



IN2SI

Soutien pour le développement des relations internationales

“BIOSSA”

Rappel du projet et bilan

Hervé Glotin, LIS, Toulon, mars 2022

7 pages + rapport recherche + article revue soumis

Titre long du projet	Biodiversity & Songs of South America
Acronyme du projet	BIOSSA
Nom et CV du porteur du projet (à joindre au projet) (projets Emergence et Accompagnement CH/EC)	Glotin Hervé CV = http://sabiod.org/pub/CV_GLOTIN2020.pdf
Unité de recherche (code ; sigle)	UMR 7020 ; LIS
Employeur du porteur	Université de Toulon
Adresse e-mail du porteur	glotin@univ-tln.fr
Demande de CDD (corps (IE ou IR) ; BAP)	nan
Montant demandé au CNRS	9 K€ (instrumentation scientifique)

PARTICIPANTS EFFECTIFS à l'Exécution du projet

Name	Institution	Status (Senior, post-doctoral investigator, PhD student)
GLOTIN Hervé (PI)	DYNI LIS, CNRS Toulon	SENIOR, Pr, Researcher, Chair IA bioacoustics
MALIGE Franck	DYNI LIS, CNRS Toulon	SENIOR, Associate Researcher
PATRIS Julie	DYNI LIS, CNRS Toulon	SENIOR, Associate Researcher
GIRAUDET Pascale	DYNI LIS, CNRS Toulon	SENIOR, Associate Researcher
FERRARI Maxence	DYNI LIS, CNRS Toulon	SENIOR, Post-doc
Valentin Barchasz	IM2NP CNRS Toulon	Ing.
Valentin Gies	IM2NP CNRS Toulon	Senior, HDR associate Pt
Sebastian Marzetti	IM2NP CNRS Toulon	Phd Student
Fabien de Varenne	PME SEAPROVE	Président
BUCHAN Susannah	COPAS Sur-Austral, University of Concepción, Chile	SENIOR, Associate Pr.
SOUSA-LIMA Renata	UFRN LaB Brazil	SENIOR, Professor, Researcher
M. Hamame	CIEP, Coyhaique	Director Center inter. Research Patagonia

Bilan financier :

Les crédits CNRS ont permis l'acquisition des systèmes d'écoute haute définition (bon de commande à SMIoT), une seule dépense.

Les dépenses de missions ont été prises sur le projet dual Chilien nommé JERES, PI Buchan cop PI Fr Glotin et qui a permis le déplacement de nos deux collègues Dr Agrégés normaliens : Julie Patris et Franck Malige.

Les dépenses de sous-systèmes ont été prises en charge par la Chaire IA ADSIL et son matériel de stockage et traitement.

La table des dépenses et photo du matériel sont ci-dessous.

Entité dépensière : **BIOSSA SE BIOSSA H. GLOTIN**

Crédits reçus : 9 016,00
Cumul consommé : 9 015,87
Cumul réservé : 0,00
Cumul facturé : 9 015,87

Disponible : 0,13

N° Cmde	Souche	Date Cmde	Nat	S	Fournisseur	Libellé	Montant Consommé sur exercice antérieur	Montant Consommé	Montant Réserve	Montant Facturé	Exercice facture	Date facture	Date rglt	
6180	BIOSSA	08/11/21	IM		TOULON VAR TECHNOLOGIES	TubeStéreo étanche	0,00	8 800,00	0,00	8 800,00	Origine SUBV ETAT			
-- Facture GESLAB n° 7063											8 800,00	2021	17/11/21	22/12/21
6265	BIOSSA	02/12/21	FO	S	GROUPE LDLC- FRE - MULTI EXPEDITIONS MAGINEA - HARDWARE.FR	DISQUES DURS	0,00	215,87	0,00	215,87	Origine SUBV ETAT			
-- Facture GESLAB n° 6998											215,87	2021	02/12/21	10/12/21
Totaux pour l'entité dépensière BIOSSA							0,00	9 015,87	0,00	9 015,87	facturé sur l'exercice facturé antérieur			



Figures : Photo du matériel acquis grâce à BIOSA

Bilan relations internationales :

Le bilan en relation internationale est très bon : Julie et Franck (en dispo enseignants PRAG et du secondaire) ont dû certes attendre 1 mois en quarantaine à Santiago du Chili, mais ont pu ensuite en se rendant sur le centre Patagonien consolider la collaboration internationale avec le Chili, S. Bucchan, et surtout, comme prévu, initier la collaboration internationale avec le Centre de recherche Patagonien à Coyhaique, en la personne de M Hamame.

Les premières mesures / observations acoustiques HD des dauphins des Fjords Chiliens ont ainsi pu être conduites, avec l'aide du centre de recherche Patagonien.

Une publication et un rapport interne ont été rédigés et posés sur HAL (cf section publication)

De nombreux collaborateurs Allemands, Argentins et Chiliens ont assisté à l'expérience et sont maintenant en contact avec notre équipe pour reproduire l'expérience dans d'autres sites, du fait de la qualité des mesures et leur finesse.

Notre collaboration avec le centre bioacoustique Univ. del Norte Brazil Pr R. de Sousa Lima a aussi été renforcée par échanges interposés, et une thèse en cotutelle CIFRE avec la société SEAPROVEN a été acceptée par l'ANRT en mars 2022 sur ce sujet bioacoustique et évolution des signaux.

Perspectives :

Un second papier est en écriture sur l'analyse fine de ces signaux.

L'ancrage de notre nouvelle collaboration dans ce centre le plus Sud de la Patagonie, permet d'ouvrir les expériences sur les Fjords Chiliens. Nous avons ouvert aussi avec la MITI CNRS un projet, ADAPREDAT (Lauréat de l'appel MITI 2021, PI Glotin) sur la biodiversité des Fjords Norvégiens, avec les mêmes méthodes. L'ensemble nous permet de comparer les évolutions de ces écosystèmes sous pression du réchauffement climatique. Dans un cas au bord de l'océan Arctique, et dans l'autre sous l'effet du continent Antarctique. Les dynamiques de la biodiversité dans ces sites en évolutions est méconnue, pour autant garante de l'équilibre des océans.

Publications issues de ce projet :

- **R1**

Rapport de recherche résumant la mission :

Patris et al., juillet 2021

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03424411/>

(PJ)

- **J1**

Article de revue soumis (PJ) suite à appel cet participation accepté :

In review

“Dear Dr. Patris,

Thank you for submitting your abstract “Mid-term acoustic monitoring of Patagonian coastal dolphins” for consideration as part of the PeerJ Life and Environment Special Issue, Innovative Uses of Remote Sensing in Biodiversity Conservation.

Your abstract has been assessed by the Special Issue editors and has been approved as provisionally in scope.

Please read our Author Instructions<<https://peerj.com/about/author-instructions/>> then submit the full version of your manuscript to PeerJ Life and Environment via <https://peerj.com/new/>. We request that you do so within one month of receiving this notification; however, should you require more time, the deadline for all full submissions is Friday December 24th. Submissions received later than this may not be considered as part of the final Special Issue.

Important: You must include the code [SI-91-remote-sensing-conservation-263-23] in the Confidential Note to Staff field of our submission form to ensure your article is processed correctly.

Please note that all submissions to PeerJ Special Issues are peer reviewed according to PeerJ’s normal rigorous standards, and an abstract being approved for full submission does not guarantee your manuscript will be published.

Authors should also note that, if accepted for publication, they will be required to pay either an Article Processing Charge (\$1,195) or for a PeerJ Lifetime Membership<<https://www.youtube.com/watch?v=Cv3ooRV7dcY>> (a one-off payment for lifetime publishing privileges – starting at just \$399).

Please let us know if you have any questions. We look forward to receiving your submission.

The PeerJ Team

Lindsay Howell
Editorial Community Manager
PeerJ
“

- **A1 :**

Résumé de la soumission à l’appel à participation à la revue:

Mid-term acoustic monitoring of Patagonian coastal dolphins

J. Patris, H. Glotin, F. Malige, V. Barchasz, V. Gies, S. Marzetti, S. Buchan, M. Hamame

- (a) Aix-Marseilles University
- (b) CNRS UMR 7020 LIS, DYNi team, Toulon University
- (c) SMIoT, Toulon University
- (d) Concepción University / CEAZA
- (e) CIEP, Coyhaique

Coastal dolphins are present in many zones of the world, including rivers, fjords and bays. Due to their site fidelity they usually are very sensitive to human presence and some populations are on the verge of extinction [1-2]. Coastal dolphins and porpoises such as the Chilean dolphin (*Cephalorhynchus eutropia*), the Peale dolphin (*Lagenorhynchus australis*), and the Burmeister porpoise (*Phocoena spinipinnis*) inhabit the pristine and remote areas of Chilean Patagonia.

