



# Rapport de recherche

Julie PATRIS (Université d'Aix-Marseille), Franck MALIGE (CNRS UMR 7020 LIS, équipe DYNI), Madeleine HAMAME (CIEP, Coyhaique), Susannah BUCHAN (Université de Concepción), Valentin BARCHASZ (Université de Toulon, équipe SMIoT), Hervé GLOTIN (Université d'Aix-Marseille, Université de Toulon, CNRS UMR 7020 LIS, équipe DYNI)

Juillet 2021

## Etude des productions sonores des dauphins du canal de Puyuhuapi, Région de Aysen, Chili

### Contents

<b>1</b>	<b>Présentation du projet</b>	<b>3</b>
1.1	Présentation générale . . . . .	3
1.2	Participants . . . . .	3
1.3	Questions scientifiques . . . . .	4
1.4	Lieu de l'expérience . . . . .	4
1.5	Espèces cibles . . . . .	5
1.5.1	Le marsouin de Burmeister ( <i>Phocoena spinipinnis</i> ) . . . . .	5
1.5.2	Le dauphin austral ( <i>Lagenorhynchus australis</i> ) . . . . .	5
1.5.3	Le dauphin chilien ( <i>Cephalorhynchus eutropia</i> ) . . . . .	6
1.6	Matériel . . . . .	7
1.7	Réglages de l'appareil d'enregistrement . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Diffusion scientifique</b>	<b>8</b>
2.1	Conférence . . . . .	8
2.2	Presse . . . . .	8
2.3	Matériel audiovisuel . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Résultats de l'enregistreur 'HighBlue'</b>	<b>8</b>
3.1	Installation et maintenance . . . . .	8
3.2	Données obtenues . . . . .	9
3.3	Sons enregistrés . . . . .	10

<b>4</b>	<b>Détection des clics</b>	<b>11</b>
4.1	Stratégie de détection . . . . .	11
4.2	Résultats des détections . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Conclusion et futurs projets</b>	<b>13</b>
5.1	Travail d'analyse à venir . . . . .	13
5.2	Projets futurs . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Annexes</b>	<b>14</b>
6.1	Estimation de la portée de l'instrument . . . . .	14
6.1.1	Principe du calcul . . . . .	14
6.1.2	Niveaux émis par la source . . . . .	14
6.1.3	Mesure du niveau reçu . . . . .	15
6.1.4	Influence du milieu . . . . .	15
6.1.5	Résolution . . . . .	16
6.1.6	Conclusion . . . . .	17
6.2	Programme OCTAVE pour les detections . . . . .	17
6.3	Courbe de sensibilité de l'hydrophone utilisé . . . . .	20
6.4	Logiciels utilisés . . . . .	20

# 1 Présentation du projet

Dans ce rapport de recherche, nous faisons un premier bilan du projet d'enregistrement des dauphins côtiers du sud du Chili, en mai 2021, dans le canal de Puyuhuapi, dans la région de Aysen. Il contient la présentation du projet, le rapport d'expérience, les premiers résultats et les perspectives.

## 1.1 Présentation générale

Pour cette deuxième campagne d'observations au Chili, nous avons construit un projet avec plusieurs partenaires chiliens pour déposer l'instrument 'HighBlue' (<https://smiot.univ-tln.fr/index.php/highblue/>) dans les fjords de Patagonie. Les espèces cibles sont les dauphins côtiers de la zone, étant donné le lieu choisi et l'intérêt des différents participants. Un des enjeux de pouvoir bien connaître ces petits cétacés côtiers réside notamment dans les conflits réguliers qui les opposent à l'industrie du saumon, très présente localement, mais aussi à la pêche industrielle. Dans ce cadre, réaliser un suivi précis de ces populations est très important.

Le projet a été financé en partie par l'Université de Toulon (prêt de matériel), en partie par le projet 'Fondecyt' de Susannah Buchan de l'université de Concepción et en partie par le CIEP (Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia). L'appareil d'enregistrement acoustique 'HighBlue' a été conçu et construit par l'équipe de SMIoT (Univ. de Toulon) et le laboratoire LIS, équipe DYNI : Valentin Barchasz, Valentin Gies, Hervé Glotin, Sebastian Marzetti. Le travail de terrain a été réalisé par Celestino Ancamil (Capitaine de bateau), Madeleine Hamame (CIEP), Cristian Maldonado (Plongeur), Franck Malige (LIS, Université de Toulon), Julie Patris (Aix-Marseille Université) : les appareils ont été installés en mai 2021, 'HighBlue' pour une semaine et le 'C-POD' pour quelques mois.

Les données recueillies lors de ce projet ont vocation à être publiques, sous un régime de type 'copyleft', c'est à dire utilisables par tous sous réserve de ne pas les modifier et de citer les auteurs.

## 1.2 Participants

**Dr Julie Patris** - Physicienne, bio-acousticienne, spécialiste en traitement du signal. Université d'Aix-Marseille. Développe et utilise des appareils de bio-acoustique marine. Est intéressée par la collecte de données bioacoustiques ainsi que par leur traitement en aval. Pour ce projet, avec le dr Franck Malige, elle est en charge de l'appareil de l'université de Toulon, propose des protocoles pour son usage et participe à l'analyse des données.

**Dr Franck Malige** - Mathématicien, bio-acousticien, spécialiste en traitement du signal. Laboratoire LIS (CNRS 7020). Avec la dr Julie Patris, est intéressé par la production des sons sous-marins d'origine animale et leur analyse mathématique.

**MSc Madeleine Hamame** - Ecologue marine, expérimentatrice sur les milieux marins. CIEP (Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia). Le CIEP est intéressé par une collaboration de façon à augmenter les connaissances sur les écosystèmes de Patagonie (leur sujet principal), dans la mesure où il n'y a aucun spécialiste en bioacoustique dans leurs équipes. Ils ont un peu de matériel de suivi acoustique : des hydrophones, des 'C-Pod' qui ont déjà été installés. Pour ce projet, elle est en charge de l'organisation du travail de terrain et de l'installation du 'C-Pod'.

**Dr Susannah Buchan** - Océanologue, bioacousticienne, spécialiste de la baleine bleue 'chilienne'. Universidad de Concepción - Fondecyt "Towards real-time acoustic ocean monitoring in Chile: new computational methods for the detection, classification and localization of low-frequency sounds at an international hydroacoustic station off the Juan Fernandez Archipelago". Susannah coordonne le projet, a mis en lien les partenaires et a mis a disposition des fonds pour la réalisation du projet à travers du Fondecyt.

**Ing Valentin Barchasz** - Ingénieur d'étude, électronicien, Université de Toulon. Spécialisé dans le développement d'instruments innovants dédiés à la recherche, il construit et adapte le système d'acquisition acoustique 'HighBlue' à des utilisations diverses et ultra-spécialisées (suivi de cachalot, d'orques, etc.).

**Pr Hervé Glotin** - Sciences de l'information, spécialiste en développement de systèmes liés à l'intelligence artificielle. Université de Toulon. Dans l'équipe DYNI du laboratoire LIS, se dédie au développement d'appareils de bio-acoustique (en collaboration avec l'équipe technique SMIoT de l'université de Toulon) et de techniques d'analyse. A des intérêts au développement de collaborations internationales pour la production de connaissances en bioacoustique. Pour ce projet, est en charge de la préparation du matériel 'HighBlue' d'enregistrement et de la coordination.

### 1.3 Questions scientifiques

Un premier objectif (intéressant pour l'équipe DYNI et son partenaire, le SMIoT) est de valider l'utilisation de l'appareil 'HighBlue' (<https://smiot.univ-tln.fr/index.php/highblue/>) construit par l'université de Toulon pour le suivi à moyen terme de signaux biologiques à très haute fréquence. En particulier, on teste sa robustesse aux hautes fréquences avec un stockage important (cartes à 512 Go), avec une bonne dynamique (24 bits) et son autonomie à ces fréquences. Pour cet objectif, il faut installer l'instrument assez longtemps dans un lieu où les dauphins sont présents.

Un deuxième objectif, énoncé par Susannah Buchan, est de valider et tester l'utilisation des C-Pod pour ces petits cétacés côtiers (<https://www.cpodclickdetector.com/>). Quel est le taux de déclenchement, peut-on estimer la distance maximale d'efficacité? Dans ce but, le C-Pod et l'instrument "HighBlue" de l'université de Toulon sont installés conjointement.

Un troisième objectif lié au CIEP est de continuer l'étude bioacoustique sur le site, qui est encore naissante (une campagne d'installation du C-POD en 2019-2020) et de la diversifier avec de nouveaux appareils de mesure et de nouvelles techniques d'analyse. Pour atteindre cet objectif, il nous a paru important de passer du temps sur place, à échanger avec les techniciens du CIEP. Le fait que les mesures obtenues soient bonnes souligne l'importance de mettre en place un suivi acoustique dans les fjords de Patagonie. Les dauphins côtiers du Chili sont des espèces peu connues et menacées (UICN). Il y a encore peu d'études (relativement aux autres cétacés) de leur comportement : déplacements, sons émis, interactions sociales, interactions avec les activités humaines (??????).

Enfin, nous avons aussi comme objectif, spécifique à DYNI, d'étudier les signaux obtenus pour les quelques espèces cibles, en utilisant l'expertise de notre équipe dans les champs suivant : modèles de représentation temps-fréquence pour le suivi de la biodiversité, acquisition de précision et à large échelle, traitement du signal, apprentissage de représentation non supervisée, classification automatique, analyse éthoacoustique, etc. Quelques idées sont apparues dans cette ligne : est-ce qu'on peut modéliser finement le son d'un dauphin par des modèles mathématiques qui nous permettraient, en retour, de définir de meilleurs paramètres d'analyse de ces signaux?

### 1.4 Lieu de l'expérience

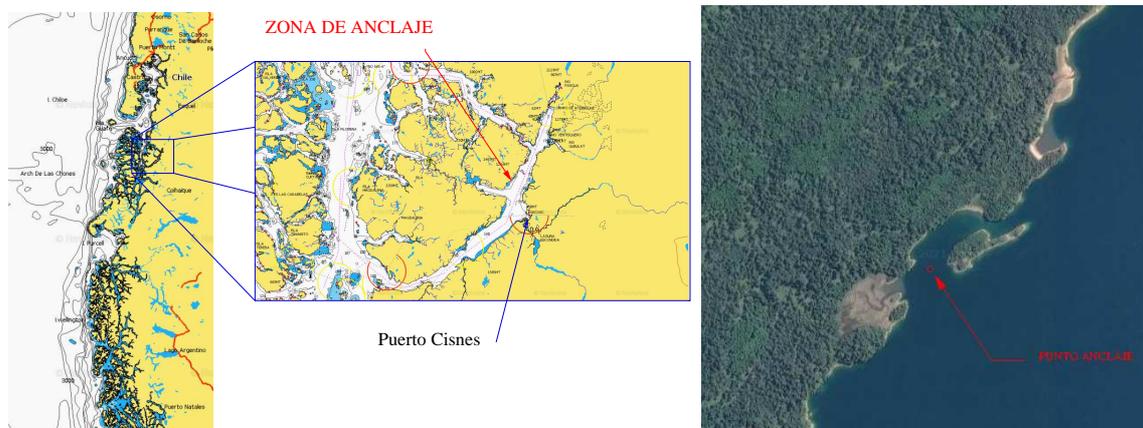


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude du CIEP. A gauche, une contextualisation sur le sud du Chili et la ville de Coyhaique, où se trouvent les bureaux du CIEP. Au centre, l'encart représente l'île de Magdalena, entourée du détroit de Puyuhuapi, et ses environs. Puerto Cisnes, qui a été le lieu finalement choisi, est situé dans la zone où le détroit de Puyuhuapi est relativement large (3 milles nautiques) et profond (plus de 250 mètres). A droite, le lieu d'ancre choisi. Illustrations tirées des sites de 'navionics' et 'googlemap'.

