

# DÉTECTION DES CLICS DE BALEINES À BEC

par Odile Gérard (1)\*, Craig Carthel (2) et Stefano Coraluppi (2)

## RÉSUMÉ

Cet article décrit des algorithmes de détection et de classification de clics de baleines à bec. Un détecteur de transitoires, basé sur le test de Page, est utilisé pour détecter des clics. La classification, en deux étapes, se fait d'abord sur chaque clic puis sur l'intervalle inter-clics, paramètre caractéristique des clics de baleines à bec. Dans cette seconde étape, l'association des clics au cours du temps est faite par l'intermédiaire d'un algorithme de pistage qui repose sur une hypothèse de variation lente des amplitudes et de l'intervalle entre clics. Les résultats de la méthode sur des enregistrements de mammifères marins sont présentés. Les résultats sur les enregistrements de baleines à bec de Blainville sont très prometteurs. Par contre, des développements complémentaires concernant les baleines à bec de Cuvier sont encore nécessaires.

## ABSTRACT

*This article describes algorithms for the detection and classification of beaked whale clicks. A transient detector based on the Page test is used to detect clicks. The classification is done in two stages, the first one on the individual click, the second one on the Inter-Click Intervals (ICI) which are typical for beaked whale. For this second stage, clicks are associated using a feature-aided multi-hypothesis tracking algorithm. The association is based on the assumptions of slowly-varying click amplitudes and inter-click intervals. The article includes a description of the method as well as experimental results and recent enhancements. The results on the Blainville's beaked whale clicks are promising. Cuvier's beaked whale clicks are more challenging. In addition we found out that the recordings used for this study have some technical problems; thus, further work is required, on a dataset of better quality.*

(1) DGA Techniques Navales, avenue de la Tour Royale, BP 40915, 83050 Toulon Cedex, France  
E-mail: odile.gerard@dga.defense.gouv.fr,

(2) NATO Undersea Research Centre, Viale S. Bartolomeo 400, 19126 La Spezia, Italy

\* Ce travail a été réalisé lorsque l'auteur était au NATO Undersea Research Centre



## 1. INTRODUCTION

A plusieurs reprises, lors d'exercices SONAR, des mammifères marins et tout particulièrement des baleines à bec, ont été retrouvés échoués [1-3]. Il est donc souhaitable d'éviter de faire des exercices d'entraînement SONAR en leur présence, ce qui pose le problème de leur détection. L'ouïe est leur sens privilégié, et ils émettent régulièrement différentes sortes de sons. L'écoute passive est donc un bon moyen de pouvoir détecter leur présence. Les émissions des cétacés à fanons sont généralement des chants. Les émissions des cétacés à dents se divisent en trois grandes catégories : sifflements, cris pulsés et clics. Notre attention se focalisera en premier lieu sur les baleines à bec car elles sont très nettement les plus sensibles. Trois espèces de baleines à bec peuvent être trouvées au large des côtes françaises : la baleine de Cuvier (*Ziphius cavirostris*), le mésoplodon de Blainville (*Mesoplodon densirostris*) et le mésoplodon de Sowerby (*Mesoplodon bidens*). La première espèce se trouve aussi bien en Méditerranée qu'en Atlantique et les deux espèces de mésoplodon ne se trouvent que dans l'Atlantique. Les sons émis par les mésoplodons de Sowerby sont peu connus à ce jour, et nous n'en n'avons pas à notre disposition. Dans cet article nous nous intéressons donc aux baleines de Cuvier et aux mésoplodons de Blainville. Le paragraphe 2 présente les sons émis par les espèces étudiées, le paragraphe 3 présente les enregistrements utilisés pour cette étude. Le paragraphe 4 donne une présentation de la méthode. Le paragraphe 5 donne les résultats obtenus sur les enregistrements de mésoplodons de Blainville et les propriétés intéressantes découvertes pour les clics de "buzz". Dans le paragraphe 6, une ébauche de résultats est donnée pour les baleines de Cuvier, et les difficultés rencontrées pour cette espèce sont exposées. Les conclusions et perspectives sont données dans le paragraphe 7.

## 2. SONS ÉMIS PAR LES ESPÈCES ÉTUDIÉES

Les baleines à bec passent la majorité de leur temps sous l'eau, ce qui les rend difficiles à observer. De plus, quand elles sont à la surface, leur souffle est inexistant ou très faible (cela dépend des conditions météorologiques), elles sont plus timides que les dauphins et vont rarement à la rencontre des bateaux. Elles font partie des espèces qui atteignent les plus grandes profondeurs, elles plongent couramment à plus de 1 000 m pour se nourrir pour une durée qui atteint facilement 45 min ; elles commencent à cliquer dès qu'elles ont atteint une certaine profondeur (à partir de 200 m) [4-5]. Quand elles ne se nourrissent pas, elles passent quand même la majorité de leur temps à une profondeur intermédiaire et sont quasiment silencieuses [4].

Pour trouver leur nourriture, les cétacés à dents émettent des clics (appelés clics d'écholocalisation). Certaines espèces, dont notamment les baleines à bec, sont connues pour émettre ces clics de façon régulière. Le temps qui sépare deux clics est appelé ICI (Inter-Click Interval). Une séquence de clics réguliers peut être suivie d'une pause ou d'une séquence de clics dont le rythme est très accéléré, appelé

"buzz", correspondant au moment de capture de la proie. La période d'écholocalisation 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 [6]. La directivité des clics d'animaux captifs est donnée dans [6]. Les animaux ont un axe d'émission privilégié suivant lequel les signaux émis ont un niveau maximal. Il peut exister une forte variabilité des signaux en fonction de l'axe d'émission. En plus d'une grande différence d'amplitude, il existe aussi une grande différence sur les formes temporelle et fréquentielle des clics, qui peuvent subir des réflexions à l'intérieur du crane et, en conséquence, entraîner des creux et des pics dans le spectre d'émission [6].

Les baleines à bec étudiées sont connues pour n'émettre que des clics [7-9] bien que cette affirmation soit contestée [10], un sifflement et trois cris pulsés ayant été enregistrés en présence de mésoplodons de Blainville. La détection et la classification acoustique de ces clics sont très utiles pour détecter ces espèces de baleines à bec, même si leur portée est relativement réduite car les clics sont de haute fréquence (le maximum de leur énergie est au-dessus de 25 kHz) et très directifs [7-9]. Leur portée a été estimée à une distance de 4 kilomètres dans les meilleures conditions [11].

### 2.1 Mésoplodons de Blainville

Ils sont connus pour émettre des clics différents selon la phase d'écholocalisation : recherche ou capture de la proie [12]. Les clics correspondant à la phase de recherche sont appelés clics réguliers et ceux correspondant à la phase de capture sont appelés clics de "buzz".