Human development is growing fast in these parts and may constitute a serious threat for such fragile and poorly known species. It is thus urgent to develop new tools to try and study these cryptic species, and find more about their behavior, population levels and habits.

These odontocetes emit high frequency narrow band (HFNB) clicks. Because the signal frequency is usually higher than 100 kHz, storage problems are acute and do not allow for long term monitoring. The solutions for recording HFNB clicks are usually twofold : either short duration, opportunistic recording from a small boat in presence of the animals (short term monitoring [3-6]) or long term monitoring using devices including a click detector and registering events rather than sound. In short term opportunistic monitoring, the presence of the boat biases the behavior of the animals, whereas long term studies with in-situ detectors are submitted to the performance of the detector : since the data is not recorded, no a-posteriori verification can be done [7]. Recent instruments combining detections and recording are available but there are still few studies using them, and the reliability of the detector is still a potential difficulty [8]. We suggest, as another possibility, a mid-term monitoring, arguing that today's devices have reached a level in performance allowing for a few days of continual recording even at these extremely high frequencies and in difficult conditions.

As an example, during 2021, we performed a mid-term monitoring, recording quasi-continuously (duty cycle of 95 %, with a sample rate of 512 kHz and a dynamics of 24 bits) during 50h with the recorder High-Blue (developed by SMIoT and LIS laboratory in Toulon university [9,10]) anchored in a Fjord near Puerto Cisnes, Region de Aysen, Chile. The high sensibility of the device allows for detection in a range reaching 500 meters in good conditions for this species. We detect 13.000 clicks, grouped in 23 periods of passing animals [11]. We thus confirm the high site fidelity for the species of dolphins present in this zone (*Cephalorhynchus eutropia*). What's more, we conclude that this peculiar behavior of the dolphins, who did not go further away than a few kilometers from the recording point, is highly favorable for a mid-term monitoring, since a few days of recording provide a lot of informations, such as site fidelity, signal forms, and potential interactions between dolphins and environment conditions such as human activity (boat noise, salmon farming) without the presence of a boat disturbing the animals.

References :

[1] Jaramillo-Legorreta A. M. et al. (2019) « Decline towards extinction of Mexico's vaquita porpoise (*Phocoena sinus*) », *R. Soc. Open sci* (6) : 190598.

[2] D.F. Silva et al. (2020) « Reproductive parameters of franciscana dolphins (*Pontoporia blainvillei*) of Southeastern Brazil », *Mar. Mam. Sci.* 36 : 1291-1308.

[3] Rojas-Mena, R. (2009). « Caracterización del repertorio acústico del delfinchileno *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, Universidad Austral de Chile.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Reyes Reyes, V., Marino, A., Dellabianca, N., Hevia, M., Torres, M., Raya Rey, A., and Melcón, M. (2018). Clicks of wild burmeister's porpoises (*Phocoena spinipinnis*) in Tierra del Fuego, Argentina: Notes. *Marine Mammal Science*, 34.

[7] J.R. Robbins et al. (2015) « Handling dolphin detections from C-PODs, with the development of acoustic parameters for verification and the exploration of species identification possibilities » *Bioacoustics*.

[8] <http://www.oceaninstruments.co.nz/soundtrap-300/>

[9] High Blue presentation : <https://smiot.univ-tln.fr/index.php/highblue/>

[10] Ferrari, M., Glotin, H., Marxer, R., Barchasz, V., Sarano, V., Gíes, V., Asch, M., and Sarano, F. (2019). High-frequency near-field physeter macrocephalus monitoring by stereo-autoencoder and 3d model of sonar organ. In *OCEANS 2019- Let's seA our future together*. IEEE.

[11] Julie PATRIS, Franck MALIGE, Madeleine HAMAME, Susannah BUCHAN, Valentin Barchas, Hervé GLOTIN Etude des productions sonores des dauphins du canal de Puyuhuapi, Région de Aysen, Chili / Primer balance del estudio de las producciones sonoras de los delfines del Canal de Puyuhuapi realizados en mayo del 2021 , Rapport de recherche CNRS / Informe CIEP , 2021

Acknowledgements : We thank IN2SI CNRS open project BIOSA, and INPS UTLN for the equipments, CIEP for logistic organization, FONDECYT in Chile, and « agrupacion de turismo nautico y conservacion de cetaceos Puerto Cisnes » for their huge help and interest.



HAL
open science

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

Julie Patris, Franck Malige, Madeleine Hamame, Susannah Buchan, Valentin Barchasz, Hervé Glotin

► To cite this version:

Julie Patris, Franck Malige, Madeleine Hamame, Susannah Buchan, Valentin Barchasz, et al.. Etude des productions sonores des dauphins du canal de Puyuhuapi, Region de Aysen, Chili. [Rapport de recherche] Laboratoire LIS, université de Toulon; CIEP; Université d'Aix-Marseille; Universidad de Concepción; SMIoT, université de Toulon. 2021. hal-03424411

HAL Id: hal-03424411

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03424411>

Submitted on 10 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



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 SMIO T), 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

1	Présentation du projet	3
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
2	Diffusion scientifique	8
2.1	Conférence	8
2.2	Presse	8
2.3	Matériel audiovisuel	8
3	Résultats de l'enregistreur 'HighBlue'	8
3.1	Installation et maintenance	8
3.2	Données obtenues	9
3.3	Sons enregistrés	10

4	Détection des clics	11
4.1	Stratégie de détection	11
4.2	Résultats des détections	12
5	Conclusion et futurs projets	13
5.1	Travail d'analyse à venir	13
5.2	Projets futurs	13
6	Annexes	14
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

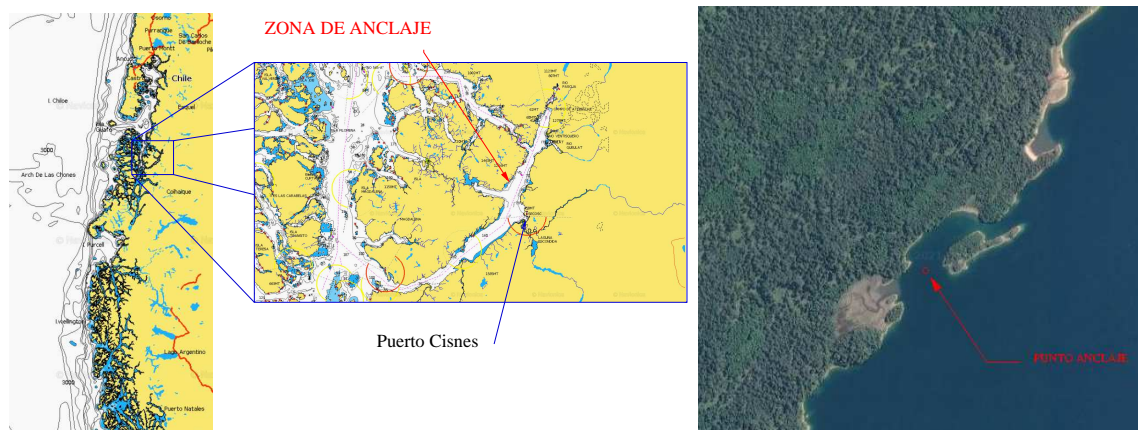


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude du CIEP. A gauche, une contextualisation sur le sud du Chili et la ville de Coyhaique, où se trouvent les bureaux du CIEP. Au centre, l'encart représente l'île de Magdalena, entourée du détroit de Puyuhuapi, et ses environs. Puerto Cisnes, qui a été 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*)

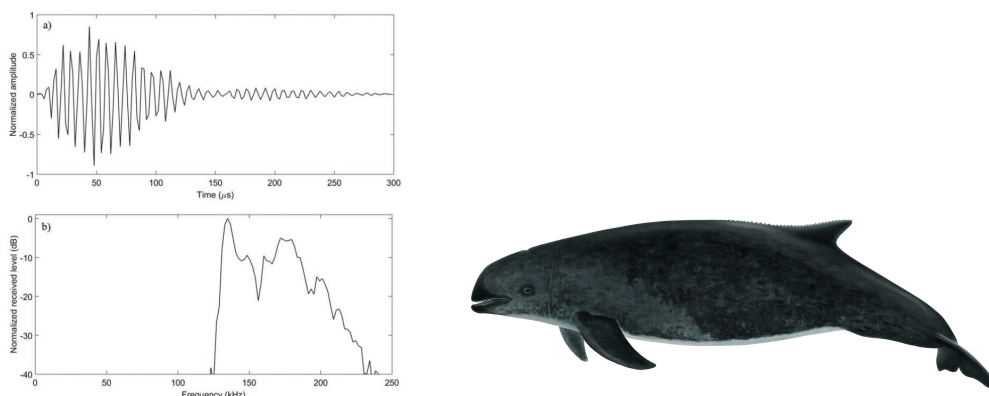


Figure 2: Représentation en temps (en haut) et fréquence (en bas) d'une émission sonore typique, normalisée, du marsouin de Burmeister (tiré de Reyes et al., 2018 ?) - fréquence d'échantillonnage de 500 kHz. Crédit image : Andres Calderon, de l'atelier "Ermitaño" (<https://tallerermitano.cl/>)

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.