Plusieurs lieux ont été évoqués par Madeleine Hamame, du CIEP, comme le petit port de Puerto Gaviota, au sud de l'île Magdalena, ou les abords de l'île Meninea, ou encore la laguna San Rafael, bien plus au sud. Une réunion le 21 janvier a néanmoins fait apparaître une possibilité plus en accord avec les points soulignés ci-dessus : il s'agit du canal Puyuhuapi, à la hauteur du village 'Puerto Cisnes' (voir figure 1). Ce lieu présente divers avantages :

- il s'agit d'une partie du canal assez large (3 milles nautiques), et profonde (jusqu'à 200 mètres).
- au point de vue logistique, Puerto Cisnes est accessible par la route depuis Coyhaique (la grande ville la plus proche, siège du CIEP), et la pose d'un instrument ne nécessite la location que pour une courte durée d'un bateau depuis le port.

- au point de vue scientifique, c'est une zone qui est étudiée par Madeleine Hamamé et d'autres membres du CIEP depuis un certain temps, elle est donc un peu plus connue et nous disposons de certaines données écologiques intéressantes. En particulier, l'équipe du CIEP y avait constaté la présence répétée de dauphins résidents, confirmée par les opérateurs touristiques de Puerto Cisnes.

En revanche, cette zone n'est pas connue pour être fréquentée par les baleines (bien qu'il ne soit pas formellement exclu qu'il y ait de temps en temps un passage), il est donc peu probable que nous ayons des signaux basse fréquence. La possibilité d'explorer la zone située en face de l'île Meninea, qui est un lieu cible pour le CIEP (avec un projet en cours pour le suivi écologique) reste ouverte, mais la logistique y est plus lourde.

## 1.5 Espèces cibles

Trois espèces de petits cétacés côtiers sont observées régulièrement dans le canal de Puyuhuapi : le marsouin de Burmeister, le dauphin austral et le dauphin chilien, ces deux derniers également mentionnés dans un rapport sur la faune maritime de la région ?.

### 1.5.1 Le marsouin de Burmeister (*Phocoena spinipinnis*)

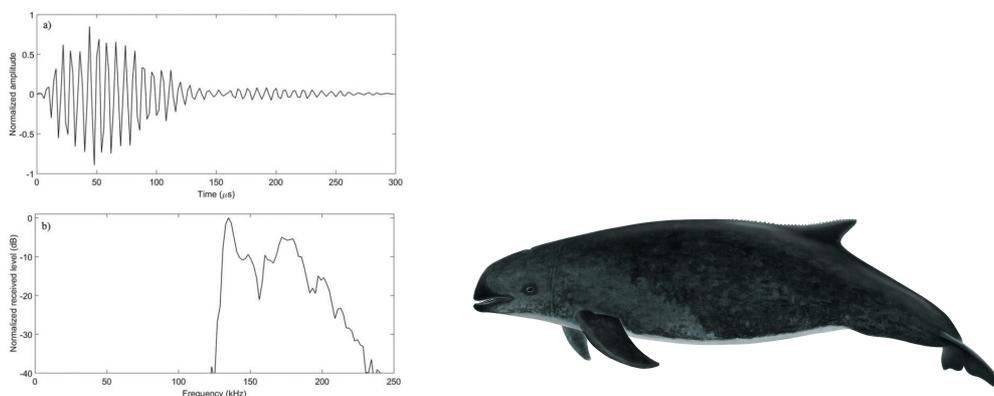


Figure 2: Représentation en temps (en haut) et fréquence (en bas) d'une émission sonore typique, normalisée, du marsouin de Burmeister (tiré de Reyes et al., 2018 ?) - fréquence d'échantillonnage de 500 kHz. Crédit image : Andres Calderon, de l'atelier "Ermitaño" (<https://tallerermitano.cl/>)

C'est une espèce endémique du sud de l'Amérique (Pérou, Chili, Argentine, Uruguay, Brésil), petite (1,50 mètre, entre 50 et 75 kg) et très discrète. Ce marsouin est menacé par la pêche, directement pour la consommation de sa viande (au Pérou) ou pour son utilisation comme appât dans la pêche industrielle aux araignées de mer (Patagonie, ?), et indirectement lors de captures accidentelles dans les filets, comme beaucoup d'espèces côtières. Les données sur ses effectifs sont considérées comme insuffisante par l'UICN (?). Son répertoire vocal est constitué d'émissions brèves à très haute fréquence, supérieure à 100 kHz (?). La figure 2, tirée de ?, montre l'aspect typique d'une émission sonore, en représentation temporelle puis en représentation fréquentielle.

### 1.5.2 Le dauphin austral (*Lagenorhynchus australis*)

Ce petit dauphin (2 mètres environ, de l'ordre de 100 kg) est lui aussi endémique de la pointe sud de l'Amérique, mais sa répartition, plus australe que le marsouin cité plus haut, est très liée aux forêts de kelps caractéristiques des fjords et archipels de la pointe sud. Il est assez facilement aperçu dans les canaux de Patagonie, avec parfois des comportements de surface visibles (accompagnement en proue des bateaux, sauts). Les données sur ses effectifs sont considérées comme insuffisante par l'UICN (?). Il est menacé, comme d'autres espèces côtières, par les filets de pêche, ainsi que directement par des captures pour servir d'appât pour la pêche aux araignées de mer (Patagonie, ?). Son répertoire vocal est constitué d'émissions brèves à très haute fréquence, supérieure à 100 kHz (?), aucun sifflement n'ayant été enregistré. La figure 3, tirée de ?, montre l'aspect typique d'une émission sonore, en représentation temporelle puis en représentation fréquentielle.

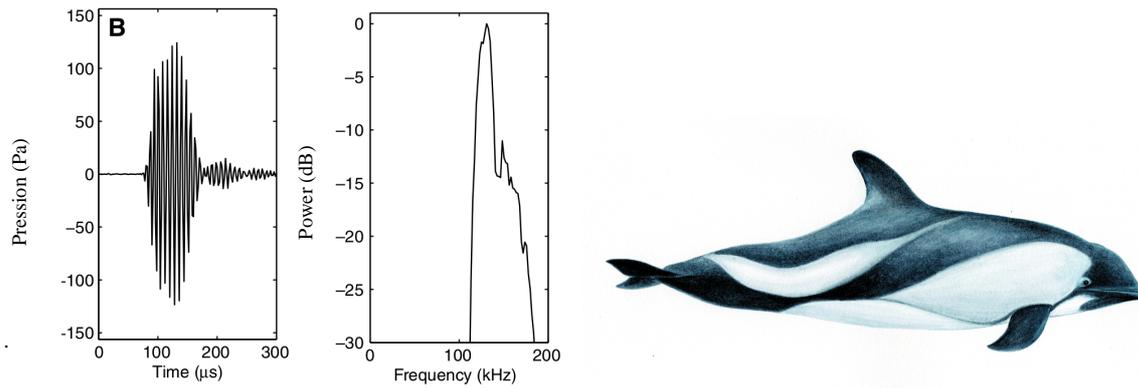


Figure 3: Représentation en temps (à gauche) et fréquence (à droite) d’une émission sonore typique du dauphin Austral (tiré de Kyhn et al., 2010 ?) - fréquence d’échantillonnage de 500 kHz. Crédit image : Andres Calderon, de l’atelier “Ermitaño” (<https://tallerermitano.cl/>)

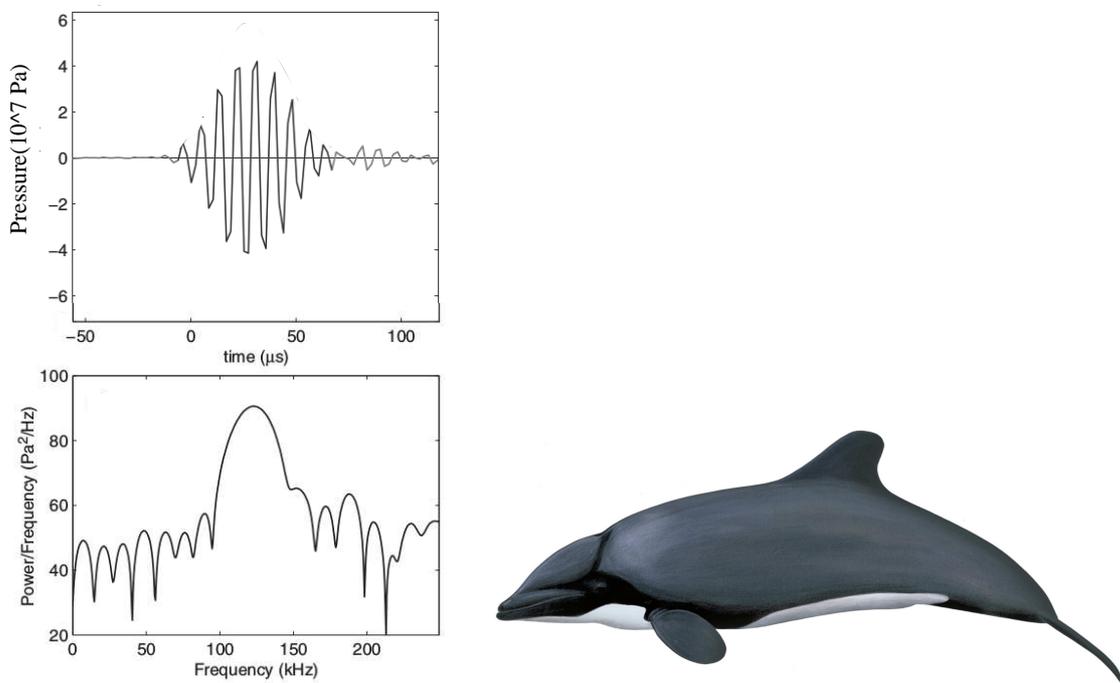


Figure 4: Représentation en temps (en haut) et fréquence (en bas) d’une émission sonore typique du dauphin chilien (tiré de Götz et al., 2010 ?) - fréquence d’échantillonnage de 500 kHz. Crédit image : Andres Calderon, de l’atelier “Ermitaño” (<https://tallerermitano.cl/>)

### 1.5.3 Le dauphin chilien (*Cephalorhynchus eutropia*)

Le dauphin chilien est un des plus petits dauphins (moins de 1,70 mètres pour 65 kg environ), il n’est présent que sur la côte sud du Chili, de Valparaíso jusqu’à la Terre de feu et le nord de la péninsule Antarctique. C’est une espèce discrète (?), assez peu aperçue, peut-être en raison de la chasse intensive (jusqu’à 1500 individus par ans) menée pour utiliser sa chair comme appât ?. Son aire de répartition réduite, sa fidélité aux sites favorables en font une espèce fragile classée ‘quasi menacée’ par l’UICN (?). Son répertoire vocal est constitué d’émissions brèves à très haute fréquence, supérieure à 100 kHz (?), aucun sifflement n’ayant été enregistré. La figure 4, tirée ?, montre l’aspect typique d’une émission sonore, en représentation temporelle puis en représentation fréquentielle.