Les clics réguliers ont un ICI compris entre 0,2 s et 0,4 s et sont connus pour avoir les caractéristiques suivantes [8-9, 12] :

- maximum d'énergie entre 25 et 50 kHz,
- modulation de fréquence ascendante,
- durée d'environ 270  $\mu$ s.

Ils ont un niveau sonore de l'ordre de 200-220 dB réf. 1  $\mu$ Pa à 1 m [8].

Les clics de "buzz" sont connus pour avoir les caractéristiques suivantes [12] :

- maximum d'énergie entre 25 et 80 kHz,
- durée d'environ 100  $\mu$ s.

Nous avons observé un ICI qui pouvait atteindre une valeur de 3 ms dans les enregistrements utilisés et décrits dans le paragraphe suivant.

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

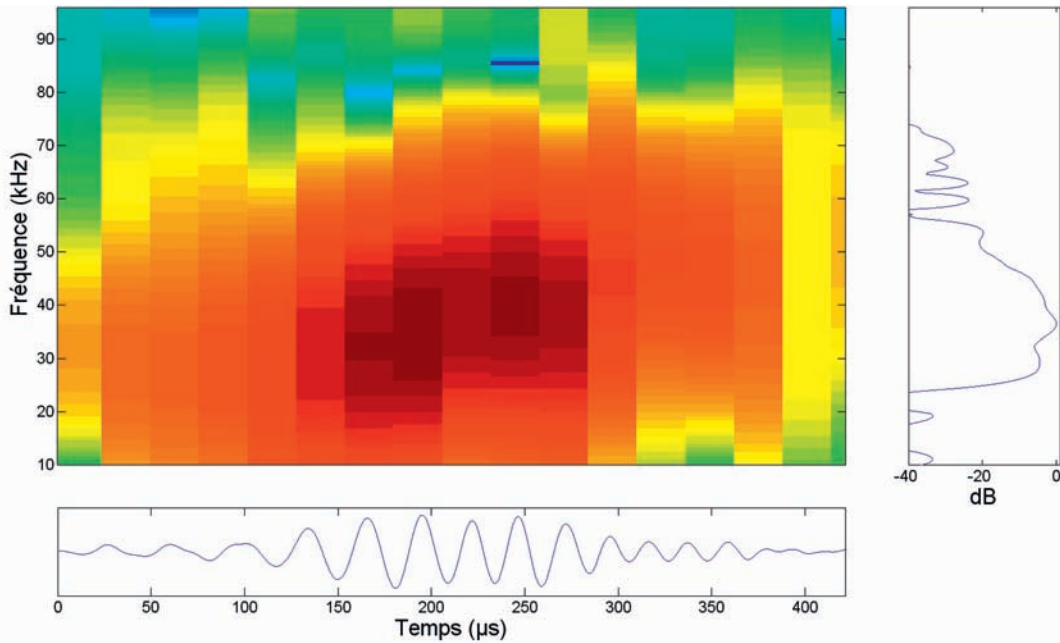


Figure 1 : Spectrogramme, spectre normalisé (sur la droite), et forme temporelle (en bas) d'un clic de mésoplodon de Blainville sur l'axe.

## 2.2 Baleines de Cuvier

Pour cette espèce, les clics sur l'axe ont une durée d'environ  $200 \mu\text{s}$ , ils sont modulés en fréquence (FM montante) avec une fréquence centrale aux alentours de 42 kHz, et une largeur de bande de 22 kHz à -10 dB. L'ICI typique est de 0,4 s [7]. Les clics sont très directionnels. Ils ont un indice de directivité estimé à 25 dB, le niveau sonore atteint 214 dB réf.  $1 \mu\text{Pa}$  à 1 m [7]. Une estimation de la directivité peut être trouvée dans [7, 11]. La figure 2 donne le spectrogramme, le spectre et la forme temporelle d'un clic provenant des enregistrements décrits dans le paragraphe suivant.

## 3. ENREGISTREMENTS UTILISÉS

### 3.1 Mésoplodons de Blainville

Deux jeux de données ont été utilisés : l'un enregistré aux Bahamas, l'autre enregistré aux Canaries. Ces derniers se trouvent sur le site internet de Mobysound [13], maintenu par le CIMRS (Cooperative Institute for Marine Research Studies - Oregon State University, U.S.A).

#### Enregistrement des Bahamas

Le premier jeu de données a été enregistré à AUTECH (Atlantic Undersea Test and Evaluation Center) situé aux

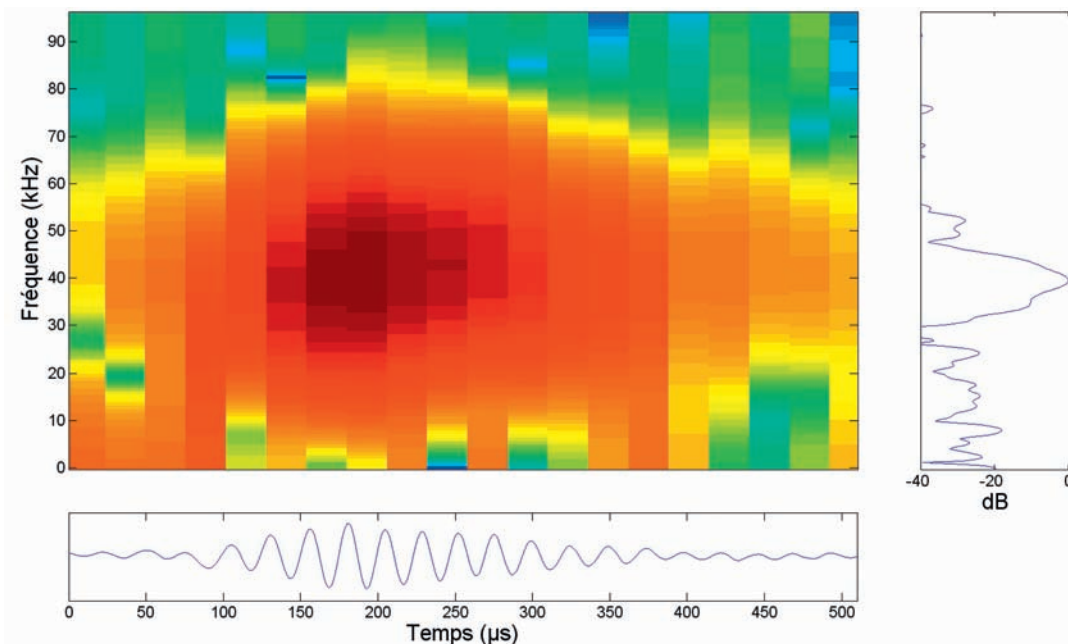


Figure 2 : Spectrogramme, spectre normalisé (sur la droite), et forme temporelle (en bas) d'un clic de baleine de Cuvier sur l'axe.