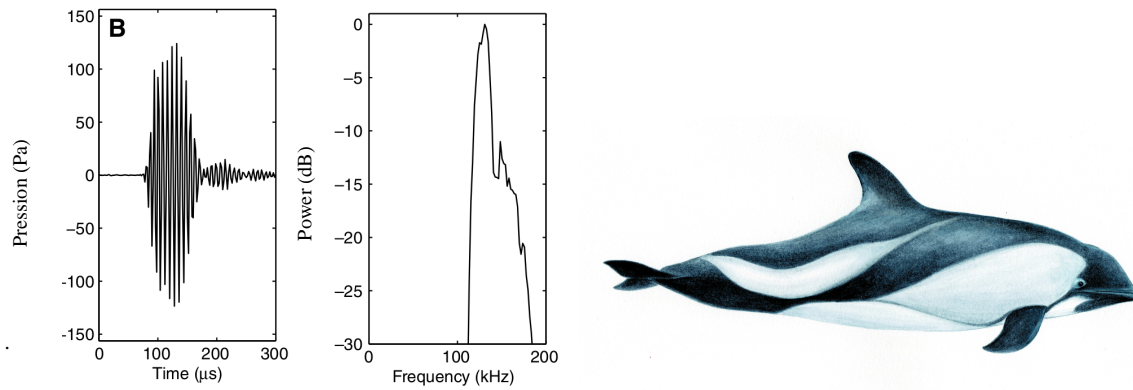


Figure 3: Représentation en temps (à gauche) et fréquence (à droite) d’une émission sonore typique du dauphin Austral (tiré de Kyhn et al., 2010 ?) - fréquence d’échantillonnage de 500 kHz. Crédit image : Andres Calderon, de l’atelier “Ermitaño” (<https://tallerermitano.cl/>)

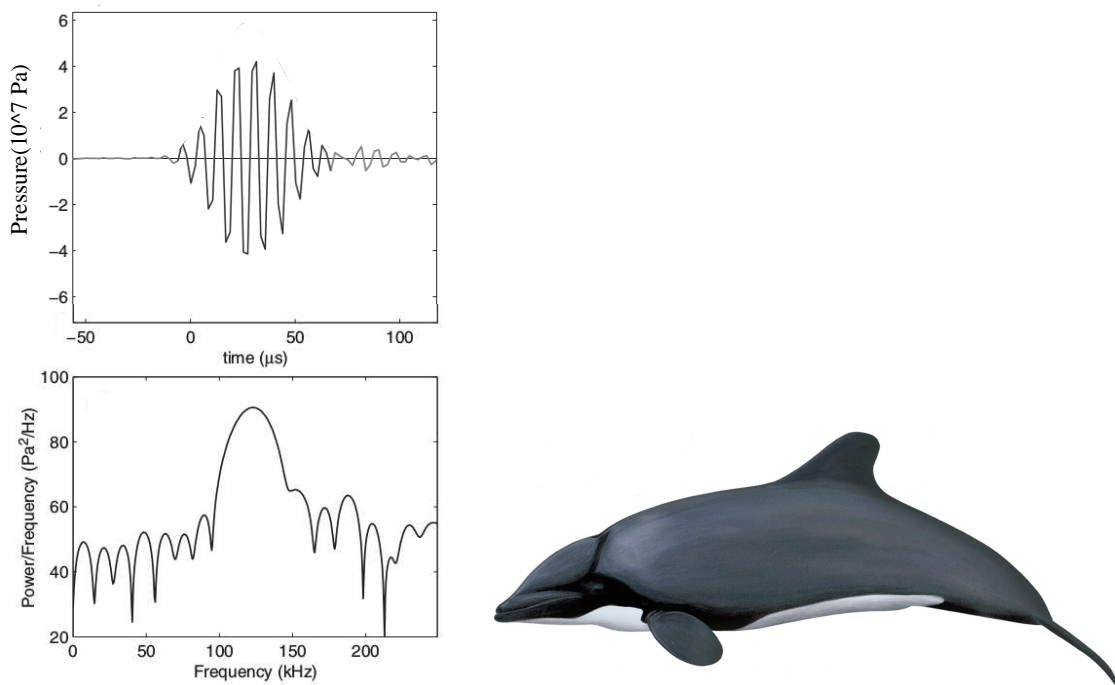


Figure 4: Représentation en temps (en haut) et fréquence (en bas) d’une émission sonore typique du dauphin chilien (tiré de Götz et al., 2010 ?) - fréquence d’échantillonnage de 500 kHz. Crédit image : Andres Calderon, de l’atelier “Ermitaño” (<https://tallerermitano.cl/>)

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.

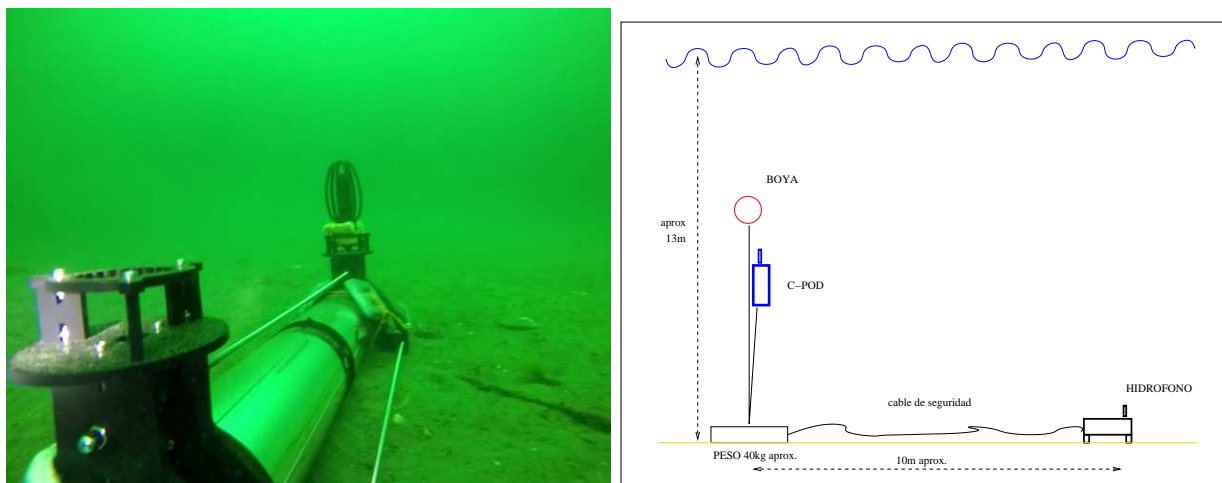


Figure 5: A gauche : appareil installé dans le fjord de Puyuhuapi. A droite : schéma de l'installation complète.

