines à bec. Elle n'a pas détecté de baleines à bec dans les fichiers n'en contenant pas. Ces résultats sont très satisfaisants. Toutefois, les clics de dauphins présentent une grande diversité. Certaines espèces émettent des clics dont les propriétés peuvent être très différentes en fonction de l'environnement dans lequel l'animal se trouve (Au et Hastings, 2008). De plus il existe une très grande variété d'espèces, et certains clics sont plus proches de clics de baleines à bec que d'autres. Les performances dépendront donc des données sur lesquelles la méthode est testée.

Les parties détection et classification d'un clic individuel ont été développées sous MATLAB (Mathworks, Natick, MA). La vitesse d'exécution de la partie détection dépend de la fréquence d'échantillonnage et du nombre de clics détectés. La programmation n'a pas été optimisée pour une vitesse d'exécution rapide, en particulier, le programme fonctionne en monoprocesseur. À titre indicatif, pour une fréquence d'échantillonnage de 96 kHz, le temps réel est tenu sauf quand des bancs de dauphins sont présents. Dans un but d'utilisation sur des grands jeux de données cette partie devrait être optimisée. Les deux parties de classification sont beaucoup plus rapides que le temps réel.

Les futurs efforts seront portés sur les deux étapes de classification : reconnaissance du clic individuel et amélioration des paramètres du tracker au fur et à mesure de l'acquisition de nouveaux jeux de données. Cette méthode sera améliorée façon continue sur les nouveaux jeux de données disponibles et sur de nouvelles espèces de baleines à bec.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette étude. Nous remercions toutes les personnes

impliquées dans la collecte, la préparation et la distribution des données, entre autres : Naval Undersea Warfare Center (NUWC), Division Newport ; Oregon University (à travers le site internet MobySound) ; Mark Johnson. Un grand merci au CMRE, à tous les participants des campagnes Sirena et à l'équipage de l'Alliance, ainsi qu'à Simone Baumann-Pickering, pour les discussions fructueuses sur la reconnaissance des clics de baleines à bec de la campagne Sirena 2010.

Bibliographie

- Abraham D.A., Willett P. (2002). Active Sonar Detection in Shallow Water Using the Page Test, *IEEE Journal of Oceanic Eng.*, 27 (1).
- André M., Kamminga C. (2000). Rhythmic Dimension in the Echolocation Click Trains of Sperm whales: A possible Function of Identification and Communication, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 80 (1), 163-16.
- Au W.L. (1993). *The Sonar of Dolphins*, New York, NY, Springer.
- Au W.L. and Hastings M.C. (2008). *Principles of Marine Bioacoustics*, Springer.
- Baird R.W., Webster D.L., McSweeney D.J., Ligon A.D., Schorr G.S., Barlow J. (2006). Diving Behaviour of Cuvier's (*Ziphius cavirostris*) and Blainville's (*Mesoplodon densirostris*) Beaked Whales in Hawaii, *Canadian Journal of Zoology*, 84, 1120-1128.
- Balcomb K.C.I., Claridge D.E. (2001). A Mass Stranding of Cetaceans Caused by Naval Sonar in the Bahamas, *Bahamas Journal of science*, 2, 2-12.
- Baumann-Pickering S., Wiggins S.M., Roth E., Roch M.A., Schnitzler H., Hildebrand J.A. (2010). Echolocation Signals of a Beaked Whale at Palmyra Atoll, *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(6), 3790-3799.
- Baumann-Pickering S., Simonis A.E., Wiggins S.M., Brownell R.L., Hildebrand J.A. (2013a). Aleutian Islands Beaked Whale Echolocation Signals, *Marine Mammal Science*, 29, 221-227.
- Baumann-Pickering S., Yack T., Barlow J., Wiggins S.M. Hildebrand J.A. (2013b). Baird's Beaked Whale Echolocation Signals, *Journal of the Acoustical Society of America*, 133(6), 4321-4331.
- Baumann-Pickering S., McDonald M.A., Simonis A.E., Solsona Berga A., Merkens K.P.B., Oleson E.M., Roch M.A., Wiggins S.M., Rankin S., Yack T.M., Hildebrand J.A. (2013c). Species-specific Beaked Whale Echolocation Signals, *Journal of the Acoustical Society of America*, 134 (3), 2293-2301.
- Cholewiak D., Baumann-Pickering S., Van Parijs S. (2013). Description of Sounds Associated with Sowerby's Beaked Whales (*Mesoplodon bidens*) in the Western North Atlantic Ocean, *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5), 3905-3912.
- Coraluppi S., Carthel C. (2004). Recursive Track Fusion for Multi-Sensor Surveillance, *Information Fusion*, 5(1).
- Coraluppi S., Carthel C. (2005). Distributed Tracking in Multistatic Sonar, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 41(3).