Bahamas, et a été mis à disposition par les organisateurs du *3<sup>rd</sup> International Workshop on the Detection and Classification of Marine Mammals using Passive Acoustics* (Boston, Juillet 2007) [14]. AUTECH possède un polygone de mesures où des hydrophones sont montés sur le fond. Ce polygone est localisé dans un canyon profond de l'île d'Andros aux Bahamas. La largeur de bande des hydrophones est de 50 Hz à 45 kHz ou de 8 à 50 kHz selon les hydrophones [14]. La fréquence d'échantillonnage est de 96 kHz. Un jeu de données d'entraînement et un jeu de données de test a été fourni. Le jeu de données d'entraînement contient seize échantillons d'enregistrement de mésoplodons de Blainville variant de 0,5 à 3 minutes, des enregistrements de dauphins de Risso (*Grampus griseus*) et de globicéphales tropicaux (*Globicephala macrorhynchus*). Le jeu de données de test comprend neuf enregistrements de 10 minutes. Dans trois de ces neuf fichiers, des clics de mésoplodons de Blainville sont présents et dans deux autres de ces fichiers une autre espèce est présente : globicéphale d'une part et cachalot (*Physeter macrocephalus*) d'autre part. Les autres fichiers tests comprennent en plus des espèces correspondant aux fichiers d'entraînement des clics de cachalots et des clics de dauphins tachetés du Pacifique (*Stenella attenuata (dubia)*).

#### Enregistrement des Canaries

Ce second jeu de données a été enregistré par un DTag (Digital Tag) [15] flottant entre deux eaux à l'île El Hierro, aux Canaries et 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 certainement dû au fait que la distance entre le DTag et les animaux augmente. Trois animaux étaient présents lors de cet enregistrement.

### **3.2 Baleines de Cuvier**

Nous nous sommes aperçus après analyse que les signaux de baleines de Cuvier en notre possession ont été enregistrés par une antenne présentant une sensibilité accrue aux alentours de 40 kHz, ce qui a pour effet de modifier la forme spectrale et temporelle des signaux. L'étude sera donc à refaire avec des enregistrements de meilleure qualité. Toutefois, malgré la qualité des signaux, il nous a semblé intéressant de présenter brièvement certains résultats et d'exposer les difficultés rencontrées. La fréquence d'échantillonnage de ces signaux est de 192 kHz.

## **4. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE**

La méthode est basée sur celle décrite en [16]. Un détecteur de transitoires reposant sur le test de Page [17-19] 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 deux espèces d'intérêt. Un MHT (Multi-Hypothesis Tracker) est utilisé pour associer les clics par animaux. L'association est basée sur l'hypothèse que l'amplitude et l'ICI entre les clics consécutifs varient peu. L'association par

animal permet en premier lieu de calculer l'ICI d'une séquence associée à un animal. En cas de présence de plusieurs animaux, il est difficile d'estimer l'ICI, or ce paramètre est caractéristique de ces espèces et il est un critère de classification essentiel. La classification est donc faite en deux étapes : la première basée sur une classification individuelle du clic, la deuxième basée sur une association de plusieurs clics provenant d'un même animal et ayant un ICI cohérent avec l'espèce classifiée. De plus l'association des clics par animal permet de donner une estimation du nombre d'animaux présents. Comme un animal peut s'arrêter de cliquer ou encore plus probablement l'enregistrement des clics est interrompu à cause de la directivité de ces derniers, pour un animal donné la piste n'est pas continue mais fragmentée, et comme 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 clics et enregistrés en même temps.

### **4.1 Détecteur de transitoires**

L'idéal pour le détecteur de transitoires est de pouvoir détecter les clics de différentes espèces, et donc d'un signal non connu.

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 par moyennage exponentiel. Le test de Page est un détecteur séquentiel [20] qui permet de fournir de la robustesse pour des signaux dont la durée n'est pas connue 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 ;
- report de 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 et est définie de la façon suivante :

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

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 pour l'initialisation ou l'arrêt d'une détection, avec  $W_1 = 0$ . Le choix de commencer, arrêter ou reporter la décision est fait en comparant la statistique du test de Page à un seuil.

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.

L'algorithme est résumé figure 3.

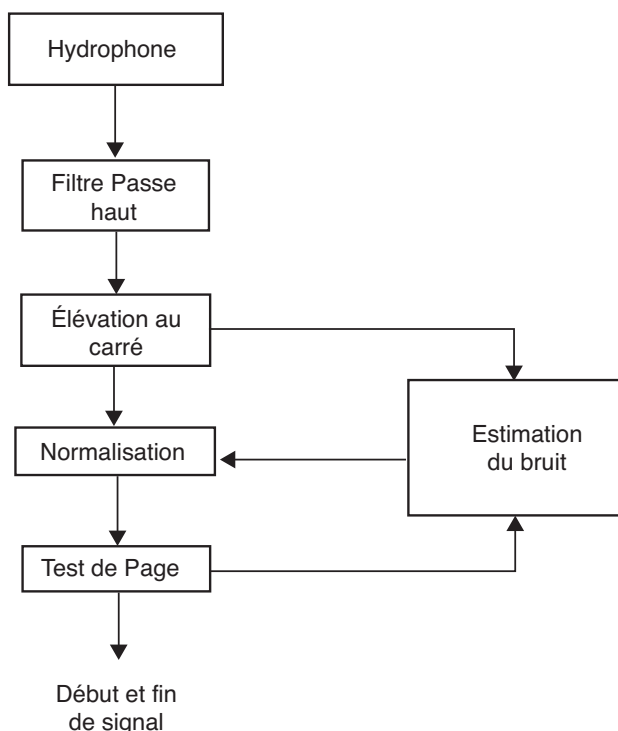


Figure 3 : Diagramme de l'algorithme de détection.

#### 4.2 Classification

La classification est basée sur la forme spectrale. Les caractéristiques des clics décrits au paragraphe 2 correspondent aux clics émis dans l'axe. Toutefois, comme il a déjà été mentionné ci-dessus, pour les cétacés à dents, la forme spectrale et temporelle du même clic varient beaucoup en fonction de l'angle d'émission [6]. Cependant, pour les mésoplodons de Blainville, il semblerait que même pour les clics qui ne sont pas enregistrés sur l'axe, certaines caractéristiques spectrales restent vraies, à savoir :

- fréquence pic entre 25 kHz et 40 kHz,
- fréquence de coupure assez marquée du spectre entre 20 et 25 kHz.

Ces observations ont été faites essentiellement à partir de jeu de données d'entraînement fourni pour le workshop de Boston (enregistrement des Bahamas). Les critères de classification pour les mésoplodons de Blainville ont été élaborés à partir de ces caractéristiques. Il est intéressant de noter que certains clics ont de l'énergie à plus basse fréquence, en dessous de 20 kHz. Toutefois, même pour ces clics, le spectre a une fréquence de coupure entre 20 et 25 kHz.