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

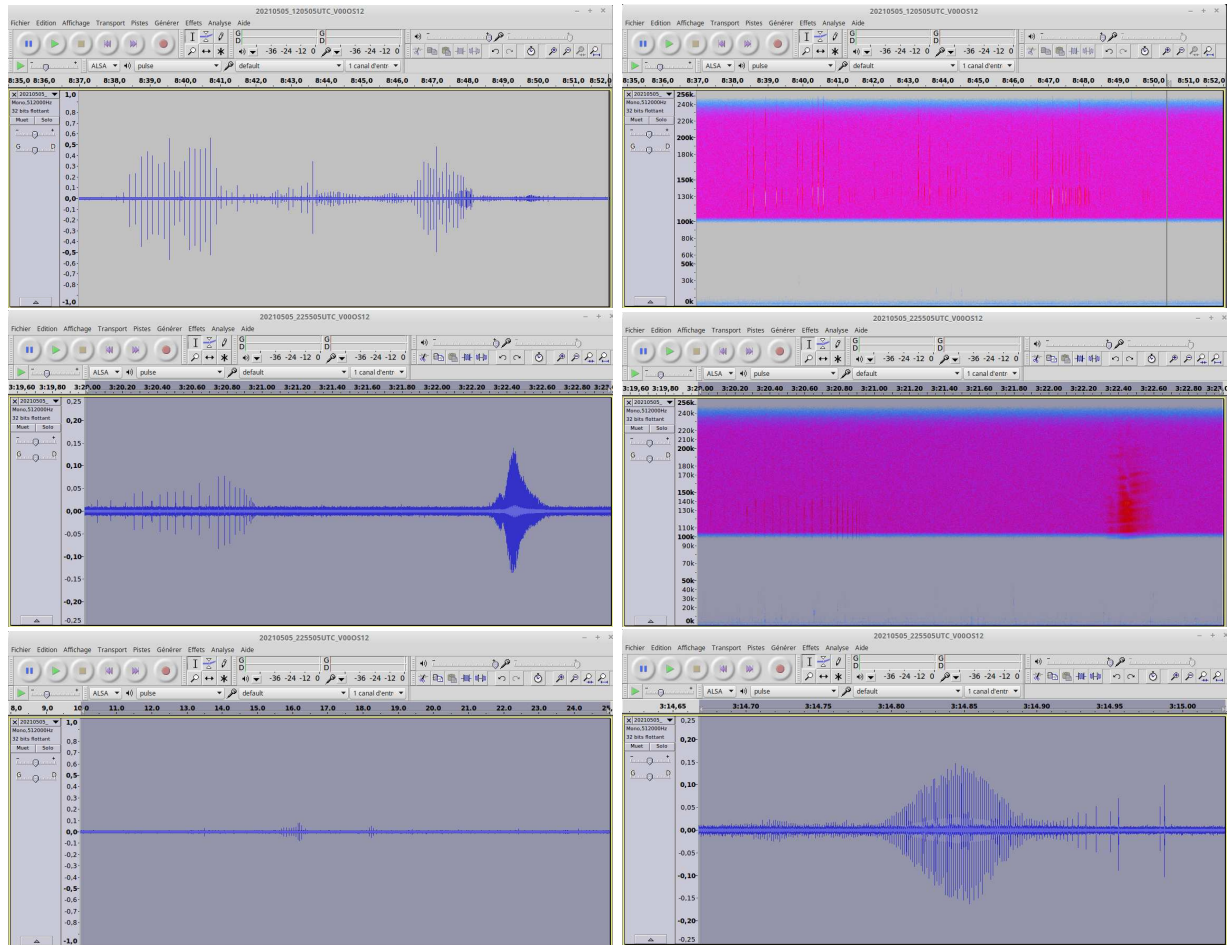


Figure 6: Exemples de séries de clics enregistrés entre le 4 et le 6 mai 2021. Les données ont été filtrées avec Audacity, avec un filtre qui atténue de 30 dB les fréquences sous 100 kHz et augmente de 30 dB celles au dessus de 100 kHz. En haut : une série classique de clics en forme d’onde (gauche) 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’œil, 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.

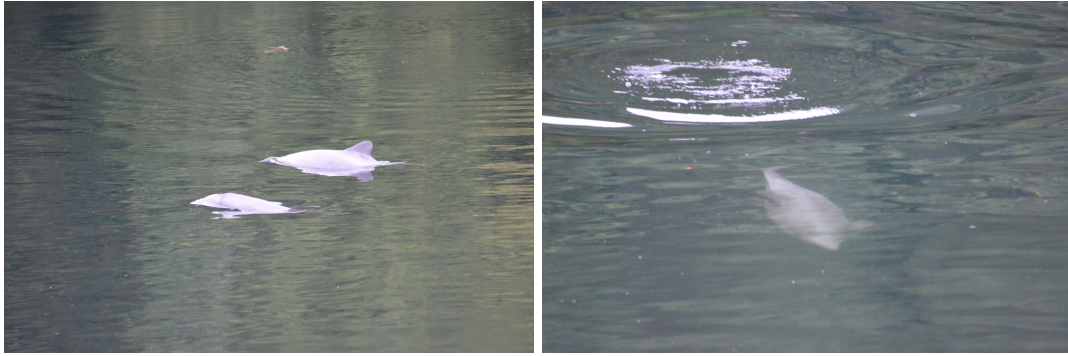


Figure 7: Photos de dauphins chiliens *Cephalorhynchus eutropia* prise le 8 mai dans la zone d'étude (Crédit photos : Catalina Paz Jorquera).

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) .

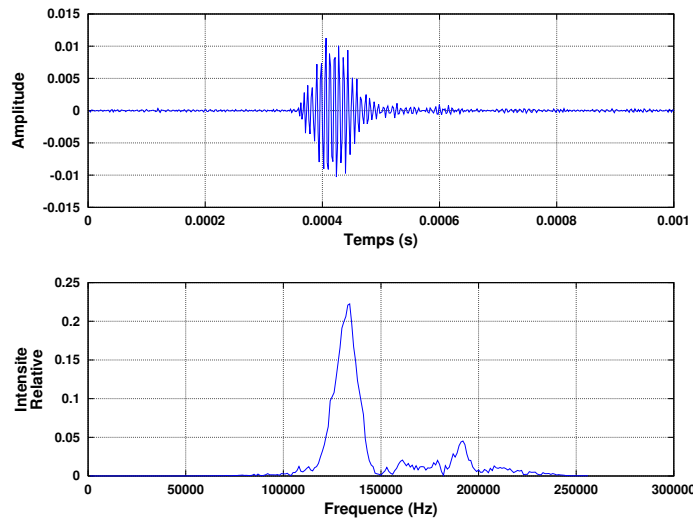


Figure 8: Aspect d'un clic de dauphin enregistré lors de l'expérience (forme d'onde et spectre après filtrage en passe-haut à 100 kHz).

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.

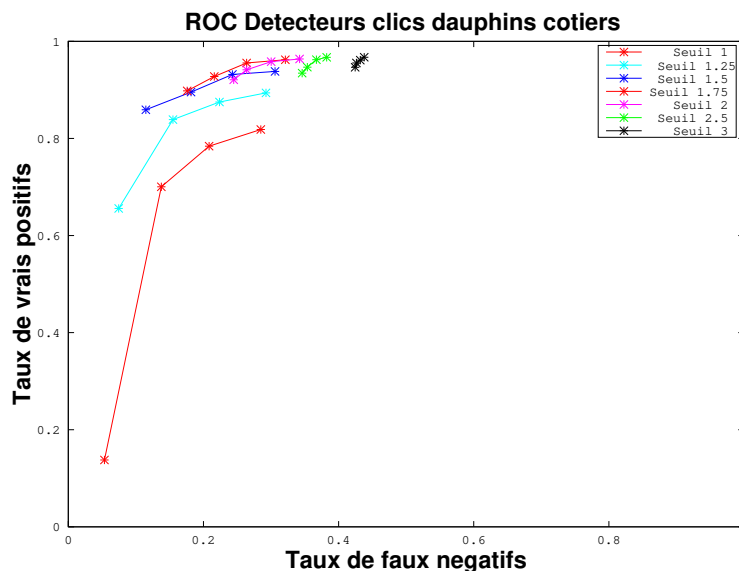


Figure 9: Courbes de ROC (receiver operating characteristic), pour différentes valeurs de m_1 et m_2 . Chaque courbe est donnée pour une valeur de m_2 (qui est précisée dans le cadre en haut à droite) et les différents points qui la composent correspondent respectivement aux valeurs 4, 6, 8 et 10 de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