## 1.6 Matériel

Le matériel d'enregistrement, 'Highblue' (<https://smiot.univ-tln.fr/index.php/highblue/>) utilisé pour l'étude préliminaire du site, a été fourni par l'Université de Toulon. Il est construit par l'unité SMIoT, et les éléments qui le constituent sont décrit ci-dessous.

- Une carte d'acquisition dédiée, QHB (Qualilife HighBlue), permettant l'acquisition de plusieurs signaux (ici deux maximum) en parallèle, en très basse consommation (2 à 4 W). La fréquence d'échantillonnage peut être réglée jusqu'à 512 kHz, la dynamique choisie entre 8, 16 et 24 bits. Le stockage des données est effectué sur une carte SD de 512 Go. La carte est alimentée par 7 à 28 piles type D (capacité de 24 kWh).
- Deux hydrophones C55 et C57 de Cetacean Research (<http://cetaceanresearch.com/>), à transducteur cylindrique (omnidirectionnels à basse fréquence - moins de 10 kHz, et sensibles dans le plan normal en hautes fréquence). Leur réponse en fréquence est linéaire à -12 dB près de 8 Hz à 100 kHz (référence constructeur) et au-delà de 150 kHz selon nos calibrations postérieures. Les hydrophones peuvent être tous les deux montés, de façon à obtenir un effet stéréo et permettre une localisation partielle des sources, mais il est aussi possible de ne monter qu'un seul hydrophone (voir figure 5).
- Un tube en plexiglas transparent, étanche jusqu'à 100 mètres, destiné à recevoir l'électronique et l'alimentation, équipé de pieds et de deux supports pour les hydrophones.

Le matériel 'C-Pod' (<https://www.cpodclickdetector.com/>) est un appareil qui n'enregistre pas le flux acoustique mais enregistre la date pour chaque détection d'un clic.

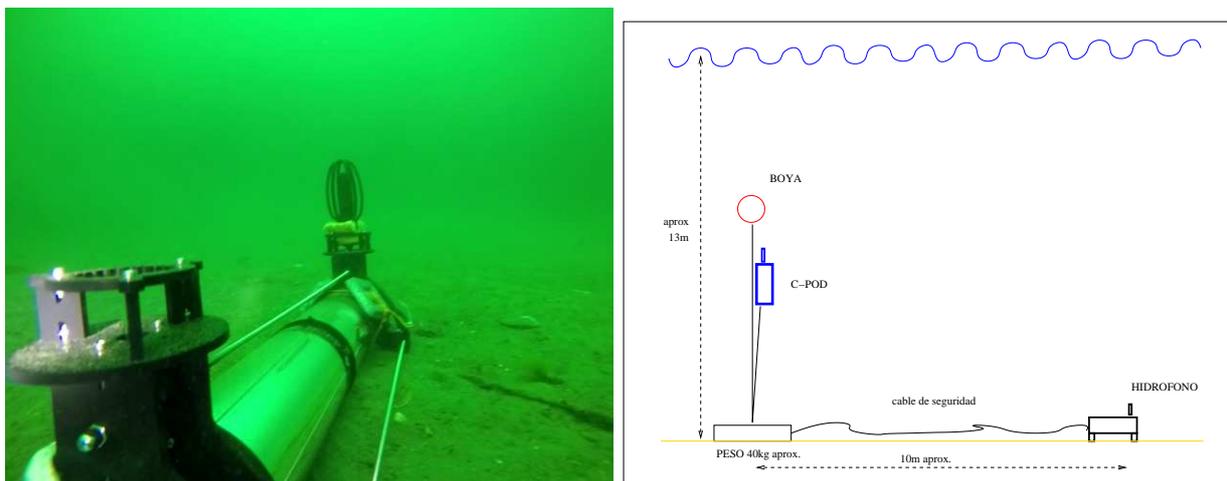


Figure 5: A gauche : appareil installé dans le fjord de Puyuhuapi. A droite : schéma de l'installation complète.

## 1.7 Réglages de l'appareil d'enregistrement

Il n'est pas classique d'installer du matériel de suivi à moyen ou long terme pour l'étude des petits cétacés. En effet, ces espèces émettent à des fréquences très élevées (voir section 1.5), ce qui impose d'utiliser la fréquence d'échantillonnage maximale, soit 512 kHz. Avec une telle rapidité, l'espace de stockage se remplit très rapidement et ne permet pas une grande autonomie. À terme, l'instrument QHB est prévu pour intégrer, dans son électronique, un détecteur embarqué qui lui permettra de ne se déclencher que lorsqu'un son a été reconnu, économisant ainsi et la puissance consommée et l'espace de stockage. Pour l'instant néanmoins, nous ne disposons que de 512 Go de stockage, ce qui correspond, pour 2 voies d'enregistrement en 24 bits, à environ 45h d'écoute (soit un peu moins que deux jours). Pour pouvoir augmenter l'autonomie de l'appareil, il faut enregistrer un volume de données moindre. Dans ce but, il est possible de programmer l'appareil pour obtenir un mode de fonctionnement fractionné. L'alimentation, elle, n'est pas un frein, puisque la consommation ne dépasse pas 4W pour deux hydrophones et la carte d'acquisition. Nous avons donc une autonomie énergétique de l'ordre d'une semaine.

Pour réduire le volume de données et augmenter l'autonomie de l'appareil et dans une optique d'une première campagne d'enregistrement, nous avons décidé de n'utiliser qu'une seule voie. Ce choix revient à ne pas pouvoir

localiser les sons, néanmoins il est adapté aux objectifs scientifiques présentés au début de ce rapport. En revanche, nous avons fait le choix de conserver la dynamique de 24 bits de l'enregistreur, bien qu'elle soit consommatrice d'espace disque. En effet, les signaux émis sont de faible intensité et il est important de ne pas réduire la portée acoustique de l'instrument (étudiée en détail dans l'annexe 6.1). De même, nous avons choisi un fonctionnement fractionné à 95% (9 min 30 s ON, 30 s OFF), proche d'un enregistrement continu, pour maximiser les chances d'enregistrer des émissions sonores. Nous avons donc, avec le montage proposé (rythme d'enregistrement à 95%, une seule voie, en 24 bits) une autonomie de presque 4 jours, limitée par le stockage des données. L'autonomie en batterie étant d'une semaine nous avons décidé de faire deux sessions d'enregistrement, une de 4 jours suivi d'une autre de 3 jours entre le 4 et le 11 mai 2021.

Résumé des réglages de 'HighBlue' : 1 canal, 512 kHz de fréquence d'échantillonnage, dynamique 24 bits et enregistrement 95% du temps (9,5 min ON, 30s OFF).

## 2 Diffusion scientifique

### 2.1 Conférence

L'association "agrupación de turismo náutico y conservación de cetáceos Puerto Cisnes" a invité Julie Patris, Franck Malige et Madeleine Hamame à donner une conférence le 4 mai 2021, dans un local de la communauté. La rencontre a de plus été transmise en direct sur le réseau social de l'association, ce qui a permis des échanges plus larges. Nous avons pu échanger des informations aussi bien sur la bioacoustique (et notamment les expériences déjà menées au Chili, avec l'écoute du chant spécifique chilien de la baleine bleue) que sur la présence des cétacés dans la zone, le type de tourisme qui s'y pratique, et les possibilités de planifier des études à long terme pour une meilleure connaissance de ces espèces.

### 2.2 Presse

Une note de presse a été rédigée par M. Hamame (?), dans laquelle les enjeux du projet, et sa mise en place, sont détaillés. Grâce à cette note, plusieurs organes de presse locaux se sont fait le relais de l'information, tels que "El Divisadero", "Tehuelche Noticias" et d'autres.

### 2.3 Matériel audiovisuel

F. Malige a monté une petite production audiovisuelle pour expliquer le projet et faire entendre les sons des dauphins (?). En effet, à la fin de la rencontre du 4 mai, nous avons souligné l'importance d'un retour de la part de l'équipe scientifique vers les acteurs locaux, pour informer des données et résultats obtenus et en faire part à la communauté locale. Dans ce but, la production vidéo montre l'appareil immergé, le travail des chercheurs, ainsi que les magnifiques images qu'a pu enregistrer le plongeur C. Maldonado lors d'une rencontre avec les petits dauphins chiliens. Quelques extraits permettent d'entendre le son émis par les animaux, grâce à une réduction de la fréquence émise d'un facteur 10.

## 3 Résultats de l'enregistreur 'HighBlue'

### 3.1 Installation et maintenance

Le 4 mai 2021, la zone indiquée par les opérateurs touristiques de Puerto Cisnes a été examinée afin de trouver un lieu relativement calme, peu profond, et fréquemment visité par au moins une des espèces de dauphins côtiers (voir figure 1), dans le canal de Puyuhuapi, en face de Puerto Cisnes. L'instrument a été déposé par 13 mètres de fond, lesté de 4 plombs de plongée (de 2 kg chacun, deux fixés en ceinture, plus un sur chaque pied). Le fond est plat et sablonneux, peuplé de nombreux crabes, le courant faible. La température de l'eau est de 8°C. L'instrument est relié par une corde de sécurité, de dix mètres de long, à un corps mort d'une cinquantaine de kilos supportant un autre instrument (le C-Pod de nos partenaires du CIEP) et marqué par une bouée maintenue à deux mètres sous la surface. Les piles étaient neuves, la tension totale mesurée à 33 V avant immersion. Un schéma résumant l'installation est donné dans la figure 5, à droite.

L'instrument a été déposé le 4 mai vers 11h30 heure locale (15h30 UTC), et récupéré le 8 Mai vers 10h heure locale, les LED de la carte d'acquisition clignotant normalement. La carte de stockage 512 Go a été changée, la tension totale mesurée à 26 V. L'instrument a été remis à l'eau dans la foulée après un test où les LED se sont bien allumées