Pour les baleines de Cuvier, nous préférons ne pas donner de critère étant donné les problèmes de qualité des enregistrements décrits au paragraphe précédent. Toutefois, ces derniers ont une fréquence de coupure moins marquée, et d'autres critères de classification seront certainement nécessaires.

#### 4.3 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) et l'ICI du clic varient lentement d'un clic au suivant. Le modèle dynamique pour chaque sous séquence est donc le suivant :

$$20 \log x_{k+1} = 20 \log x_k + w_k, \quad (2)$$

$$(t_{k+1} - t_k) = (t_k - t_{k-1}) + v_k. \quad (3)$$

$x_k$  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  $q_v (t_k - t_{k-1})$ .

A partir des équations (2 et 3), nous voyons que l'état de la sous-séquence au temps  $t_k$  est donné par  $[x_k \ t_k \ t_{k-1}]$ . En effectuant le changement de variables suivant  $x_k = 20 \log x_k$ , l'équation (2) devient :

$$X_{k+1} = X_k + w_k. \quad (4)$$

Ce modèle s'applique à l'amplitude du signal reçu, et néglige les pertes de transmission d'un clic au suivant.

L'identification des paramètres du modèle  $q_w$  et  $q_v$  devrait être établie à partir de quelques enregistrements de bonne qualité pour lesquels un seul animal est présent.

Notre travail sur le MHT s'est focalisé jusqu'à maintenant sur la surveillance en mer ou à terre ; plus de renseignements peuvent être trouvés dans [21-22]. 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.

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'ICI correspondant est assez faible et si l'amplitude du clic est suffisamment proche du précédent ;
- l'hypothèse d'initier une nouvelle piste est toujours considérée.

Nous n'avons pas d'enregistrement de qualité suffisante nous permettant d'évaluer les paramètres du modèle  $q_w$  et  $q_v$ . Toutefois l'ICI des mésoplodons de Blainville est connu pour varier entre 0,2 et 0,4 s [8-9] et celui des baleines de Cuvier est aux alentours de 0,4 s [7]. En présence de plusieurs animaux, l'association devient possible en utilisant ces contraintes même si les paramètres du modèle ne sont pas connus de façon satisfaisante.

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 que sur celle d'ICI.

## 5. RÉSULTATS SUR LES MÉSOPLODONS DE BLAINVILLE

### 5.1 Résultats sur les enregistrements des Bahamas

Pour un des fichiers du jeu de données d'entraînement des enregistrements des Bahamas, les figures 4-5 illustrent la sortie du MHT pour un cas où peu d'animaux sont présents (un ou deux maximum). Elles donnent respectivement l'amplitude et l'ICI des pistes générées par le MHT. On peut voir que la majorité des clics sont associés.

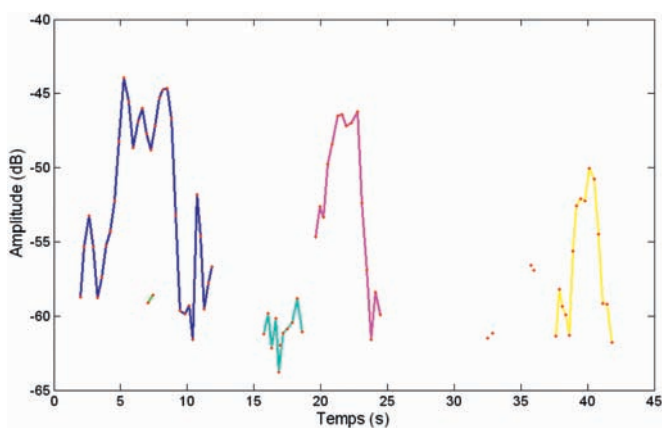


Figure 4 : Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le MHT (autres couleurs), pour un des fichiers du jeu de données d'entraînement enregistré aux Bahamas.

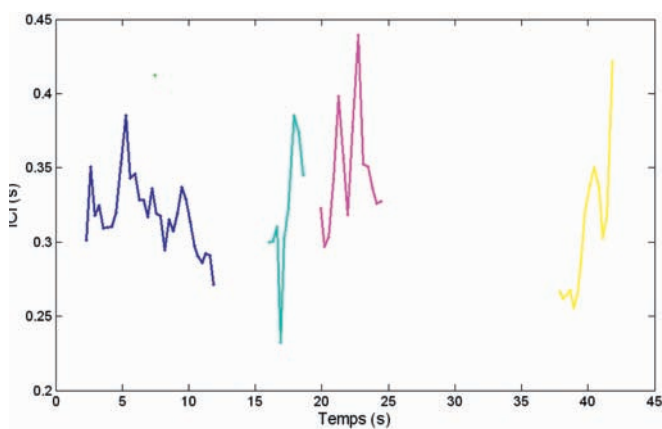


Figure 5 : Séquence d'ICI des pistes générées par le MHT pour les données correspondant à la Figure 4.

La figure 6 illustre la sortie du pisteur pour un deuxième fichier du jeu de données d'entraînement des enregistrements des Bahamas dans lequel plus d'animaux sont présents. Elle donne l'amplitude des pistes générées par le MHT. La figure 7 est un zoom de la figure précédente. Le nombre d'animaux estimé est donné par le nombre maximum de pistes qui coexistent en même temps. Il atteint la valeur de quatre pour ce fichier, mais il ne peut être comparé au nombre réel d'animaux qui n'est pas connu.

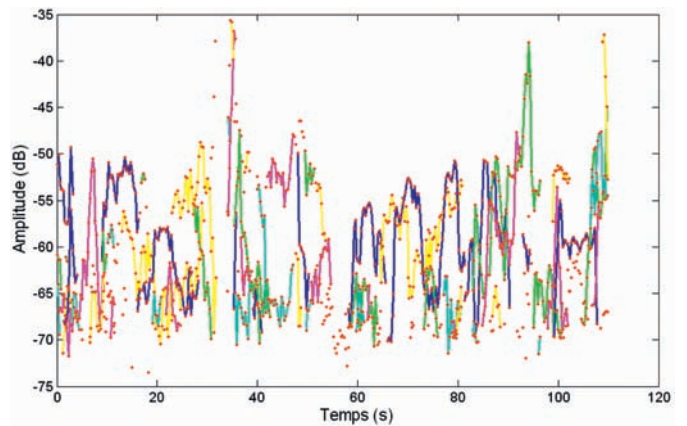


Figure 6 : Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le MHT (autres couleurs), pour un deuxième fichier du jeu de données d'entraînement enregistré aux Bahamas.