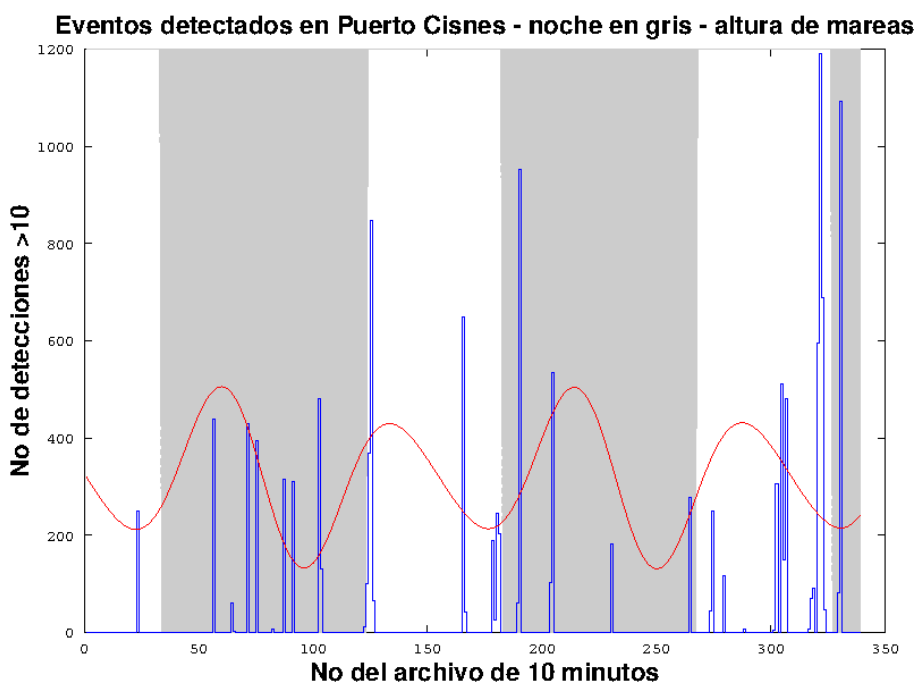


Figure 10: Détections de clics de dauphins entre le 4 et le 6 mai. En abscisse, le numéro du fichier. Les nuits sont indiquées avec un fond gris. Le niveau de la marée est indiqué en rouge.

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 australiens (*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.

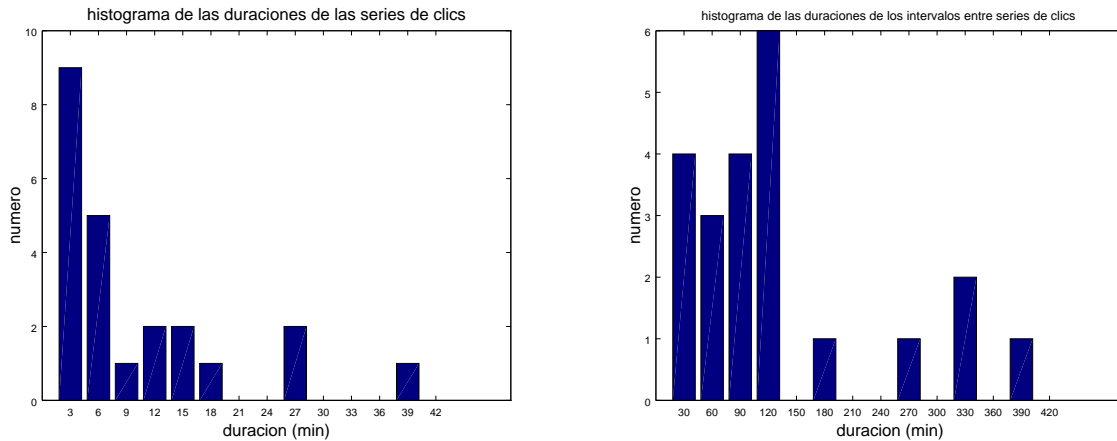


Figure 11: Gauche: Histogramme des durées des séries de clics. Droite : Histogramme des durées des intervalles entre deux séries de clics.

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/ μ 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 : $V_{hydro} = (Val \times 1,65)/2$.

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 ± 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) : $V_{HydroMin} = (10 \times \mathcal{P} \times 1,65)/2$, ce qui donne :

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

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

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

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

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

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 α 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).

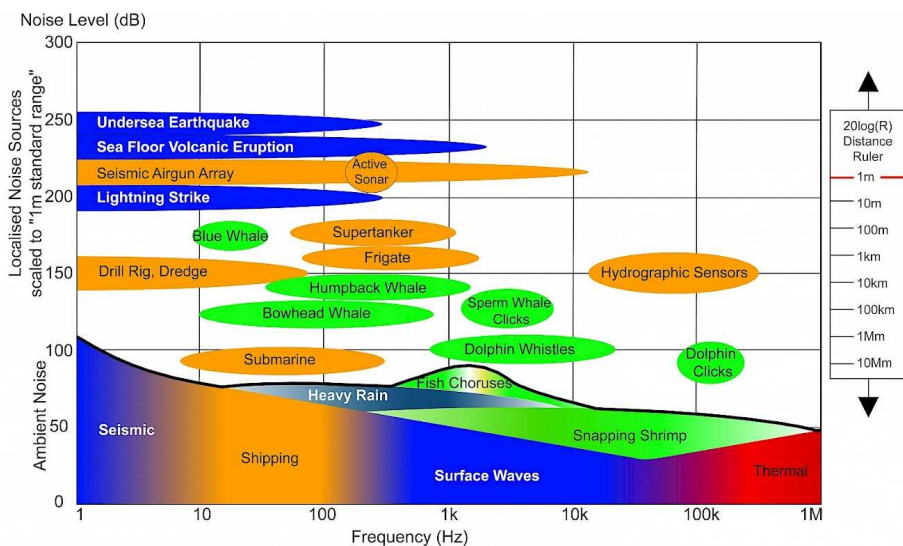


Figure 12: Sources de bruits dans l'océan. Pour les hautes fréquences, de l'ordre de 130 kHz, l'océan est calme, et le bruit dominé par l'agitation thermique. La plupart des sources anthropiques de bruit (bateaux, ...) n'émettent pas dans ce domaine de fréquence. Document tiré de <https://www.ospar.org/>

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

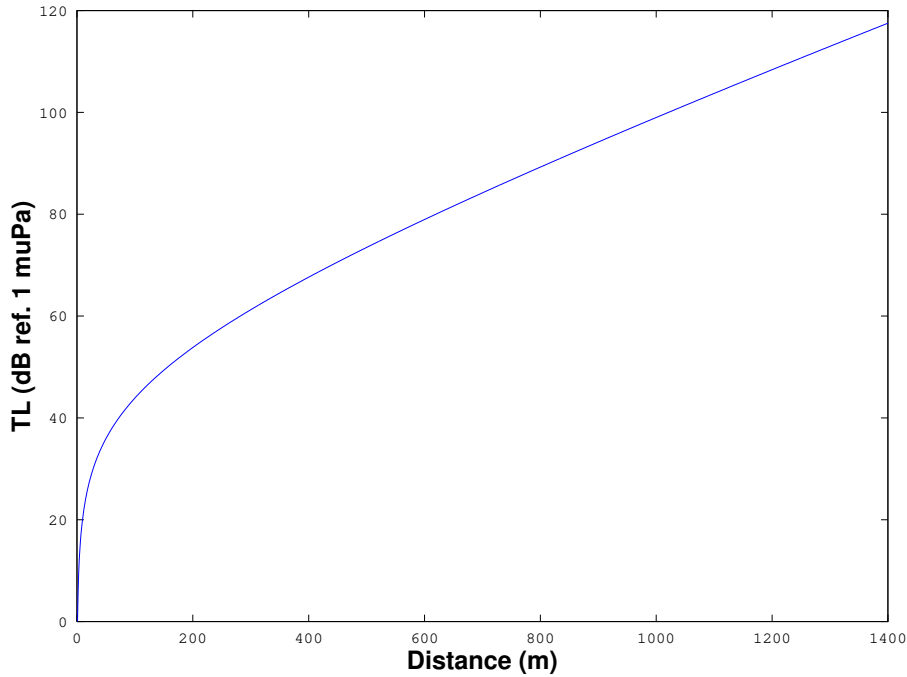


Figure 13: Représentation de la fonction $f(r) = 20 \log \frac{r}{r_0} + \alpha r$ permettant de déterminer la distance maximale à laquelle peut être entendu un clic de dauphin austral.