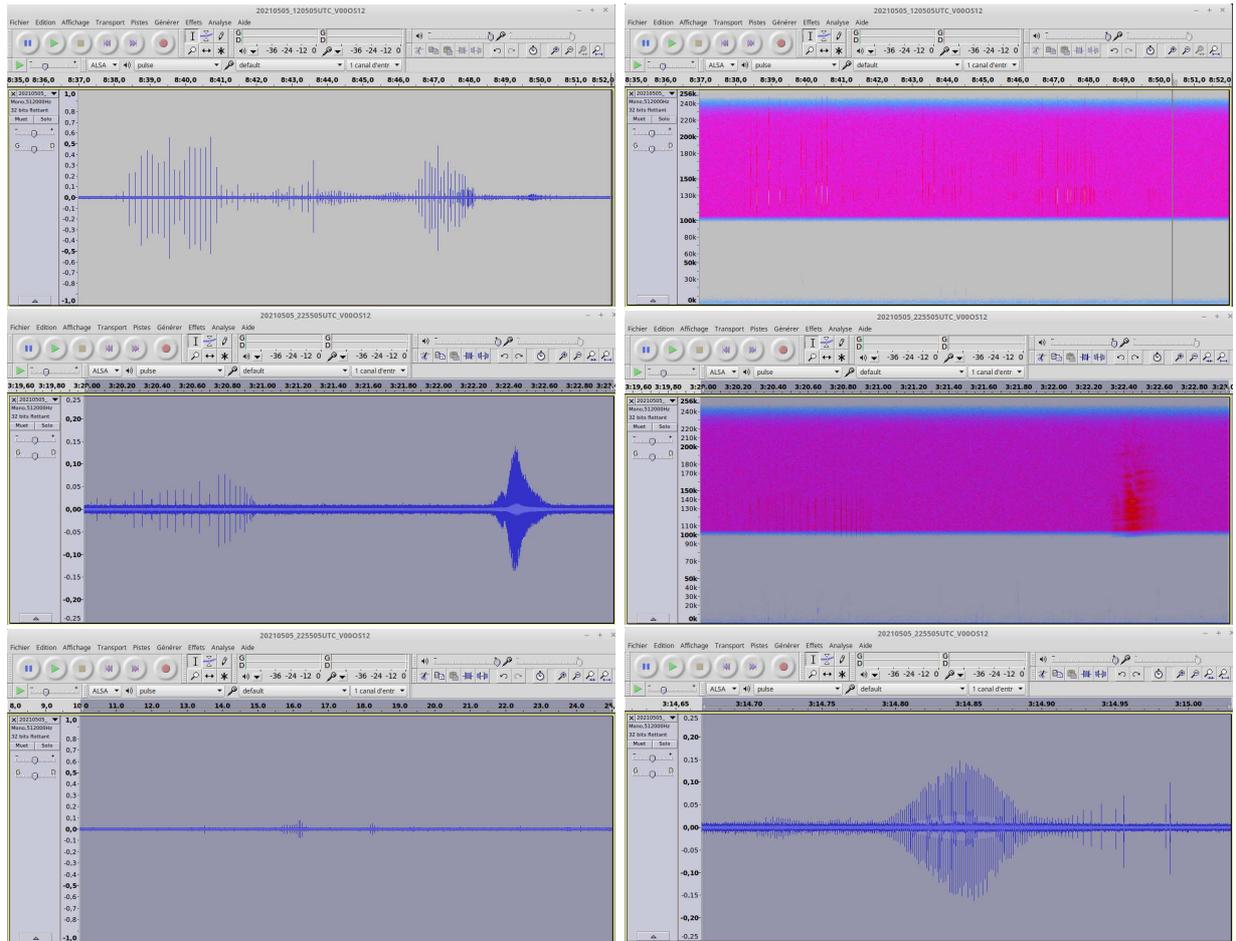


Figure 6: Exemples de séries de clics enregistrés entre le 4 et le 6 mai 2021. Les données ont été filtrées avec Audacity, avec un filtre qui atténue de 30 dB les fréquences sous 100 kHz et augmente de 30 dB celles au dessus de 100 kHz. En haut : une série classique de clics en forme d'onde (gauche) et en spectrogramme (droite, FFT 4096 points, fenêtre Hanning). Centre : une série de clics suivie par un buzz en forme d'onde (gauche) et en spectrogramme (droite, FFT 4096 points, fenêtre Hanning). En bas : deux séries de clics en forme d'onde : une série faible (gauche) et un zoom sur un buzz (droite).

pendant 9'30", puis éteintes, puis rallumées selon le protocole choisi. Pendant la première manœuvre (récupération de l'instrument), deux dauphins chiliens (*Cephalorhynchus eutropia*) sont restés très proches de l'instrument (voir figure 7). Enfin, nous l'avons définitivement sorti de l'eau le 11 mai vers 10h (heure locale), les LED clignotant normalement. La tension en sortant de l'eau est mesurée à 24 V.

### 3.2 Données obtenues

Lors de la première session ('Puerto Cisnes 1'), 339 fichiers de 875 Mo chacun ont été enregistrés, les dates des fichiers correspondant au moment où l'appareil a été allumé jusqu'à la date du 6 mai, 23h55 UTC. Soient 56 heures d'enregistrement (deux jours et 8 heures) et 298 Go de données. Lors de la deuxième session, ('Puerto Cisnes 2'), 281 fichiers de 875 Mo ont été enregistrés, les dates des fichiers correspondant au moment où l'appareil a été allumé jusqu'à la date du 10 mai, 14h49 UTC. Soient 48 heures d'enregistrement et 255 Go de données. Pendant les deux sessions, l'appareil a donc fonctionné pendant environ deux jours avant de s'arrêter, ce qui montre que la version actuelle de 'HighBlue' manque encore de stabilité de fonctionnement.

Nous avons rapidement parcouru certains fichiers à l'oeil, puis développé et caractérisé un détecteur (voir section 4). Dans la deuxième série de données, de nombreuses phases de bruit de type électronique empêchent de traiter facilement les données, mais quelques clics (faibles) ont été identifiés. On note que bien que les fichiers enregistrés lors de la première session sont de très bonne qualité acoustique, une bonne sensibilité et peu de bruit en haute fréquence.

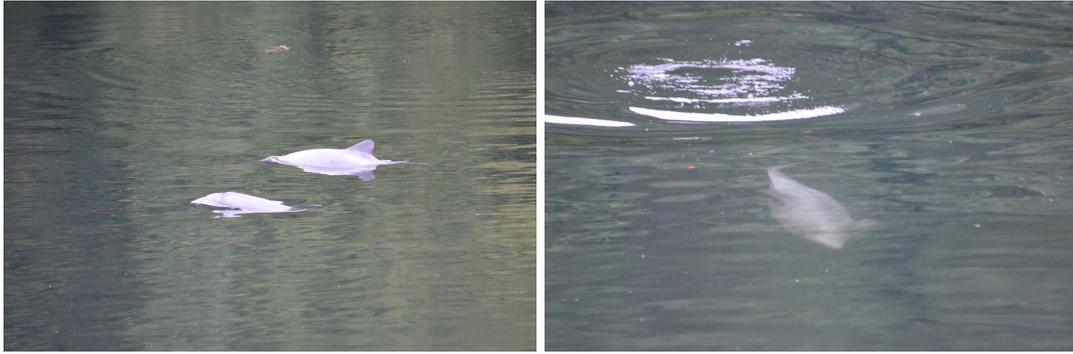


Figure 7: Photos de dauphins chiliens *Cephalorhynchus eutropia* prise le 8 mai dans la zone d'étude (Crédit photos : Catalina Paz Jorquera).

En basse fréquence, on entend beaucoup de bruit provenant de bateaux transitant dans la zone ainsi que des industries de production de saumons, situées à environ deux kilomètres du lieu choisi.

### 3.3 Sons enregistrés

De nombreuses séries de clics de haute fréquence ont été trouvés dans les enregistrements entre le 4 et le 6 mai. Généralement, ce sont des séries d'une dizaine de clics mais il y a aussi de nombreux buzz de clics, séquence durant laquelle le temps entre deux clics consécutifs est très court. Des exemples des signaux enregistrés sont montrés dans la figure 6. Ces clics, de haute fréquence (au dessus de 100 kHz) et faible largeur de bande, sont les émissions typiques des petits dauphins côtiers du Chili (voir figure 8) .

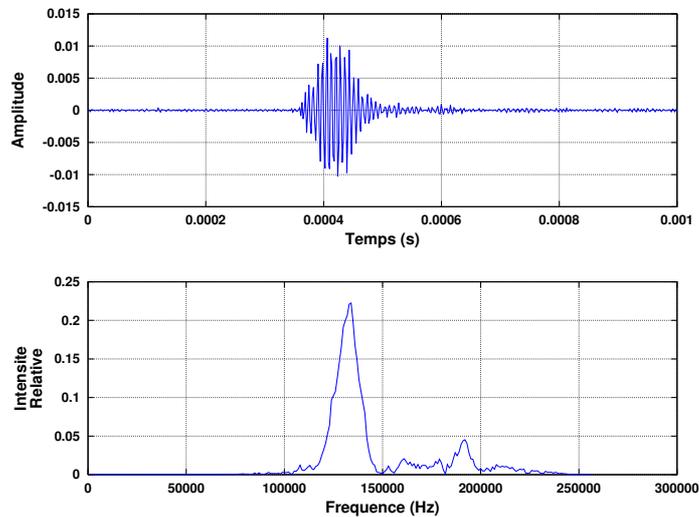


Figure 8: Aspect d'un clic de dauphin enregistré lors de l'expérience (forme d'onde et spectre après filtrage en passe-haut à 100 kHz).

Les précédentes études des productions sonores de dauphins côtiers du Chili ont toujours été des enregistrements opportunistes (depuis un bateau avec moteur éteint) et relativement courts, avec confirmation visuelle de l'espèce. Si ce type d'enregistrement donne beaucoup de renseignements sur le lien entre comportement et émissions sonores, l'expérience que nous avons mise en place est une étape importante pour passer à des suivis à long terme et des enregistrements avec le moins d'intervention humaine possible.

## 4 Détection des clics

Pour analyser les sons enregistrés par 'HighBlue', nous avons commencé par développer un détecteur de clics de haute fréquence que nous avons fait passer sur les données de la première session, du 4 au 6 mai.

### 4.1 Stratégie de détection

La stratégie de détection mise en oeuvre fut la suivante :

- Pour chaque fichier enregistré, nous avons passé un filtre passe-haut à 100kHz (filtre Butterworth d'ordre 5) pour filtrer tous les sons considérés dans cette étude comme du bruit ambiant (bruit de bateau, des industries saumonières, des vagues, du vent, etc.).
- Nous avons sélectionné chaque moment où le signal, en forme d'onde, dépasse un seuil défini comme un multiple  $m_1$  de l'écart type des valeurs du fichier filtré. Lors de cette étape, on sélectionne les signaux de grande intensité par rapport au bruit, dont font partie les clics recherchés mais aussi des coups sur l'appareil, qui sont en général de bande de fréquence large, atteignent souvent 150 kHz et peuvent être confondus avec les clics recherchés. Ces coups sont généralement produits par des crustacés (crabes, crevettes) qui passent près ou sur l'appareil.
- En chaque point de la sélection ci-dessus, nous calculons le spectre d'une seconde du signal non-filtré (FFT de 512 points), de façon à comparer l'énergie présente à haute fréquence par rapport à l'énergie en moyenne fréquence en ce point. Nous sélectionnons uniquement les instants qui ont  $m_2$  fois plus d'énergie moyenne dans la bande 120-140 kHz que dans la bande 30-90 kHz.  $m_2$  définit donc un autre seuil. Cette étape permet de sélectionner plus efficacement les clics qui sont de bande étroite et rejeter les coups, qui présentent plus d'énergie en moyenne fréquence qu'en haute fréquence.

Le programme, écrit en OCTAVE (?) est donné en annexe 6.2. Pour ajuster le détecteur et choisir les seuils  $m_1$  et  $m_2$  les plus efficaces, on a annoté manuellement les dates des clics de dauphins côtiers trouvés dans deux fichiers audio : le fichier 20210505\_003505UTC.V000S12.wav où sont présents 523 clics de dauphins et quelques coups sur l'appareil et le fichier 20210505\_225505UTC.V000S12.wav où aucun clic n'est présent mais où sont présents de nombreux coups (ou sons courts à large bande). Ensuite, nous avons fait passer le détecteur sur ces deux fichiers en changeant les valeurs des seuils et nous avons construit les courbes de ROC (receiver operating characteristic) correspondantes. Plus précisément, pour chaque valeur de  $m_1$  et  $m_2$ , nous avons mesuré le pourcentage de faux négatifs (en abscisse) et de vrai positifs (en ordonnée) dans la figure 9.