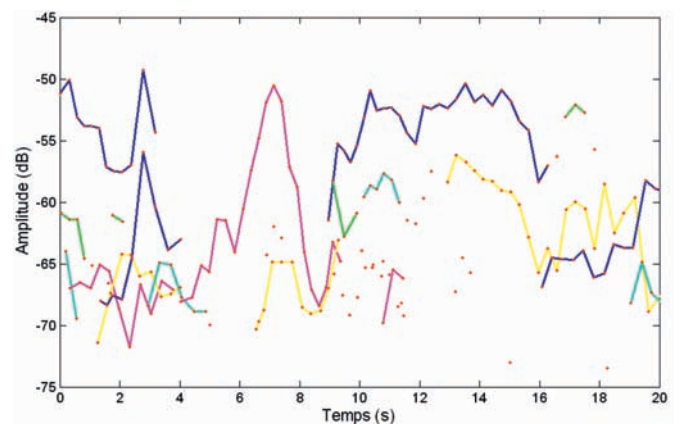


Figure 7 : Zoom de la Figure 6.

En utilisant cette méthode tous les fichiers test comprenant des clics de mésoplodons de Blainville ont été trouvés, que ce soit le fichier ou seul cette espèce était présente ou que ce soit les deux fichiers ou une autre espèce était présente.

### 5.2 Premiers résultats sur les enregistrements des Canaries

Nous avons utilisé ce fichier pour pouvoir tester nos critères de classification sur des enregistrements provenant d'un autre système et sur des animaux provenant d'un autre lieu géographique. De plus le nombre d'animaux est connu (trois). Nous pouvons donc comparer le nombre d'animaux estimés par notre méthode à la réalité. Nous avons constaté avec satisfaction que les clics étaient classifiés comme

appartenant à des mésoplodons de Blainville. Le nombre estimé d'animaux par notre méthode est présenté en figure 8. Nous pouvons noter que l'ordre de grandeur de l'estimation du nombre d'animaux présents est le bon durant la majorité du temps. Toutefois, on peut observer la présence de deux pics ponctuels avec un nombre pouvant dépasser trente. Ces pics ne sont pas réalistes, et ils ont lieu au moment où il y a présence d'un "buzz" (avec des valeurs atteignant un ICI inférieur à 5 ms). La limite basse imposée à l'ICI de 0,18 s pour palier à la méconnaissance des paramètres du modèle (cf. § 4.3), provoque ce phénomène : comme deux clics consécutifs ne peuvent pas être associés (ICI trop faible) un clic de "buzz" est associé à un autre clic de "buzz" qui est émis au moins 0,18 s plus tard. Cela fait un très grand nombre de pistes très courtes. Au lieu d'avoir une piste seule formée sur ces clics de "buzz", une multitude de pistes est formée sur ce "buzz". Ce phénomène s'est produit car les clics de "buzz" ont été classifiés comme étant des clics réguliers. Il pourrait y avoir plusieurs façons de résoudre ce problème. Les clics de "buzz" de mésoplodons de Blainville semblent pouvoir se distinguer des clics réguliers [12], nous avons pensé que c'était la méthode la plus propre et la plus élégante. D'après [12], les clics de "buzz" ont la particularité d'être plus courts (aux alentours de 100  $\mu$ s pour les clics sur l'axe) et de monter plus haut en fréquence (maximum d'énergie entre 25 et 80 kHz). En se basant sur ces propriétés, nous avons réussi, pour cet enregistrement, à établir des critères permettant de distinguer les clics de "buzz" des clics réguliers [23]. Toutefois, en revenant aux enregistrements des Bahamas, nous nous sommes aperçus que la majorité des clics de "buzz" ne satisfaisait aucunement les caractéristiques énoncées en [12]. Certains ont une durée supérieure à 800  $\mu$ s et un pic d'énergie inférieur à 20 kHz [23]. Nous avons cherché si nous pouvions trouver d'autres paramètres permettant de caractériser les clics de "buzz" des mésoplodons des Bahamas, mais nous nous sommes aperçus que ces clics pouvaient être très différents les uns des autres. Une analyse plus poussée nous a permis de mettre en évidence une propriété intéressante que nous exposons dans le paragraphe suivant.

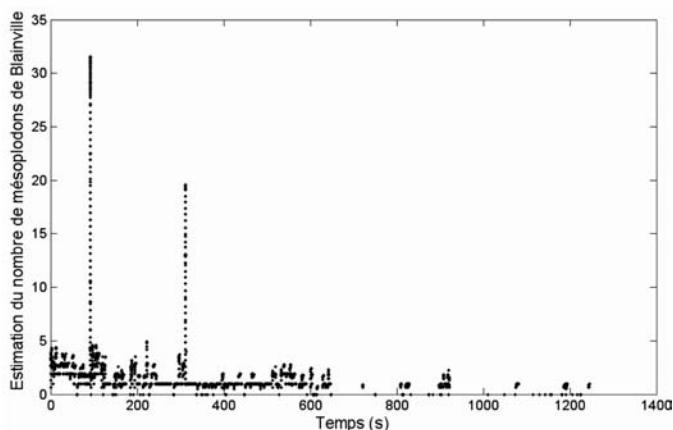


Figure 8 : Première estimation du nombre d'animaux présents pour l'enregistrement des Canaries.

### 5.3 Une propriété intéressante des clics de "buzz"

L'analyse précédente nous a permis de mettre en évidence que les clics de "buzz" ont un spectre qui varie peu d'un clic au suivant [23]. Cette propriété est vraie aussi bien pour les

"buzz" enregistrés aux Bahamas qu'aux Canaries. La figure 9 illustre cette propriété pour un "buzz" d'une durée de 5 secondes enregistré aux Bahamas ; elle donne le spectre de dix clics consécutifs produits au début du "buzz" et de dix clics consécutifs produits vers la fin de ce même "buzz". On peut noter, sur ce "buzz" qui est assez long, à quel point les spectres des clics du début sont proches entre eux, de même que ceux des clics de la fin. Par contre, la forme du spectre des clics du début est bien différente de la forme des clics de la fin. Le spectre des clics intermédiaires évolue progressivement de la forme du début à la forme de fin. Enfin, nous avons constaté que cette propriété de l'évolution lente du spectre des clics de "buzz" est vérifiée pour d'autres espèces [24].