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
```

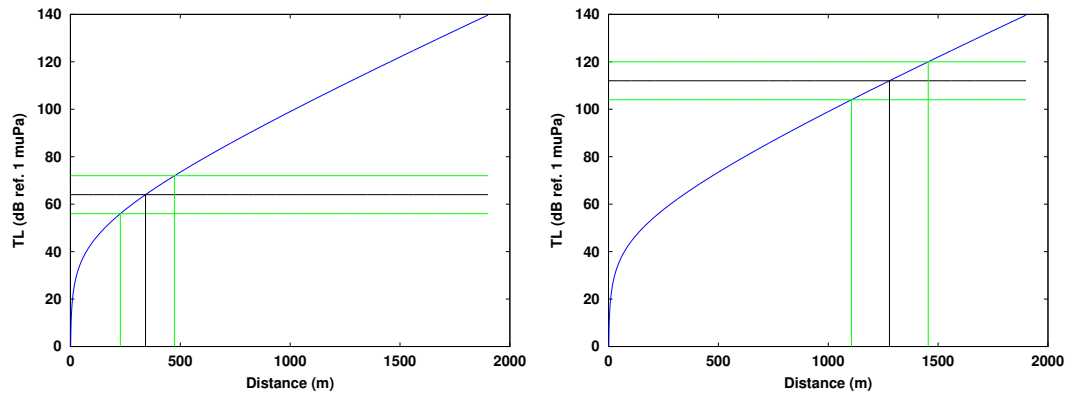


Figure 14: Résolution graphique du calcul de la distance maximale à laquelle un dauphin peut être détecté par notre appareil. A gauche, dans le cas d'une dynamique de 16 bits, à droite dans le cas d'une dynamique de 24 bits (qui correspond à la limite du bruit ambiant).

```

%      - 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=1:1: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.

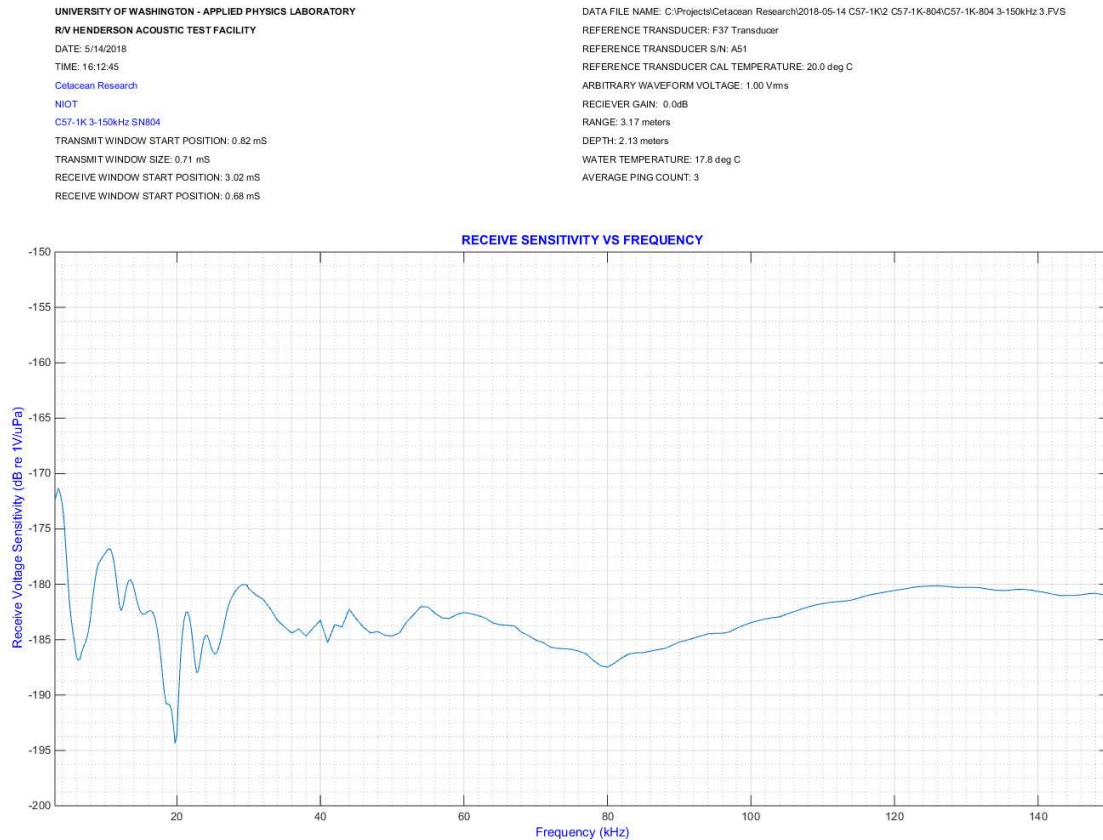


Figure 15: Calibration de la réponse d'un hydrophone de type C57 de Cetacean Research en haute fréquence. On voit que la sensibilité reste élevée même au-delà de la bande de fréquence nominale d'utilisation du capteur.

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.

1 Mid-term acoustic monitoring of Patagonian 2 coastal dolphins

3 Julie Patris¹, Franck Malige², Madeleine Hamame³, Hervé Glotin^{2,4},
4 Valentin Barchasz⁴, Valentin Gies^{4,5}, Sebastián Marzetti^{4,5}, and Susannah
5 Buchan^{6,7,8,9}

6 ¹Université d'Aix-Marseille, Marseille, FRANCE

7 ²Laboratoire Informatique et Systèmes (LIS), CNRS UMR 7020, Toulon, FRANCE

8 ³Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), Coyhaique, CHILE

9 ⁴Scientific Microsystems for Internet of Things (SMIoT), Université de Toulon et du Var,
10 Toulon, FRANCE

11 ⁵Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence (IM2NP), CNRS UMR
12 7334, Toulon, FRANCE

13 ⁶Center for Oceanographic Research COPAS Sur-Austral and COPAS COASTAL,
14 Universidad de Concepción, Concepción, Chile

15 ⁷Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

16 ⁸Woods Hole Oceanographic Institution, Biology Department, Woods Hole, USA

17 ⁹Centro de Estudios Avanzado en Zonas Áridas (CEAZA), Coquimbo, Chile

18 Corresponding author:

19 Julie Patris¹

20 Email address: julie.patris@univ-amu.fr

21 ABSTRACT

22 Coastal dolphins and porpoises such as the Chilean dolphin (*Cephalorhynchus eutropia*), the Peale dolphin
23 (*Lagenorhynchus australis*), and the Burmeister porpoise (*Phocoena spinipinnis*) inhabit the pristine and
24 remote areas of Chilean Patagonia. Human development is growing fast in these parts and may constitute
25 a serious threat for such fragile and poorly known species. It is thus urgent to develop new tools to try
26 and study these cryptic species, and find more about their behavior, population levels and habits. These
27 odontocetes emit narrow band high frequency (NBHF) clicks. Because the signal frequency is usually
28 higher than 100 kHz, storage problems are acute and do not allow for long term monitoring. The solutions
29 for recording NBHF clicks are usually twofold : either short duration, opportunistic recording from a small
30 boat in presence of the animals (short term monitoring) or long term monitoring using devices including a
31 click detector and registering events rather than sound. We suggest, as another possibility, a mid-term
32 monitoring, arguing that today's devices have reached a level in performance allowing for a few days of
33 continual recording even at these extremely high frequencies and in difficult conditions.

34 As an example, during 2021, we performed a quasi-continuously recording during one week with the
35 recorder Qualilife High-Blue anchored in a Fjord near Puerto Cisnes, Region de Aysen, Chile. We
36 detected more than 13 000 clicks, grouped in 22 periods of passing animals. We thus confirm the high
37 site fidelity for the species of dolphins present in this zone (*Cephalorhynchus eutropia*). We also installed
38 in the same place a click detector (C-POD) and the two devices compare well when establishing the
39 number and duration of periods when the dolphins are present.

40 The clicks recorded are quite similar with precedent studies but, due to the larger number of clicks
41 recorded, clicks with different spectra and peak frequency were recorded. The 13 000 clicks recorded in
42 our study are close to emissions from Commerson dolphins (*Cephalorhynchus commersonii*) a parent of the
43 chilean dolphin living in Argentina's Patagonia. Several rapid sequences of clicks were present in the
44 recordings and, even if they present a high variability, their features are consistent with previous studies :
45 in average they have a larger bandwidth and a lower peak frequency than the usual clicks.

46 We then confirm that the combined use of a recording and a detection devices is probably a good
47 alternative to study these less known species in remote areas.

48 INTRODUCTION

49 Coastal small cetaceans are present in many zones of the world, including rivers, fjords and bays. Due to
50 their site fidelity they usually are very sensitive to human presence and some populations are on the verge
51 of extinction (Jaramillo Legorreta et al., 2019; Sucunza et al., 2019; Silva et al., 2020). Many studies of
52 these dolphins focused on areas where human activity and presence is high, because it is usually easier
53 to reach these areas and because the threats are stronger (Heinrich et al., 2019; Palmer et al., 2021). In
54 remote areas such as Patagonia, there is still few information available on the endemic species, though
55 they are probably also threatened and population assessments could be decisive for their conservation.