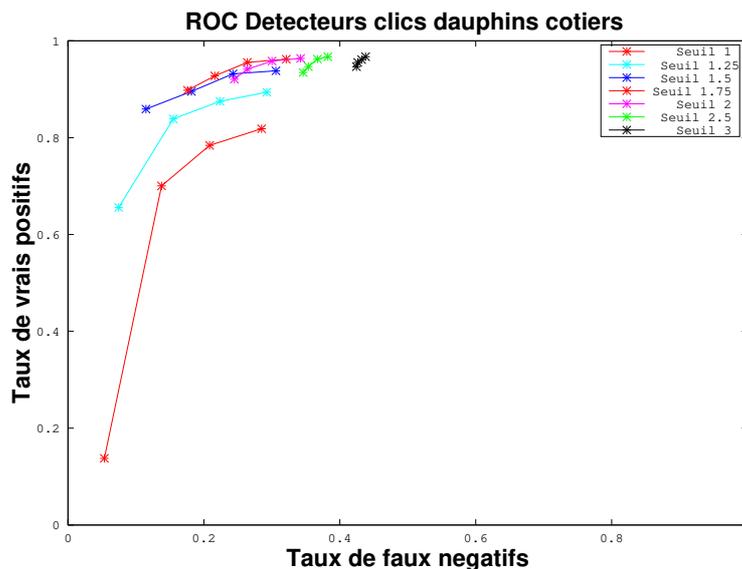


Figure 9: Courbes de ROC (receiver operating characteristic), pour différentes valeurs de  $m_1$  et  $m_2$ . Chaque courbe est donnée pour une valeur de  $m_2$  (qui est précisée dans le cadre en haut à droite) et les différents points qui la composent correspondent respectivement aux valeurs 4, 6, 8 et 10 de  $m_1$  (de gauche à droite)

En se basant sur ces résultats, nous avons sélectionné les seuils  $m_1 = 6$  et  $m_2 = 1.25$ , en prenant aussi en compte le temps de calcul, qui est plus grand si la valeur de  $m_1$  est plus basse. Avec ces valeurs, on estime un pourcentage de faux négatifs d'environ 17% et un pourcentage de vrais positifs autour d'environ 84% pour un temps de calcul raisonnable.

## 4.2 Résultats des détections

Nous avons ensuite passé le détecteur présenté dans la section précédente sur tous les fichiers de la session 1 d'enregistrement (du 4 au 6 mai). On a détecté environ 13000 clics, répartis en 23 passages, présentés dans la figure 10. Dans cette figure, on indique en gris les phases de nuit, en se basant sur les données de l'IMCCE (<http://imcce.fr>) et aussi le niveau de la marée en se basant sur les données du SHOA (<http://shoa.cl>). Cette base de donnée de clics, que nous comptons mettre à disposition des chercheurs intéressés est probablement celle qui contient le plus grand nombre de clics de dauphins côtiers de Patagonie enregistrés à ce jour.

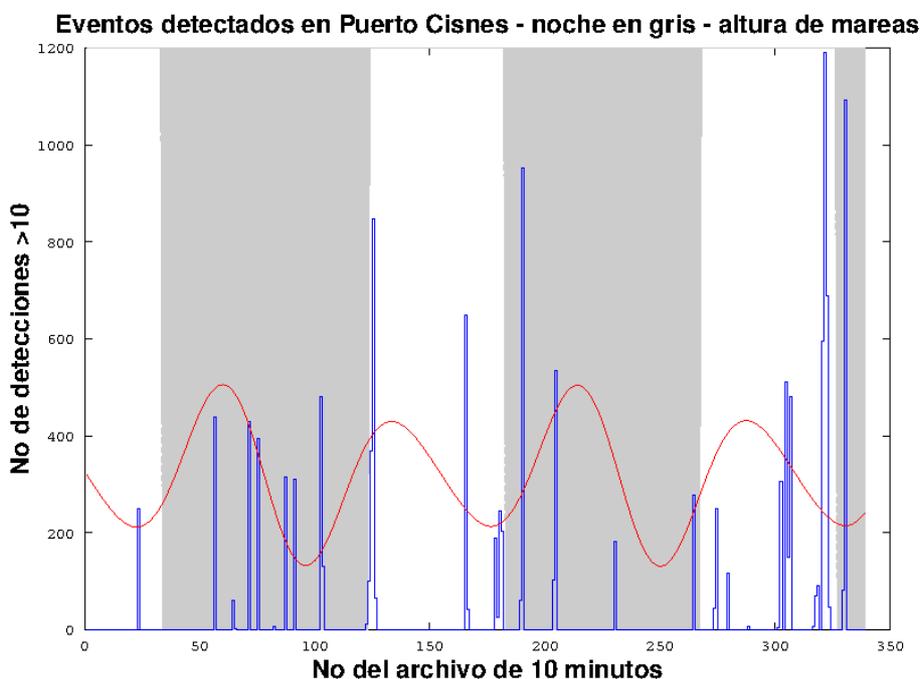


Figure 10: Détections de clics de dauphins entre le 4 et le 6 mai. En abscisse, le numéro du fichier. Les nuits sont indiquées avec un fond gris. Le niveau de la marée est indiqué en rouge.

Nous avons mesuré, de plus, pour chacun des 23 passages où se trouvent des clics, la durée de chacune de ces phases et les intervalles entre deux phases successives. Les résultats sont présentés dans la figure 11. La durée moyenne de chaque phase est de 10 minutes environ, avec une grande dispersion. Le nombre moyen de clics enregistrés lors d'un passage est d'environ 500.

D'après cette analyse rapide, un groupe de dauphins visite le site de l'étude en moyenne toutes les trois heures. En première analyse, ces passages n'ont pas l'air corrélés ni avec les marées ni avec le cycle jour-nuit. Ces 13000 clics de dauphins détectés entre le 4 et le 6 mai sont probablement des clics de dauphins chiliens (*Cephalorhynchus eutropia*), vu la présence récurrente de groupes dans la zone d'étude attestée par les opérateurs touristiques ainsi que la présence le 8 mai de ces dauphins lors du changement de la carte mémoire de l'équipement. Aucune autre espèce n'a été aperçue dans ce lieu par les opérateurs touristiques, qui ont en revanche signalé la présence de dauphins austraux (*Lagenorhynchus australis*) près de l'embouchure d'une rivière à quelques kilomètres, sur l'autre rive du canal, ainsi que des trois espèces au fond du fjord Magdalena, à une dizaine de kilomètres.

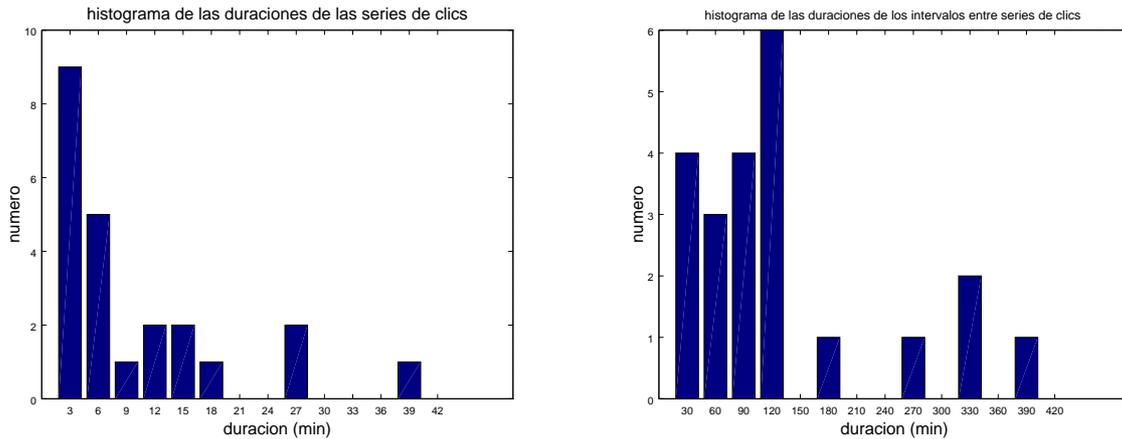


Figure 11: Gauche: Histogramme des durées des séries de clics. Droite : Histogramme des durées des intervalles entre deux séries de clics.

## 5 Conclusion et futurs projets

### 5.1 Travail d'analyse à venir

Les données obtenues sont excellentes et vont nous permettre de continuer le projet. Leur analyse ne fait que commencer. Les pistes pour la suite sont les suivantes :

- Comparer les deux capteurs ('highBlue' et 'C-Pod') et mesurer les performances de détection du C-Pod. Le C-Pod est actuellement encore dans la zone d'étude et nous attendons de pouvoir accéder aux données enregistrées.
- Etudier le comportement des animaux, en particulier développer des modèles analysant leur présence spatiale.
- Développer des modèles mathématiques des clics permettant de mieux mesurer leur paramètres, de mieux comprendre leur production et leur usage.

### 5.2 Projets futurs

Cette étude souligne la nécessité de développer du matériel de bonne qualité permettant l'enregistrement à haute fréquence sur du moyen terme. C'est d'autant plus vrai qu'il n'existe aucune étude, à notre connaissance, qui utilise ce mode opératoire d'un instrument autonome enregistrant à très haute fréquence. L'instrument 'HighBlue' et ses futures versions sont donc extrêmement utiles pour ces espèces : il fournit plusieurs jours d'autonomie à haute fréquence ce qui est rare. Nous avons été sollicités pour l'utiliser dans le détroit de Magellan, pour une espèce proche du dauphin chilien, le dauphin austral, si possible au deuxième semestre 2021. Donc, à court terme, c'est un très bon instrument pour ce genre de mesure, surtout si on réussit à le rendre plus stable.

A long terme, une utilisation très intéressante de l'appareil serait de l'utiliser en détecteur / enregistreur : pour ces animaux émettant à très haute fréquence, les émissions sonores sont faciles à détecter (beaucoup d'énergie au-dessus de 100 kHz, aucune en dessous). On pourrait donc imaginer que la carte détecte un clic et commence l'enregistrement, ce qui est un des buts actuel de l'équipe SMIoT dans le développement des cartes d'acquisition. Actuellement, l'appareil le plus utilisé pour le suivi de ces espèces est le C-POD, qui est un détecteur mais qui n'enregistre pas le son, c'est donc une boîte noire, on ne peut pas vérifier ni caractériser finement les détections.

Un autre usage de Highblue qui serait très intéressant pour nous serait de réussir à monter encore en fréquence, même en perdant en autonomie : ainsi, on pourrait faire quelques mesures sur place avec un bon échantillonnage du signal, ce qui serait fondamental pour l'étude mathématique des signaux, qui, dans notre cas, consiste en une modélisation d'un clic par une ou plusieurs ondelettes de Gabor pour en mesurer précisément les caractéristiques.

Enfin, nous avons été sollicités par un autre collègue pour l'utilisation de l'instrument en mode 'Caméra acoustique' (comme utilisée par François Sarano pour les cachalots de l'océan indien) : plusieurs hydrophones, permettant une localisation du son, et une caméra visuelle associés, le tout sur un instrument portable. En effet, sur la côte chilienne, on connaît très peu les émissions des différentes espèces (et notamment des poissons) et ce mode d'utilisation permettrait d'attribuer un son à une espèce, et de commencer des catalogues d'identification de sons d'invertébrés. Nous allons

utiliser l'instrument dans ce mode en juillet 2021, d'abord pour les otaries, mais aussi éventuellement pour des espèces d'invertébrés, avec le collègue concerné.