- Cox T. M., Ragen T. J., Read A. J., Vos E., Baird R. W., Balcomb K., Barlow J., Caldwell J., Cranford T., Crum L., D'Amico A., D'Spain G., Fernandez A., Finneran J., Gentry R., Gerth W., Gulland F., Hildebrand J., Houser D., Hullar T., Jepson P. D., Ketten D., MacLeod C.D., Miller P., Moore S., Mountain D. C., Palka D., Ponganis P., Rommel S., Rowles T., Taylor B., Tyack P., Wartzok D., Gisiner R., Mead J., and Benner L., (2006). Understanding the Impacts of Anthropogenic Sound on Beaked Whales, *Journal of Cetacean Research Management*, 7, 177-187.
- D'Amico A., Gisiner R.C., Ketten D.R., Hammock J.A., Johnson C., Tyack P.L. Mead J. (2009). Beaked Whale Strandings and Naval Exercises, *Aquatic Mammals*, 35(4), 452-472.
- Frantzis A. (1998). Does Acoustic Testing Strand Whales? *Nature* 392, 29.
- Gerard O., Carthel C., Coraluppi S., Willett P. (2008a). Feature Aided Tracking for Marine Mammal Detection and Classification, *Canadian Acoustics*, 36(1), 13-19.
- Gerard O., Coraluppi S., Carthel C. (2008b). Analysis and Classification of Beaked Whale Buzz Clicks, *Proceedings of Passive 08*, Hyères, France.
- Gerard O., Carthel C., Coraluppi S. (2008c). Estimating the Number of Beaked using an MHT Tracker, *Proceedings of Passive 08*, Hyères, France.
- Gillespie D., Caillat M. (2008). Statistical Classification of Odontocete Clicks, *Canadian Acoustics*, 36(1), 20-26.
- Gillespie D., Dunn C., Gordon J., Claridge D., Embling C., Boyd I. (2009). Field Recordings of Gervais' Beaked Whales *Mesoplodon europaeus* from the Bahamas, *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(5), 3428-3433.
- Grandi V., Guerrini P., Biagini S., Osse T.J., Zimmer W.M.X. (2010). The Compact Acoustic Monitor; a tool for Marine Mammal Risk Mitigation, *In Proceedings of Oceans 2010*, Seattle, USA.
- Harland E. (2008). Processing the Workshop, using the Trud Algorithm, *Canadian Acoustics*, 36(1), 27-33.
- Hughes D.T., Sildam J., B-Nagy A., Ryan K., Haunn J. (2010). Passive Acoustic Monitoring during the SIRENA 10 Cetacean Survey, *In Proceedings of Oceans 2010*, Seattle, USA.
- Jarvis S., DiMarzio N., Morissey R., Moretti D. (2008). A Novel Multi-Class Support Vector Machine Classifier for Automated Classification of Beaked Whales and Other Small Odontocete, *Canadian Acoustics*, 36(1), 34-40.
- Johnson M.P., Tyack P.L. (2003). A Digital Acoustic Recording Tag for Measuring the Response of Wild Marine Mammals to Sound, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28, 3-12.
- Johnson M.P., Madsen P.T., Zimmer W.M.X., Aguilar de Soto N.A., Tyack P.L. (2004). Beaked Whales Echolocate on Prey, *Proceedings of the Royal Society London, B (sup)*, 271: S383-S386.
- Johnson M.P., Madsen P.T., Zimmer W.M.X., Aguilar de Soto N.A., Tyack P.L. (2006). Foraging Blainville's Beaked Whales Produce Distinct Click Types Matched to Different Phases of Echolocation, *Journal of Experimental Biology*, 209 (24), 5038-5050.

- Madsen P.T., Johnson M.P., Aguilar de Soto N.A., Zimmer W.M.X., Tyack P.L. (2005). Biosonar Performance of Foraging Beaked Whales (*Mesoplodon densirostris*), *Journal of Experimental Biology*, 208, 181-194.
- Mellinger D.K. (2008). Neural Network for Classifying Clicks of Blainville's Beaked Whale (*Mesoplodon densirostris*), *Canadian Acoustics*, 36(1); 41-47.
- Moretti D., DiMarzio N., Morissey R., Mellinger D.K., Heimlich S., Pettis H. (2008). Overview of the 3rd International Workshop on the Detection and Classification of Marine Mammals Using Passive Acoustics, *Canadian Acoustics*, 36(1), 7-11.
- Page S.E. (1954). Continuous Inspection Schemes. *Biometrika*, 41, 100-115.
- Rankin S., Baumann-Pickering S., Yack T., Barlow J. (2011). Description of Sounds Recorded from Longman's beaked whale, *Indopacetus pacificus*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5), EL339–EL344.
- Roch M.A., Soldevilla M.S., Hoenigman R., Wiggins S.M., Hildebrand A. (2008). Comparison of Machine Learning Techniques from Three Species of Odontocetes, *Canadian Acoustics*, 36(1), 41-47.
- Schorr G.S., Falcone E.A., Moretti D.J., Andrews R.D. (2014). First long-term behavioral records from Cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*) reveal record-breaking dives, *PLoS ONE*, 9(3): e92633.
- Tyack P.L., Johnson M.P., Aguilar de Soto N.A., Sturlese A., Madsen P.T. (2006). Extreme Diving of Beaked Whales (*Mesoplodon densirostris*), *Journal of Experimental Biology*, 209, 4238-4253.
- Wahlberg M., Beedholm K., Heerfordt A., Mohl B. (2011). Characteristics of biosonar signals from the northern bottlenose whale, *Hyperoodon ampullatus*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5), 3077–3084.
- Wald A. (1947). *Sequential Analysis*, Wiley, New York.
- Yack T. M., Barlow J., Roch M. A., Klinck H., Martin S., Mellinger D. K., Gillespie D. (2010). Comparison of Beaked Whale Detection Algorithms, *Applied Acoustics*, 71(11), 1043-1049.
- Zimmer W.M.X., Johnson M.P., Madsen P.T., Tyack P.L. (2005). Echolocation Clicks of Free-Ranging Cuvier's Beaked Whales (*Ziphius cavirostris*), *Journal of the Acoustical Society of America*, 117(6), 3919-3927.
- Zimmer W.M.X., Harwood J., Tyack P.L., Johnson M.P., Madsen P.T. (2008). Passive Acoustic Detection of Deep-Diving Beaked Whales, *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 2823-2832.

Article soumis le 13/05/2015

Accepté le 28/12/2015