56 Long term visual studies are costly and are submitted to the contingencies of climate and local
57 equipment (Stern et al., 2017; Heinrich et al., 2019). Passive acoustic monitoring (PAM) is sometimes a
58 good alternative to assess the presence, characteristics and behavior of marine mammals, or to estimate
59 their density and population trends (Marques et al., 2012). However, in the case of coastal dolphins,
60 there is a serious drawback to PAM methods : the high sample rate needed to record their high frequency
61 emissions prevents autonomous long term full recording. The very few published studies that used full
62 time recording had an access to devices and installations that are not commonly found in marine biology
63 (Gillespie et al., 2020). Usually, there are two alternatives for the passive acoustic monitoring of small
64 coastal cetaceans : short term full recording or long term presence detection.

65 The first method consists in recording during a short time, typically a few hours or less, usually
66 opportunistically from a boat in the wild or in a pool for captive animals. The recording is controlled,
67 sometimes with several hydrophones (array of sensors) and the behavior of the animal is registered
68 (Ladegaard et al., 2015; Macaulay et al., 2020). This kind of work is useful for describing the emissions
69 in details (sound characteristics, beam), and/or coupling them with registered behaviour. Nevertheless, as
70 these studies are short in duration or done in captivity, the presence of humans is a source of disturbance
71 that can affect the behavior and sound production of these marine mammals. Thus, this type of studies is
72 mainly focused on characterizing the sounds emitted by a particular species, but could be biased towards
73 certain types of conducts in reaction with human presence such as anxious, agonistic, attentive, or cautious
74 behaviours (Martin et al., 2021) .

75 The second widely used method is long term monitoring with click detectors (Sousa-Lima et al., 2013;
76 Weel et al., 2018). Click detectors do not fully record the signal, but detect and log predetermined sounds
77 of interest. Thus, memory use and power consumption are much lower than for recorders, and an area can
78 be monitored for years, due to the high autonomy of the available detectors. A drawback of these very
79 efficient tools is that very few information is then available on the surrounding low to medium frequency
80 sounds or soundscape. For instance, detectors can hardly be used to assess interactions between marine
81 mammals and human produced noises. Moreover, the differentiation of sounds emitted by species of
82 interest by a logging device is not easy (Jacobson et al., 2017). Besides, the calibration of such devices is
83 often a problem since the data is not recorded and no a posteriori verification can be done (Robbins et al.,
84 2015). To solve this problem some studies proposed a combination of a detector and a recording device,
85 used for calibration purpose, mainly to test the detector performance (Jacobson et al., 2017; Sarnocinska
86 et al., 2016).

87 Interestingly, recent instruments combining low frequency recording, automatic detection and high
88 frequency snippet recording are getting available (<http://www.oceaninstruments.co.nz/>)
89 though no studies using them have been published yet, to our knowledge. This is an exciting new
90 technology, even if the reliability of the detector is still a potential difficulty.

91 In this work, we suggest, as another possibility, a mid-term full recording monitoring for the small
92 coastal cetacean. We argue that today's devices have reached a level in performance allowing for a few
93 days of continual recording even at these extremely high frequencies and in difficult conditions or remote
94 places. Custom-built recorders, developed and constructed in a University, allows for an adaptation to
95 special conditions or a specific protocol at a relatively low cost. This set-up combines several qualities :
96 the mid-term recording gives a clear view of the acoustic context (noises, human and animal sound
97 emissions), can help to calibrate the logging of predetermined sounds by automatic detectors, gives more
98 precision on the signal and is less invasive. We present an example of such a mid-term recording in the
99 remote fjords of Chilean Patagonia in May 2021, aiming at knowing better the acoustical behaviour of the
100 cryptic small cetaceans inhabiting the inlet waters. After presenting the species of interests, we describe
101 in detail our instruments and show our first results.

1 COASTAL ODONTOCETES IN PATAGONIA

1.1 Fjords of Northern Chilean Patagonia

The marine ecosystem of Chilean Patagonia (41°5′-55°S) is considered one of the most extensive fjord systems in the world. Numerous islands, peninsulas, channels, straits and fjords form part of its complex geography covering an area of ca. 240 000 km² (Silva and Vargas, 2014). Oceanographically, sub-antarctic water, rich in nutrients, flow on the surface through “Boca del Guafo” (43°35.7′S – 74°12.8′W) mixing progressively towards the south with estuarine water (Guzmán and Silva, 2006; Silva and Palma, 2008). This oceanographic and geomorphologic particularities create many unique habitats that result in a high degree of endemic wildlife and high species richness (Häussermann and Försterra, 2009; Försterra et al., 2017; Betti et al., 2017). The region is classified as highly vulnerable to local and remote processes (Iriarte et al., 2010). Major threats associated to economic activities includes intense salmon farming, demersal and benthic artisanal fisheries and emerging cetacean sightseeing activities.

1.2 Small coastal cetaceans of Northern Chilean Patagonia

Chile is among the countries with the larger diversity of cetaceans, mainly due to its large coastline and variety of climates (Wilson and Mittermeier, 2014). The fjords and inlet waters of Aysén are no exception to this diversity (Zamorano-Abramson et al., 2010; Pichinao et al., 2019). Large delphinids, such as the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) or the predating killer whale (*Orcinus orca*) are transient regular visitors of the fjords, and large mysticetes such as the blue whale (*Balaenoptera musculus*), the Sei whale (*Balaenoptera borealis*) or the humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) are common in the larger channels. Inside the fjords however, and very close to the shore, three species of small cetaceans mostly share the sheltered habitat : the Burmeister porpoise (*Phocoena spinipinnis*), the Peale dolphin (*Lagenorhynchus australis*) and the Chilean dolphin (*Cephalorhynchus eutropia*).

These three species are endemic to South America, the Chilean dolphin being even restricted to Southern Chile. They are globally poorly known, with very few studies published, and especially in the inlet waters of Chilean Patagonia. Their conservation status is considered Data Deficient for the Peale dolphin and the Burmeister porpoise (Hammond et al., 2008, 2012) and Near Threatened for the Chilean dolphin (Heinrich and Reeves, 2017), mainly because of its restricted range. Human activities in coastal areas are generally a major threat to coastal cetaceans, through direct fishing for human consumption (such has long been the case with the Burmeister porpoise in Peru (Van Waerebeek et al., 1997)) or baiting (a known practice in Patagonia (Hammond et al., 2012)), or through interactions with gill nets, fisheries or farms (Heinrich et al., 2019). The Peale dolphin is often seen in the fjords porpoising in front of the little boats or foraging close to the shore. The Burmeister porpoise and the Chilean dolphin are much more elusive, and do not normally interact with the boats.

All of these species emit echolocation clicks that have been known as Narrow Band High Frequency (NBHF) clicks. Interestingly, for each species, only one study describing their vocalization has been published (Reyes Reyes et al., 2018; Kyhn et al., 2010; Götz et al., 2010). Additionally, one unpublished study compared the emitted signals of Chilean and Peale dolphins (Rojas-Mena, 2009). The NBHF click is common in coastal species of toothed whales, it is characterized by a peak frequency around 130 kHz, a half-power bandwidth of about 15 kHz and no energy below 100 kHz. It is thought to be an adaptative response to the predation of killer whales, that does not hear above 100 kHz (Andersen and Amundin, 1976). In addition, the Chilean dolphin has been shown to produce ‘buzz’, or very rapid trains of clicks thought to be used while foraging (Götz et al., 2010; Martin et al., 2019). NBHF signals are very similar between species, and are possibly depending on the environment more than on the species (Kyhn et al., 2010), hence the need of more studies on these species vocalizations, that could allow for future long term passive acoustics monitoring.

2 AN EXPERIMENT IN THE FJORD OF PUYUHUAPI

2.1 Material and methods

QHB Recorder The main instrument for the experiment is Qualilife HighBlue (QHB) recorder presented in Figure 1. Its functional diagram is presented at Figure 2. This new state of the art recorder have the following characteristics :

- Acquisition sample rates up to 512 Ksps (Kilo samples per second) corresponding to a frequency range up to 256 kHz. Recording can be scheduled according to user requirements.