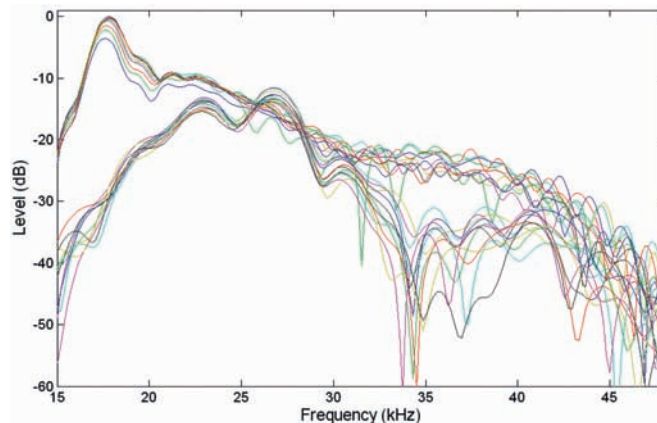


Figure 9 : Spectre de dix clics du début et dix clics de la fin d'un "buzz" des enregistrements des Bahamas.

Cette propriété nous a donné l'idée de modifier le pisteur afin de pouvoir l'utiliser pour associer et donc classer les clics de "buzz" (contrairement à notre idée de départ qui était de classer les clics avant l'entrée du pisteur).

### 5.4 Évolution de la méthode

La forme spectrale du clic est donc introduite comme paramètre supplémentaire pour le pisteur. De la même façon qu'auparavant, nous négligeons les erreurs de mesure. Nous avons introduit la similarité de spectre pour les clics réguliers, et nous espérons que ce paramètre améliorera leur association.

Le modèle dynamique pour chaque sous-séquence devient :

$$X_{k+1} = X_k + w_k, \quad (2)$$

$$(t_{k+1} - t_k) = (t_k - t_{k-1}) + v_k, \quad (3)$$

$$Sp_{k+1} = Sp_k + \xi_k. \quad (4)$$

avec  $X_k = 20 \log x_k$ ,  $x_k$  étant l'amplitude du clic au temps  $t_k$  ;  $w_k$  et  $v_k$  sont des termes de bruit de variance  $q_w(t_k - t_{k-1})$  et  $q_v(t_k - t_{k-1})$ , respectivement ;  $Sp_k$  est le spectre du clic au temps  $t_k$ , et  $\xi_k$  un terme de bruit.

Différentes combinaisons de paramètres ont été testées et nous n'avons pas trouvé de paramètres permettant l'association satisfaisante à la fois des clics de "buzz" et des clics réguliers. Les paramètres ont besoin d'être différents pour les deux types de clics car, pour les clics de "buzz" :

- la similarité du spectre d'un clic au suivant est plus importante ;

- une plus grande stabilité sur l'ICI est observée (même si les paramètres de bruit dépendent de l'ICI) ;
- une valeur plus élevée du paramètre de bruit  $q_w$  est nécessaire pour la variation d'amplitude.

Les valeurs de paramètres utilisés sont donc différentes pour les clics de "buzz" et les clics réguliers.

### 5.5 Nouveaux résultats sur les enregistrements des Canaries

La figure 10 présente le nombre d'animaux estimé après avoir introduit les modifications décrites ci-dessus. Sachant que trois animaux étaient présents [13], 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. Ces résultats ne sont pas surprenants car il est bien précisé que la qualité des données diminue avec le temps [13], certainement par ce que les animaux s'éloignent du DTag au fur et à mesure du temps. Pour un des deux courts instants où quatre animaux ont été estimés, une observation plus minutieuse des pistes permet de constater que pendant un court instant, une piste a été formée sur des échos. Effectivement, quand deux pistes qui ont le même ICI coexistent, s'il n'y a pas d'erreur d'association, cela doit correspondre à la présence d'un écho. Pour le deuxième cas, il est probable qu'il y ait une erreur d'association à cet instant là.

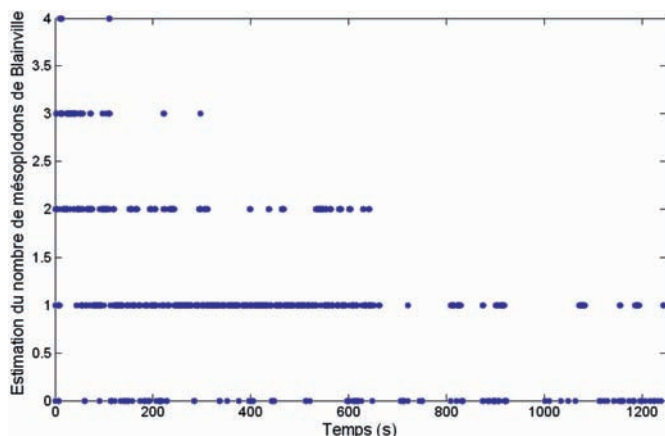


Figure 10 : Nouvelle estimation du nombre d'animaux présents pour l'enregistrement des Canaries.

La figure 11 présente l'ICI de toutes les pistes générées par la version modifiée du MHT pour cet enregistrement. Nous pouvons constater qu'en plus des pistes correspondant aux clics réguliers et dont l'ICI varie entre 0,2 s et 0,45 s, il y a de brèves pistes formées à trois moments distincts et dont l'ICI est très faible. Ces pistes correspondent à la présence de "buzz".

Les figures 12 a & b donnent un zoom respectivement de l'amplitude et de l'ICI de la piste générée par le MHT, correspondant au premier "buzz" de l'enregistrement des Canaries. On peut voir que les clics de "buzz" ont été associés de façon satisfaisante, et que les clics réguliers (piste bleu de la figure 12) n'ont pas été confondus avec les clics de "buzz" (piste magenta de la même figure) même s'ils ont une amplitude semblable. Une fois associée en séquence, en se basant sur la faible valeur de l'ICI la classification se fait de façon immédiate.

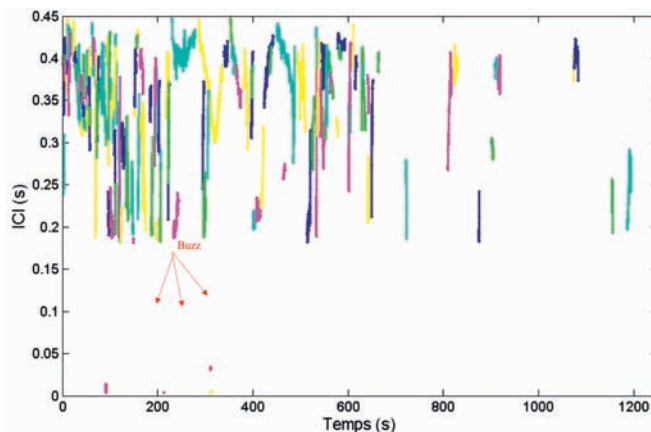


Figure 11 : ICI des pistes générées par le MHT modifié sur l'enregistrement des Canaries.