## 6 Annexes

### 6.1 Estimation de la portée de l'instrument

On présente ici une estimation de la portée (c'est à dire la distance maximale à laquelle un individu appartenant à une espèce cible peut être détecté) de l'instrument utilisé dans le cadre du projet de bioacoustique marine en collaboration avec le CIEP. Deux modes peuvent être envisagés pour l'acquisition : soit le signal est codé sur 16 bits, soit il est codé sur 24 bits. Naturellement, la portée de l'instrument sera différente selon le mode de fonctionnement envisagé.

#### 6.1.1 Principe du calcul

**Idée générale** Pour connaître la distance maximale à laquelle on peut détecter un animal, il est nécessaire de détailler l'ensemble du processus par lequel passe le signal, soit :

- 1 - l'émission du son par l'animal,
- 2 - la transmission du son par le milieu (et le bruit éventuel généré par le milieu),
- 3 - l'acquisition du son par le récepteur, et sa transformation en information.

Dans ce cadre, on peut estimer quel est le niveau minimum de son reçu par l'appareil qui permette de percevoir une information. Puis, si on a une connaissance du niveau de son émis par la source, ainsi que du niveau d'atténuation du son dû à sa transmission dans l'eau (qui dépend a priori de la distance), on peut en déduire une distance maximum au delà de laquelle le son émis par l'animal ne correspond pas à une information délivrée par l'appareil (il n'y a donc pas de détection du signal), soit parce qu'il est, lors de sa réception, trop faible pour être détecté de façon significative, soit parce qu'il se situe alors très en deçà du bruit.

**Formalisme en décibels** L'intensité du son est en général mesurée de façon logarithmique, et on définit le 'niveau' reçu en décibel par  $I_{dB} = 20 \log \frac{p}{p_0}$ . Dans cette expression, la pression  $p$  peut être définie de différentes manières ; les plus communes sont : une valeur d'amplitude maximale ou pic à pic (la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale) , ou bien une valeur efficace (ou rms), calculée sur une longueur de temps à définir.  $p_0$  est la pression de référence, établie par convention à  $1 \mu\text{Pa}$  dans l'eau (en général, cette référence est de  $20 \mu\text{Pa}$  dans l'air).

On définit alors les niveaux suivant:

- niveau de la source :  $SL$  ('source level') est l'intensité que recevrait un récepteur placé à un mètre de la source sonore. Dans le cas d'un dauphin, le son émis est partiellement directionnel, on considérera, sauf mention du contraire, que ce niveau est le maximum possible (donc capté en face de l'animal, en général);
- pertes dues au milieu :  $TL$  ('transmission loss') est la perte d'intensité, en dB, entre deux points - c'est une fonction de la distance entre ces deux points, voire de la position de chacun des points dans le cas d'une transmission non homogène (nécessitant un modèle de propagation du son un peu précis);
- niveau de bruit ambiant :  $NL$  ('noise level') regroupe tous les sons émis par l'environnement autres que le signal lui-même, à la fréquence d'intérêt;
- niveau reçu :  $RL$  ('received level') est l'intensité en décibel mesurée par le récepteur. Il peut être mesuré lorsque l'appareil de mesure est étalonné, c'est-à-dire que l'on connaît la correspondance entre le signal reçu et l'information fournie (sensibilité du capteur).

Le niveau de signal reçu peut s'écrire, grâce aux échelles logarithmiques utilisées, comme une simple soustraction entre le niveau émis et les pertes en lignes :

$$RL = SL - TL \quad (1)$$

Par ailleurs, le signal reçu ne doit pas être noyé par le bruit, on considérera donc que, pour qu'une information puisse être interprétée, le niveau de signal reçu devra être supérieur au bruit du milieu ambiant, soit :

$$RL > NL \quad (2)$$

#### 6.1.2 Niveaux émis par la source

Comme mentionné dans la partie principale du rapport, l'expérience cible trois petits cétacés côtiers, tous observés par nos partenaires dans le canal de Puyuhuapi : le marsouin de Burmeister (*Phocoena spinipinnis*), le dauphin austral (*Lagenorhynchus australis*) et le dauphin chilien (*Cephalorhynchus eutropia*). Parmi ces trois espèces, on s'intéressera spécifiquement au dauphin austral, dont une étude a permis d'estimer l'intensité de ses clics : Kyhn et al., 2010 ?.

Les auteurs définissent le niveau de source en utilisant la valeur efficace de la pression (en dB), prise sur la durée pendant laquelle le signal est supérieur en valeur absolue à son niveau maximal (en dB) moins 10 dB.

La valeur mesurée pour des clics se situant face au récepteur est de

$$(173 \pm 6) \text{ dB ref: } 1\mu\text{Pa (rms) @1m.}$$

### 6.1.3 Mesure du niveau reçu

Dans le cas de l'instrument utilisé dans l'expérience prévue, la chaîne de mesure est constituée de deux éléments :

- l'hydrophone ou transducteur entre énergie mécanique et énergie électrique. En tant que capteur, il est caractérisé par sa sensibilité, définie comme la réponse du capteur (une tension) divisée par son mesurande (la pression), soit ici :  $S = V/p$ . La sensibilité en dB est alors simplement :

$$S_{dB} = 20 \log \frac{S}{S_0} = 20 \log \left( \frac{V}{V_0} \times \frac{p_0}{p} \right), \text{ avec les références } V_0 = 1\text{V et } p_0 = 1\mu\text{Pa ;}$$

- la carte d'acquisition, qui échantillonne, numérise et stocke le signal électrique reçu, caractérisée par sa valeur maximale pleine échelle, qui permet de faire le lien entre la valeur numérique affectée à chaque échantillon du fichier son et la tension électrique reçue correspondante.

**Sensibilité des hydrophones** Les hydrophones utilisés sont fabriqués par la firme Cetacean Research, ils sont de type C55 et C57. Leur sensibilité dans la bande passante est fournie par le fabricant, elle a de plus été mesurée pour certains exemplaires à haute fréquence. Malheureusement, les exemplaires que nous utilisons ne sont pas ceux qui ont été re-calibrés en haute fréquence. Cependant les valeurs mesurées pour les trois hydrophones C57 re-calibrés sont très cohérentes entre elles, valant respectivement : -180 ; -181 et -182,5 dB ref: 1V/ $\mu$ Pa (voir section 6.3 et figure 15). Nous considérerons donc que les hydrophones utilisés se situent dans cette frange, et on utilisera la valeur suivante :  $S_{dB} = (-181 \pm 2) \text{ dB ref: } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ .

**Caractéristiques de la carte HighBlue** La valeur pleine échelle de la carte utilisée est donnée par le constructeur, Valentin Barchasz (SMIOT, université de Toulon), elle est de 3,3 V. Par ailleurs le gain de la carte est de 2. La tension fournie sur l'hydrophone peut donc être retrouvée à partir de la valeur lue sur le fichier par la formule :  $V_{\text{hydro}} = (\text{Val} \times 1,65)/2$ .

**Calcul de la valeur minimale de pression pour qu'un signal soit perçu** Considérons ici qu'une information est reçue à condition que :

- la valeur lue sur le fichier son soit dix fois supérieure à la précision (c'est-à-dire à la plus petite différence de valeur décelable),  
- le signal utile soit supérieur au bruit ambiant dû à l'environnement (ce point sera détaillé dans la partie ci-dessous, consacrée à l'influence du milieu).

Deux modes peuvent être envisagés pour l'acquisition : soit le signal est codé sur 16 bits, soit il est codé sur 24 bits. Naturellement, on s'attend à ce que la portée soit moindre si le signal est codé sur un nombre moindre de bits (perte en dynamique, donc en sensibilité). La précision pour un signal codé sur  $n$  bits est en effet donnée par la valeur maximale (de  $\pm 1$ , sur un fichier son) divisée par le plus grand nombre codé sur  $n$  octets,  $2^n$ . Nous avons donc ici :

- précision pour une dynamique de 16 bits :  $\mathcal{P}_{16} = 2/2^{16} = 2^{-15} \simeq 3.10^{-5}$
- précision pour une dynamique de 24 bits :  $\mathcal{P}_{24} = 2/2^{24} = 2^{-23} \simeq 1,2.10^{-7}$

Considérons ici qu'une information est reçue à condition que la valeur lue sur le fichier son soit dix fois supérieure à la précision (c'est-à-dire à la plus petite différence de valeur décelable). Cette condition peut être rapportée à la tension minimale qui doit être fournie par l'hydrophone pour qu'une information soit reçue (qu'un signal soit détecté) :  $V_{\text{HydroMin}} = (10 \times \mathcal{P} \times 1,65)/2$ , ce qui donne :

- tension minimale perceptible pour une dynamique de 16 bits :  $V_{\text{HydroMin16}} = (10 \times 3.10^{-5} \times 1,65)/2 = 2,5.10^{-4}\text{V} = 0,25 \text{ mV}$  ;

- tension minimale perceptible pour une dynamique de 24 bits :  $V_{\text{HydroMin24}} = (10 \times 1,2.10^{-7} \times 1,65)/2 = 9,8.10^{-7} \simeq 1 \mu\text{V}$  .

La sensibilité de l'hydrophone permet alors de remonter au niveau de pression (en dB) correspondant :  $S_{dB} = 20 \log \left( \frac{V_{\text{HydroMin}}}{V_0} \times \frac{p_0}{p_{\text{Min}}} \right)$ , d'où le niveau minimal de pression tel qu'on puisse percevoir le signal :

$$RL_{\text{Min}}(\text{dB}) = 20 \log \frac{p_{\text{Min}}}{p_0} = 20 \log \frac{V_{\text{HydroMin}}}{V_0} - S_{dB}$$

Si on applique ce calcul aux deux possibilités évoquées, on obtient :

- Niveau minimal de pression reçue pour qu'un signal soit perçu pour une dynamique de 16 bits :  
 $RL_{\text{Min16}}(\text{dB}) = 20 \log \frac{V_{\text{HydroMin16}}}{V_0} - S_{dB} = 20 \log(2,5.10^{-4}) - (-181) = -72 + 181 \simeq 109 \pm 2 \text{ dB}$
- Niveau minimal de pression reçue pour qu'un signal soit perçu pour une dynamique de 24 bits :  
 $RL_{\text{Min24}}(\text{dB}) = 20 \log \frac{V_{\text{HydroMin24}}}{V_0} - S_{dB} = 20 \log(9,8.10^{-7}) - (-181) = -120 + 181 \simeq 61 \pm 2 \text{ dB}$

### 6.1.4 Influence du milieu

Le milieu se manifeste de deux façons : d'une part il émet lui même des sons (qualifiés de bruit, puisque ce n'est pas le signal d'intérêt), d'autre part il modifie le son qu'il transmet (effet dit de propagation).

**Pertes dues à la propagation** Considérons tout d'abord les effets dus à la propagation. Ceux-ci peuvent être assez complexes. Néanmoins, en premier lieu on peut modéliser de façon très simple la propagation en considérant deux effets : d'une part une dilution géométrique de l'intensité sonore, et d'autre part l'atténuation spécifique à la fréquence considérée. Les deux effets dépendent de la distance, mais pas de la même manière (voir essentiellement Jensen et al . 2011 ?).