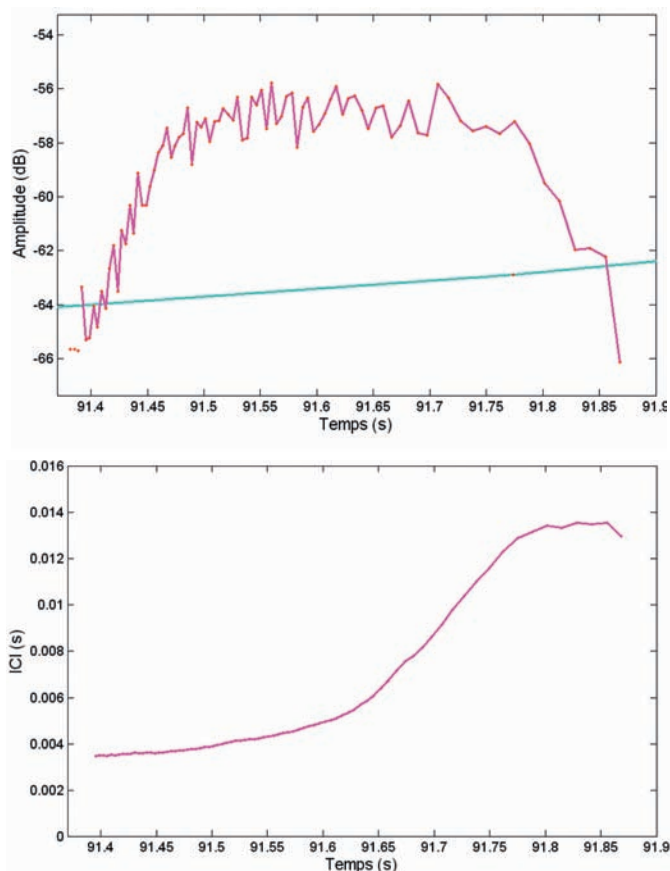


Figure 12 : Amplitude (a) et ICI (b) de la piste obtenue par le MHT modifié, sur le premier "buzz" de l'enregistrement des Canaries.

### 5.6 Conclusion

La méthode présentée au § 4 a permis de détecter la présence de mésoplodons de Blainville dans tous les fichiers test des enregistrements des Bahamas pour lesquels des mésoplodons de Blainville sont présents.

Nous avons aussi mis en évidence que les clics de "buzz" de mésoplodons de Blainville peuvent être très différents de

ceux décrits dans la littérature, et très différents les uns des autres, ce qui rend leur classification individuelle très difficile, voire infaisable. Toutefois, nous avons mis en évidence une propriété intéressante : les clics de "buzz" ont un spectre qui évolue lentement. Cette propriété nous a donné l'idée de faire évoluer le pisteur. Ces évolutions ont permis :

- l'amélioration de l'association des clics réguliers (observation des pistes obtenues pour divers fichiers du jeu de données (une étude plus poussée des résultats serait nécessaire) ;
- la classification des clics de "buzz", (comme séquence et non de façon individuelle).

L'ordre de grandeur du nombre estimé d'animaux pour le seul enregistrement dont le nombre d'animaux est connu est satisfaisant.

## 6. PREMIERS RÉSULTATS SUR LES BALEINES DE CUVIER

Comme mentionné dans le § 4, les critères de classification doivent être élaborés à partir d'enregistrements de meilleure qualité. Il semblerait pourtant que la classification de ces clics soit plus difficile car le spectre ne présente pas une montée aussi nette de l'énergie pour une fréquence située entre 20 et 25 kHz. Pour un fichier dans lequel seulement des baleines de Cuvier étaient présentes (pas de problème de classification des clics), nous avons voulu tester comment fonctionnait le pisteur en utilisant les mêmes paramètres que ceux des enregistrements de mésoplodons de Blainville. Dans ce fichier, des clics de baleines de Cuvier sont présents de façon régulière pendant plus de 20 min. Dans cet enregistrement, il y a un bruit aux alentours de 38 kHz, créé par le générateur utilisé lors de cette expérimentation. Ce bruit a généré la détection de nombreux transitoires que nous avons éliminés en nous basant sur le critère de spectre avec un pic très étroit aux alentours de 38 kHz. La figure 13 donne l'amplitude des pistes générées par le pisteur en utilisant les mêmes paramètres que ceux utilisés par les mésoplodons de Blainville. Sur cette figure, nous pouvons voir que la majorité des clics ne sont pas associés et que les pistes sont de courte durée. Il semblerait donc que l'association des clics de baleines de Cuvier requiert des paramètres plus lâches, ce qui rend l'association plus difficile quand plusieurs animaux sont présents. Cette phrase est au conditionnel, car le problème d'antenne mentionné au § 3 transforme le spectre des clics. Du coup, nous ne savons pas l'influence que cela a sur l'association. De plus, l'élimination des transitoires créés par le générateur a pu aussi éliminer des clics de baleines de Cuvier. En effet, il y a des détections pour lesquelles un clic de faible amplitude se superpose au bruit du générateur. Or cette méthode est basée sur la détection de clics consécutifs et ceci a aussi pu perturber l'association.

Cette méthode mérite donc d'être approfondie pour les clics de baleines de Cuvier avec des enregistrements de meilleure qualité.

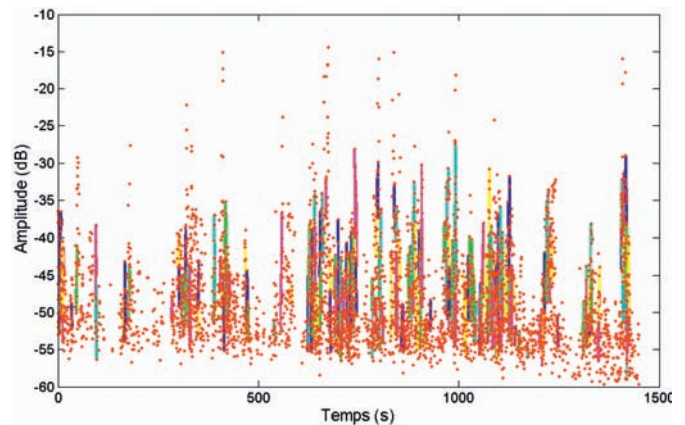


Figure 13 : Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le MHT (autres couleurs), pour un fichier d'enregistrement de baleines de Cuvier.

## 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté les premiers résultats obtenus par notre méthode pour la détection et la classification de deux espèces de clics de baleines à bec. La détection des clics se fait par un détecteur de transitoires basé sur le test de Page. La classification se fait en deux étapes, en premier lieu une classification individuelle des clics est faite (elle est pour l'instant basée sur la forme spectrale du clic). Les clics sont ensuite associés par animaux à l'aide d'un algorithme de pistage (MHT tracker) basé sur les hypothèses que l'amplitude, l'ICI et le spectre varient peu d'un clic au suivant. L'association des clics permet de calculer l'ICI, ce qui est un autre critère de classification important pour les baleines à bec. Les résultats obtenus pour les mésoplodons de Blainville sont prometteurs. Il est difficile de conclure sur les baleines de Cuvier à cause des problèmes de qualité des enregistrements sur lesquels nous avons travaillé. Toutefois, la classification et l'association des clics de baleines de Cuvier semblent plus difficiles.