La dilution géométrique dans un milieu à trois dimensions peut en première approximation être estimée à une dilution sphérique, si on considère que l'énergie est répartie de façon homogène dans toutes les directions. Même si un clic peut être considéré comme relativement focalisé (cône d'émission réduit), la dilution géométrique reste sphérique, dans la mesure où la surface coupée par le cône s'évase en proportion du carré de la distance.

Les pertes dues à la dilution géométrique dépendent de la distance selon une loi de puissance (une puissance qui vaut 2 pour une dilution sphérique, et 1 pour une dilution cylindrique). En décibel, on peut donc modéliser mathématiquement les pertes par :  $TL_{sph} = 20 \log \frac{r}{r_0}$ , avec  $r_0 = 1$  m la référence des distances.

Les pertes dues à l'absorption dépendent de la distance de façon exponentielle, caractérisées par un facteur d'absorption  $\alpha$  qui dépend de la fréquence. La valeur de cette atténuation, en dB/m, peut être trouvée grâce à la formule simplifiée (1.47) proposée par Jensen et al. 2011 ?, c'est la même valeur utilisée par Kyhn et al. 2010 ?. On prendra donc, pour une fréquence de l'ordre de 130 kHz,  $\alpha = 0,04$  dB/m . Les pertes dues à l'atténuation sont donc modélisées par  $TL_{att} = \alpha r$ .

On déduit donc la forme générale des pertes dues à la propagation :

$$TL(\text{dB}) = 20 \log \frac{r}{r_0} + \alpha r \tag{3}$$

avec  $r_0 = 1$  m et  $\alpha = 0,04$  dB/m .

On pourra envisager l'utilisation d'un modèle plus fin de propagation, qui tient compte des effets dus à la bathymétrie, mais en premier approximation on restera sur ce modèle simple.

**Niveau de bruit ambiant** Pour connaître le niveau de bruit ambiant dans un milieu donné, l'idéal est naturellement de le mesurer sur place. Cependant, en l'absence de données locales, il est possible d'estimer cette grandeur, notamment dans le régime des très hautes fréquences, qui nous concerne. En effet, dans ce domaine de fréquence, il y a peu de source d'émissions sonores et le bruit est essentiellement d'origine thermique (dû à l'agitation moléculaire ?). Quelles que soient les sources, on constate que le niveau de bruit de l'environnement à 130 kHz est normalement inférieur à 60 dB (voir figure 12).

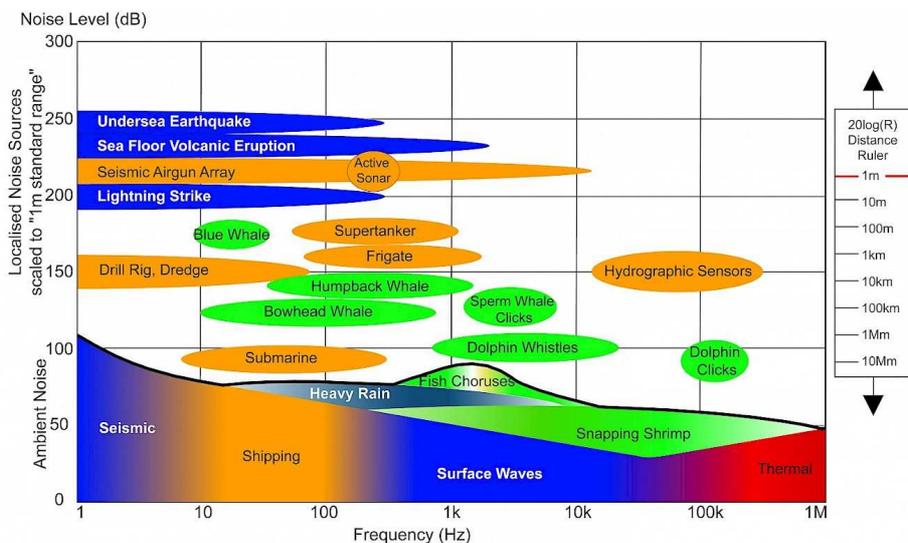


Figure 12: Sources de bruits dans l'océan. Pour les hautes fréquences, de l'ordre de 130 kHz, l'océan est calme, et le bruit dominé par l'agitation thermique. La plupart des sources anthropiques de bruit (bateaux, ...) n'émettent pas dans ce domaine de fréquence. Document tiré de <https://www.ospar.org/>

### 6.1.5 Résolution

Pour calculer la distance maximale à laquelle un clic peut être entendu, on va donc estimer la perte en ligne maximale (qui dépend de la distance) pour que le signal reçu soit :

- supérieur au bruit ambiant,
- suffisamment intense pour pouvoir être perçu par l'instrument.

On cherche donc  $TL_{Max}$  tel que  $RL > \max(NL, RL_{Min})$ .

On peut exprimer le niveau reçu  $RL$  par le niveau émis  $SL$  moins les pertes en ligne  $TL$ . On doit donc avoir  $SL - TL_{\text{Max}} > \max(NL, RL_{\text{Min}})$ . Finalement, en utilisant l'équation 3, on cherche  $r_{\text{Max}}$  tel que :

$$20 \log \frac{r_{\text{Max}}}{r_0} + \alpha r_{\text{Max}} < SL - \max(NL, RL_{\text{Min}})$$

Cette équation implicite en  $r_{\text{Max}}$  sera résolue graphiquement en utilisant la représentation de  $20 \log \frac{r}{r_0} + \alpha r$  illustrée sur la figure 13.

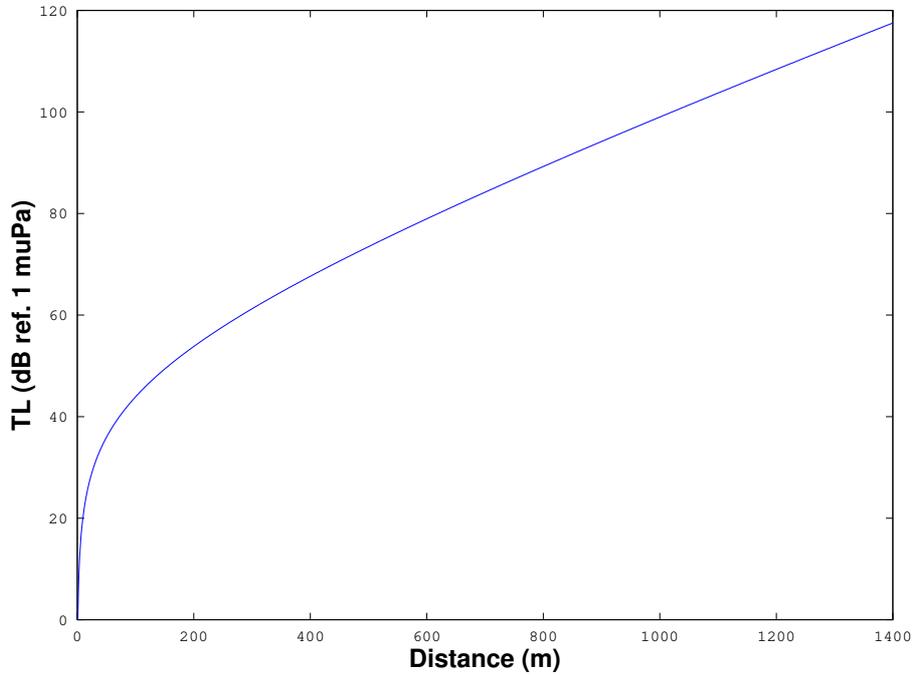


Figure 13: Représentation de la fonction  $f(r) = 20 \log \frac{r}{r_0} + \alpha r$  permettant de déterminer la distance maximale à laquelle peut être entendu un clic de dauphin austral.

Considérons les deux cas détaillés jusqu'ici (deux réglages différents de la sensibilité de la carte d'acquisition).

Dans le cas où la dynamique des données est de 16 bits, le niveau minimal requis pour déceler un signal (110 dB) est nettement supérieur au bruit ambiant : c'est donc le facteur limitant et on cherchera  $r$  tel que  $TL(r)$  soit supérieur à  $173 - 109 = 64$  dB. La courbe (voir figure 14, à gauche) donne dans ce cas une valeur de 340 m (si on considère les écarts de mesures, dûs essentiellement à la précision sur le niveau d'émission des sons, on obtient une valeur comprise entre 230 m et 475 m).

Dans le cas où la dynamique des données est de 24 bits, le niveau minimal requis pour déceler un signal (61 dB) est de l'ordre du bruit ambiant : on cherchera  $r$  tel que  $TL(r)$  soit supérieur à  $173 - 61 = 112$  dB. La courbe donne dans ce cas une valeur de 1280 m (si on considère les écarts de mesures, dûs essentiellement à la précision sur le niveau d'émission des sons, on obtient une valeur comprise entre 1100 m et 1500 m).

### 6.1.6 Conclusion

En conclusion, d'après notre étude, on s'attend à ce que la portée de notre instrument, pour le type d'espèces ciblées, soit de l'ordre de quelques centaines de mètres. On voit cependant qu'elle dépend beaucoup du choix des paramètres d'enregistrement. Alors qu'une dynamique de 16 bits ne permet pas d'enregistrer au-delà de 200 ou 300 mètres, le choix d'une dynamique de 24 bits permet d'atteindre la limite imposée par le bruit ambiant, c'est-à-dire de l'ordre de 1 km, ou un peu plus.

Dans tous les cas, il s'agit de la distance maximale à laquelle peut être détecté un animal : le dauphin ne sera pas détecté à cette distance si il n'émet pas dans la direction du capteur (ou si il est silencieux), ou si un obstacle, bruyant ou influençant la propagation, apparaît.

## 6.2 Programme OCTAVE pour les detections

```
% detector_todos : detecta clics de delfines en varios archivos
% inputs : - archivo 'liste.txt' con el listado de todos los archivos de interés
```

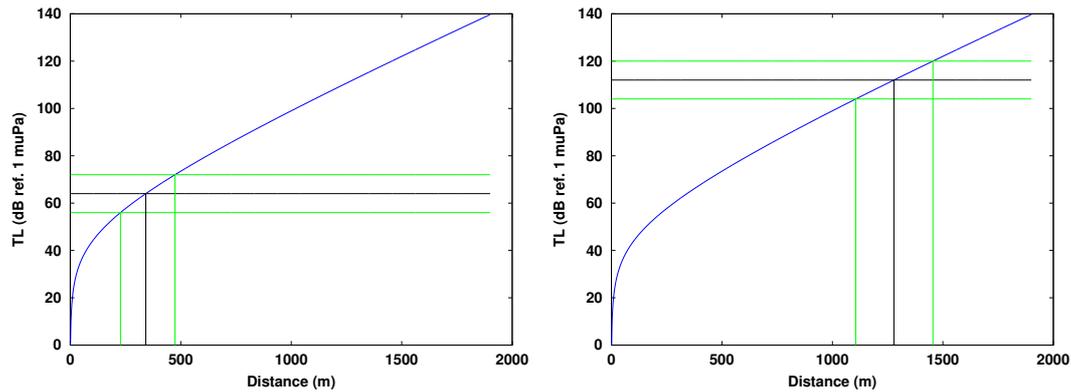


Figure 14: Résolution graphique du calcul de la distance maximale à laquelle un dauphin peut être détecté par notre appareil. A gauche, dans le cas d'une dynamique de 16 bits, à droite dans le cas d'une dynamique de 24 bits (qui correspond à la limite du bruit ambiant).

```

%      - archivos sonoros situados en /media/patris/Blanc4To/PuertoCisnes2_wav/
% outputs : - archivos de tipo RES**.txt con las fechas (en segundos) de cada clics, para cada archivo
%      - un archivo total con el conteo de clics por archivo llamado BilanTot.txt

clear
close all

% software grafico
graphics_toolkit('gnuplot')

% medicion del tiempo del calculo
tic();

% PARAMETROS

% Archivos

% Aqui se da el camino de la carpeta de archivos de sonido .wav que se quiere abrir
Camino = '/media/malige/donnees/BIOACOUSTIQUE/Donnees_CIEP/fichiers_interessants/';

% Listado de los archivos (se llama liste.txt y se encuentra en la misma carpeta que este programa)
NombreArchivo = textread('liste.txt','%s');

% Parametros de la busqueda de los clicks
% umbral para encontrar los clics
m1=16;
m2=1.25;
% frecuencia del filtro paso alto (Hz)
fcut=100000
% frecuencia de comparasion : banda [f1;f2]
f1=30000
f2=90000
% tiempo minimo entre dos clicks (en s) : es decir no vamos a registrar dos clicks diferentes si el tiempo entre los dos esta
menos que t_minimo. Para delfines costeros : 100 μs = 0.1 ms = 1/10000 s pero en nuestro caso para no tener la detecciones
de los rebotes pusimos t_minimo= 2 ms
t_minimo=2/1000
% t_trozo : tiempo de cada trozo analizado (en s)
t_trozo=29.99;

% Loop de todos los archivos

fileID = fopen('BilanTot.txt','w');
fprintf(fileID,'m2: %f, m1 %d, bande passante %d - %d ', m2,m1,f1,f2);
fprintf(fileID,' ');
fprintf(fileID,'Fichier n°b de détections ');

```

```

for k=1:length(NombreArchivo)
% Lectura del archivo .wav
NombreArchivo{k}
ArchivoSonido = [Camino NombreArchivo{k}];
ArchivoResultado = ['Res_' NombreArchivo{k}(1:15) '.txt'];
% Lectura de los parametros del archivo de sonido
[tamano_total, CHANNELS] = wavread (ArchivoSonido, "size");
[s,fm,dyn] = wavread(ArchivoSonido,[1 10]);
clear s;
% s : es el vector de medidas de sonido % tiempo total del archivo (en segundos)
tiempo_total_archivo_segundos=tamano_total/fm;
% numero de trozos de t_trozo s
N=floor(tiempo_total_archivo_segundos/t_trozo);
% Loop para contar los clicks cada minuto.
dates_clicks=[];
for i=1:N
t_entrada=(i-1)*t_trozo;
t_salida=t_entrada+t_trozo;
% extracto
inicioN = t_entrada * fm;
finN = t_salida * fm;
extrait=wavread(ArchivoSonido,[inicioN finN]);
senal = extrait(:,1);
% senal es el vector de medidas entre t_entrada y t_salida % senal0 = la senal filtrada con un filtro paso alto a fcut Hz
[butter1,butter2]=butter(5,fcut/(fm/2),'high');
senal0=filter(butter1,butter2,senal);
umbral = std(senal0)*m1;
% busqueda de las partes de la senal superiores al umbral
% n conta el numero de detecciones de estas partes (supuestamente los clicks)
n=0;
while (max(senal0) > umbral)
[x, ix] = max(senal0);
spectre=abs(fft(senal(max(ix-255,1):min(ix+256,length(senal)))));
energiea130 = mean(spectre(120:140));
energie_bande_passante=mean(spectre(f1/1000:f2/1000));
if (energiea130>m2*energie_bande_passante)
dates_clicks=[dates_clicks (i-1)*t_trozo+ix/fm];
n=n+1;
endif
% pone a cero la senal entre el max-t_minimo y el max+t_minimo asi cuando calcula de nuevo el max este max desapareció.
senal0(max(1,ix-floor(t_minimo*fm)):min(length(senal0),ix+floor(t_minimo*fm)))=0;
endwhile
% aficha el numero de clicks :
numeroclicks(i)=n;
clear senal;
clear senal0;
endfor % fin del loop en los trozos (i)
% sorteo de las fechas de clics
Dates_tries=sort(dates_clicks)';
nbclicks= sum(numeroclicks)
% escritura archivos de salida
dlmwrite(ArchivoResultado,Dates_tries)
fprintf(fileID,'%s %d ', NombreArchivo{k}, sum(numeroclicks));
endfor % fin del loop sobre los archivos (k)
% duracion total de calculo
duracion=toc
fprintf(fileID,");
fprintf(fileID,'Duree totale %f s ', duracion);
fclose(fileID);

```

### 6.3 Courbe de sensibilité de l'hydrophone utilisé

La courbe présentée dans la figure 15 permet d'avoir une idée de la sensibilité de l'hydrophone dans les hautes fréquences. L'hydrophone, de type C57 fabriqué par Cetacean Research, est vendu pour avoir une sensibilité plate (à -3dB) jusqu'à 100 kHz, cependant, des mesures faites à l'université de Washington sur plusieurs hydrophones de ce type montrent une très bonne réponse en fréquence y compris jusqu'à 150 kHz.

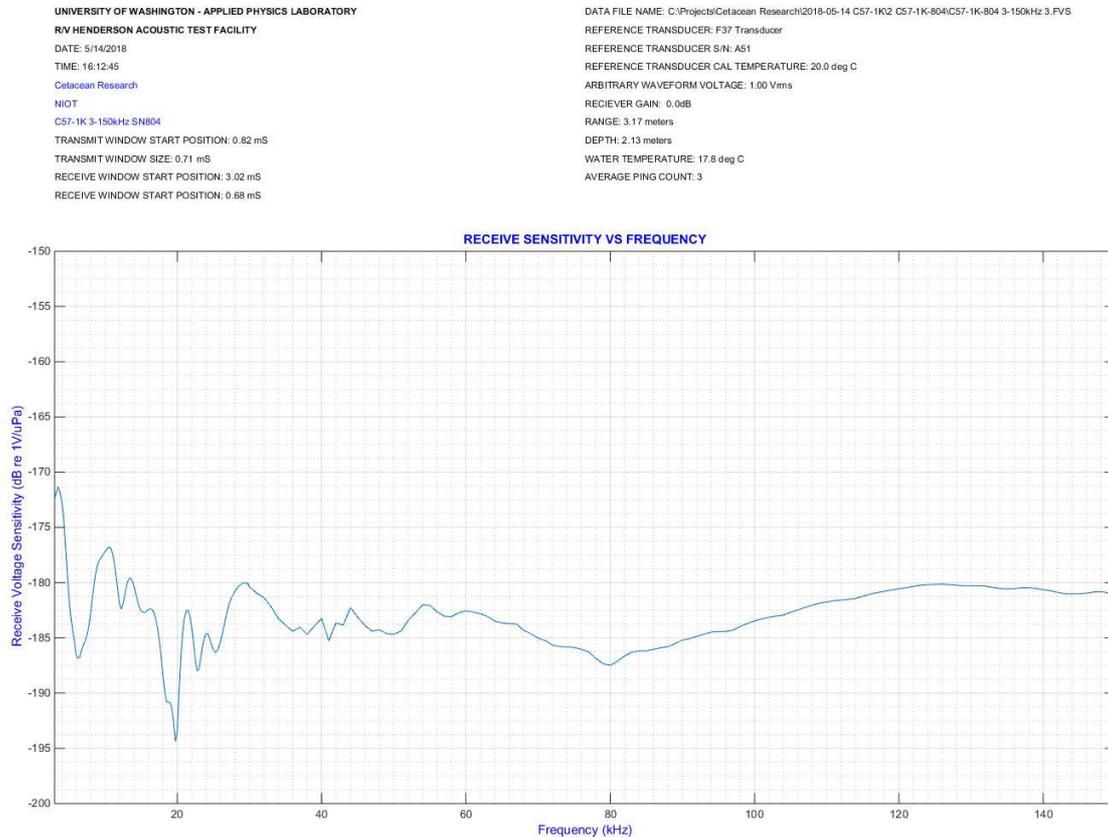


Figure 15: Calibration de la réponse d'un hydrophone de type C57 de Cetacean Research en haute fréquence. On voit que la sensibilité reste élevée même au-delà de la bande de fréquence nominale d'utilisation du capteur.

### 6.4 Logiciels utilisés

Les figures y calculs de ce rapport ont été réalisés grâce au logiciel AUDACITY et au langage de programmation OCTAVE (?).

## References

Eaton, J., Bateman, D., and Hauberg, S. (2009). *GNU Octave version 3.0.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations*. CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN 1441413006.

Götz, T., Antunes, R., and Heinrich, S. (2010). Echolocation clicks of free-ranging chilean dolphins (cephalorhynchus eutropia). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128:563-6.

Hammond, P., Bearzi, G., Bjørge, A., Forney, K., Karczmarski, L., Kasuya, T., Perrin, W., Scott, M., Wang, J., Wells, R., and Wilson, B. (2008). *Lagenorhynchus australis*. The IUCN Red List of Threatened Species.

- Hammond, P., Bearzi, G., Bjørge, A., Forney, K., Karczmarski, L., Kasuya, T., Perrin, W., Scott, M., Wang, J., Wells, R., and Wilson, B. (2012). *Phocoena spinipinnis*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- Heinrich, S., Genov, T., Fuentes-Riquelme, M., and Hammond, P. (2019). Fine-scale habitat partitioning of Chilean and Peale's dolphins and their overlap with aquaculture. *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst.*, 29:212–226.
- Heinrich, S. and Reeves, R. (2017). *Cephalorhynchus eutropia*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- Jensen, F., Kuperman, W., Porter, M., and Schmid, H. (2011). *Computational Ocean Acoustics*. Springer, 2 edition.
- Kyhn, L., Jensen, F., Beedholm, K., Tougaard, J., Hansen, M., and Madsen, P. (2010). Echolocation in sympatric Peale's dolphins (*Lagenorhynchus australis*) and Commerson's dolphins (*Cephalorhynchus commersonii*) producing narrow-band high-frequency clicks. *The Journal of experimental biology*, 213:1940–9.
- Mintzer, V., Diniz, K., and Frazer, T. (2018). The use of aquatic mammals for bait in global fisheries. *Front. Mar. Sci.*, 5(191).
- Pichinao, I., Rojas Martínez, I., Soto, C., Cabrera, R., and Boldt, J. (2019). Reporte de resultados: Censo fauna marina y avifauna en Raúl Marín Balmaceda. febrero 2019. región de Aysén. *Revista de Aysenología*, 7:49–57.
- Reyes, V., Marino, A., Dellabianca, N., Hevia, M., Torres, M., Rey, A. R., and Melcón, M. (2018). Clicks of wild Burmeister's porpoises (*Phocoena spinipinnis*) in Tierra del Fuego, Argentina: Notes. *Marine Mammal Science*, 34.
- Rojas-Mena, R. (2009). Caracterización del repertorio acústico del delfín chileno *Cephalorhynchus eutropia* (Gray, 1846) y del delfín austral *Lagenorhynchus australis* (Peale, 1848) en la isla de Chiloé, región de Los Lagos, Chile. Tesis de Grado.