De nombreuses voies seraient à explorer pour améliorer toutes les étapes de cette méthode. Davantage de recherches concernant les clics de baleines à bec devraient permettre d'améliorer aussi bien la classification individuelle que l'association.

Il serait aussi intéressant d'avoir un simulateur de clics pour pouvoir tester la méthode en faisant varier les paramètres de façon contrôlée afin d'améliorer les diverses étapes de la méthode, et surtout de pouvoir quantifier la qualité des résultats.

Notons aussi que la qualité des enregistrements est très importante pour ce travail.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette étude. Nous remercions toutes les personnes impliquées dans la récolte, la préparation et la distribution des jeux de

données et tout particulièrement : Naval Undersea Warfare Center (NUWC), Division Newport ; Oregon University (à travers le site internet MobySound) ; Mark Johnson du Woods Hole Oceanographic Institution.

Ce travail a été principalement financé par le contrat n° 08 50 001 00 370 83 45 de la marine nationale. Un remerciement tout spécial à l'ICA Frédéric Rougé.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] FRANTZI A.: "Does Acoustic Testing Strand Whales?". *Nature* (vol. 392: 29, 1998).
- [2] BALCOMB K.C.I. and CLARIDGE D.E.: "A Mass Stranding of Cetaceans Caused by Naval Sonar in the Bahamas". *Bahamas Journal of science* (vol. 2: 2-12, 2001).
- [3] D'AMICO A., GISINER R.C., KETTEN D.R., HAMMOCK J.A., JOHNSON C., TYACK P.L. and MEAD J.: "Beaked Whale Strandings and Naval Exercises". *Aquatic Mammals* (vol. 35(4): 452-472, 2009).
- [4] TYACK P.L., JOHNSON M.P., AGUILAR DE SOTO N.A., STURLESE A., MADSEN P.T.: "Extreme Diving of Beaked Whales (*Mesoplodon densirostris*)". *Journal of Experimental Biology* (vol. 209: 4238-4253, 2006).
- [5] BAIRD R.W., WEBSTER D.L., Mc SWEENEY D.J., LIGON A.D., SCHORR G.S., BARLOW J.: "Diving Behavior of Cuvier's (*Ziphius cavirostris*) and Blainville's (*Mesoplodon densirostris*) Beaked Whales in Hawaii". *Canadian Journal of Zoology* (vol. 84: 1120-1128, 2006).
- [6] AU W. W. L.: "The Sonar of Dolphins". New York, NY: Springer, 1993.
- [7] ZIMMER W.M.X., JOHNSON M.P., MADSEN P.T., TYACK P.L.: "Echolocation Clicks of Free-Ranging Cuvier's Beaked Whales (*Ziphius cavirostris*)". *Journal of the Acoustical Society of America* (vol. 117(6): 3919-3927, 2005).
- [8] JOHNSON M.P., MADSEN P.T., ZIMME W.M.X., AGUILAR DE SOTO N.A., TYACK P.L.: "Beaked Whales Echolocate on Prey". *Proceedings of the Royal Society London, B* (sup) (vol. 271: S383-S386, 2004).
- [9] MADSEN P.T., JOHNSON M.P., AGUILAR DE SOTO N.A., ZIMMER W.M.X., TYACK P.L.: "Biosonar Performance of Foraging Beaked Whales (*Mesoplodon densirostris*)". *Journal of Experimental Biology* (vol. 208: 181-194, 2005).
- [10] RANKIN S., BARLOW J.: "Sounds Recorded in the Presence of Blainville's Beaked Whales, *Mesoplodon densirostris*, near Hawai'i (L)". *Journal of the Acoustical Society of America* (vol. 122(1): 42-45, 2007).
- [11] ZIMMER W.M.X., HARWOOD J., TYACK P.L., JOHNSON M.P., MADSEN P.T.: "Passive Acoustic Detection of Deep-Diving Beaked Whales". *Journal of the Acoustical Society of America* (vol. 124(5): 2823-2832, 2008).
- [12] JOHNSON M.P., MADSEN P.T., ZIMMER W.M.X., AGUILAR DE SOTO N.A., TYACK P.L.: "Foraging Blainville's Beaked Whales Produce Distinct Click Types Matched to Different Phases of Echolocation". *Journal of Experimental Biology* (vol. 209 (24): 5038-5050, 2006).
- [13] "<http://hmsc.oregonstate.edu/projects/MobySound/MsSoundSets.html>
- [14] MORETTI D., DI MARZIO N., MORISSEY R., MELLINGER D.K., HEIMLICH S., PETTIS H.: "Overview of the 3rd International Workshop on the Detection and Classification of Marine Mammals Using Passive Acoustics". *Canadian Acoustics* (vol. 36(1): 7-11, March 2008).
- [15] JOHNSON M.P., YACKT P.L.: "A Digital Acoustic Recording Tag for Measuring the Response of Wild Marine Mammals to Sound". *IEEE Journal of Oceanic Engineering* (vol. 28: 3-12, 2003).
- [16] GERARD O., CARTHEL C., CORALUPPI S., WILLETT P.: "Feature Aided Tracking for Marine Mammal Detection and Classification". *Canadian Acoustics* (vol. 36(1): 13-19, March 2008).
- [17] PAGE S.E.: "Continuous Inspection Schemes". *Biometrika* (vol. 41: 100-115, 1954).
- [18] ABRAHAM D.A., WILLETT P.: "Active Sonar detection in Shallow Water Using the Page Test". *IEEE Journal of Oceanic Eng.*(vol. 27 (1), January 2002).
- [19] ABRAHAM D.A.: "Passive Acoustic Detection of Marine Mammals". *SACLANTCEN SM 351*, NATO Undersea Research Centre, La Spezia, Italy, 2000.
- [20] WALD A.: "Sequential Analysis". Wiley, New York, 1947.
- [21] CORALUPPI S., CARTHEL C.: "Recursive Track Fusion for Multi-Sensor Surveillance". *Information Fusion* (vol. 5(1), March 2004).
- [22] CORALUPPI S., CARTHEL C.: "Distributed Tracking in Multistatic Sonar". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (vol. 41(3), July 2005).
- [23] GERARD O., CORALUPPI S., CARTHEL C.: "Analysis and Classification of Beaked Whale Buzz Clicks". *Proceedings of Passive 08*, October 2008, Hyères, France.
- [24] GERARD O., CARTHEL C., CORALUPPI S.: "Classification of Odontocete Buzz Clicks Using a Multi-Hypothesis Tracker". *Proceedings of OCEANS 2009*, May 2009, Bremen, Germany.