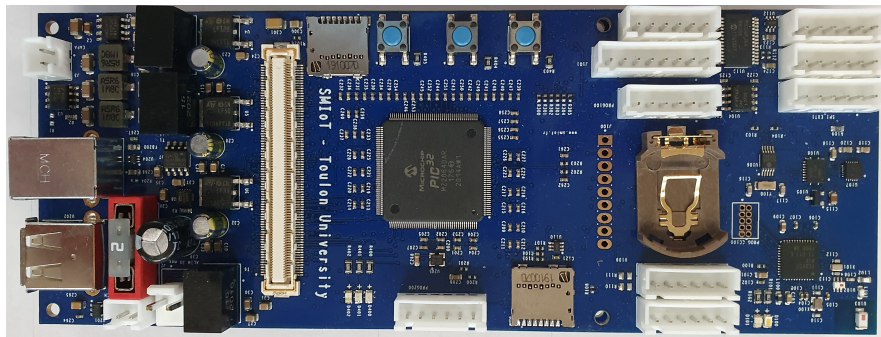


Figure 1. Qualilife HighBlue (QHB) recorder

- 154 • Up to 6 synchronous recording channels, with an accurate synchronization and time-stamping
155 having less than $1\mu s$ of jitter.
- 156 • Signal sampling depth can be adjusted among 8, 16 or 24 bits. In this latter mode, recorder self
157 noise is limited to the 2 least significant bits, meaning 22 bits are truly significant for recording.
158 This increases the signal quality and the potential detection distance compared to standard recorders,
159 especially in quiet environments.
- 160 • Differential acquisition front end with $\pm 2.5V$ maximum input level for reducing drastically record-
161 ing self noise. Each recording channel has an adjustable differential gain : X1, X10, X20, X100.
- 162 • Anti-aliasing filtering automatically tuned according to the acquisition sampling rate. Signal having
163 frequencies exceeding $0.55 * \text{Sampling Rate}$ are attenuated by more than 120 dB.
- 164 • Sensor hub ability : QHB includes a 9-axis IMU sensor (MEMS accelerometer, magnetometer and
165 gyroscope) and several additional sensors can be added depending on user requirements, using
166 UART, SPI and I2C extension buses.

167 QHB recorder has been set up in a custom made housing allowing resistance to pressure up to 100 m deep,
168 a stable setting on the ground, the adaptation of a C57 hydrophone from Cetacean Research, calibrated
169 with a flat response up to 150 kHz (no available calibration beyond), and a set of 21 D alkaline batteries
(<https://smiot.univ-tln.fr/index.php/products/>).

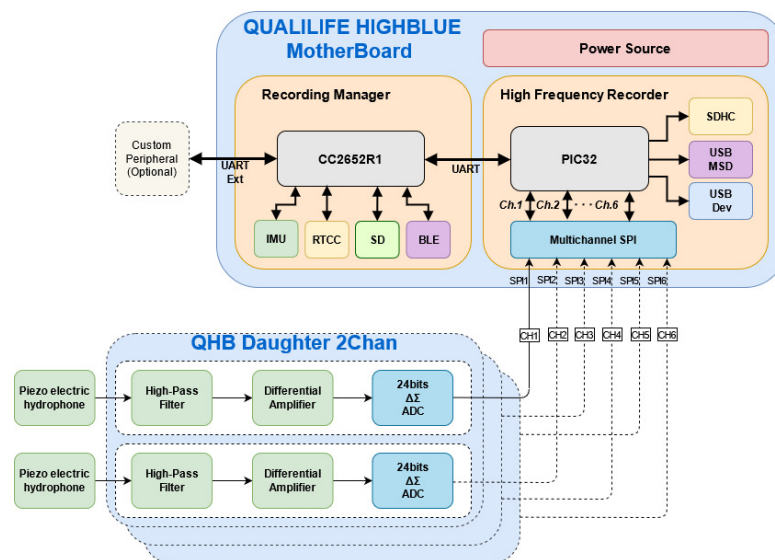


Figure 2. Functional diagram of Qualilife HighBlue (QHB) recorders

171 **C-POD** Though the main instrument of the experiment was the QHB recorder, we also installed a
172 C-POD, a commercial click detector developed by Chelonia Limited, UK (Tregenza, 2014). The C-POD
173 works in the 20 kHz-160 kHz range, detects and logs all potential clicks in this frequency range, registering
174 several parameters for each detection (central frequency, duration, etc.) as well as the temperature. A
175 post-processing software classifies the detections between high frequency noise and real clicks based on
176 the properties of the train of clicks, further offering a classification between NBHF or medium frequency
177 (dolphin) click. The C-POD is widely used for long term monitoring of toothed whales, and especially
178 the Harbour Porpoise (*Phocoena phocoena*) because of its low consumption, low memory requisite and
179 hence its very large autonomy on the field (Sousa-Lima et al., 2013; Gallus et al., 2012).

180 **Data recording** Both instruments QHB and C-POD were set on May, 4th of 2021, in a cove close to
181 the shore of Magdalena Island reserve, in the canal of Puyuhuapi opposite the town of Puerto Cisnes
182 ($44^{\circ}36'38.78''\text{S}$, $72^{\circ}45'30.43''\text{W}$, figure 3).

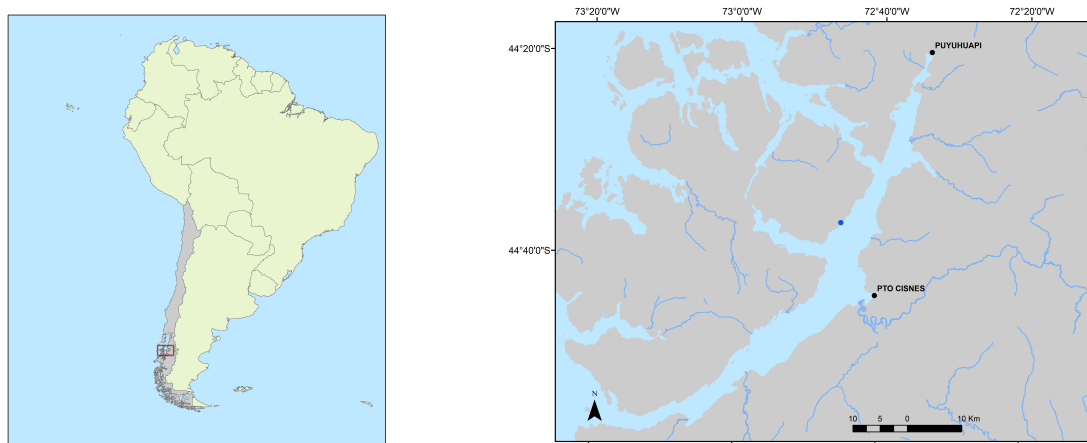


Figure 3. Left : Experiment location in South America. Right : Zoom on the experiment zone. In blue, the point chosen for the installation of the different devices ($44^{\circ}36'38.78''\text{S}$, $72^{\circ}45'30.43''\text{W}$).

183 The place was chosen because local tour operators had seen repeatedly Chilean dolphins in this cove
184 during the last months, excluding any other species of cetacean. The instrument QHB was installed at
185 a depth of 13 meters, on sandy ground. At 10 m of distance, a mooring was set with a line sustaining
186 the C-POD (at 4m from the ground) and a subsurface buoy. The set up of QHB was a sample rate of
187 512 kHz, 24 bits of precision, one channel, and a duty cycle of 95% with 9'30" of recording followed
188 by 30" OFF. The C-POD was used with default settings : continuous logging and a 20 kHz high-pass
189 filter (Tregenza, 2014). The QHB was retrieved on May, 11th whereas the CPOD was retrieved on July,
190 28th. Only Chilean dolphins were observed inside this cove, either by the authors or by the tour operators
191 visiting the place. The only moment when we saw the dolphins was during the operation of changing the
192 memory card on the 8th of May, when 2 individuals of a group of about 15 Chilean dolphins stayed with
193 the diver, interacting below the water.

194 **Click detection** A click detector was custom written in Octave (Eaton et al., 2009). It basically detects
195 the maxima of energy in the frequency band of 100 kHz - 250 kHz, and then filters out the signal that
196 have a strong counterpart in the 30-90 kHz bandwidth. Our detector was tested on two 9.5 minutes long
197 files, with clicks detected by a human specialist. The first file has a lot of clicks ($N = 523$) and some high
198 frequency noise, and the other file is without detected click but with a lot of high frequency noise. For the
199 chosen thresholds, we obtain the following characteristics :

- 200 • Precision or positive predicted value (PPV= correctly detected / all detections) PPV = 84%
- 201 • Miss rate (MR = missed signals / all signals) MR = 17% .

202 The code of this simple detector is given as supplementary material.

203 **Extraction of clicks parameters** As a first analysis of the clicks, we wrote a short code to automatically
204 extract the most commonly used parameters of NBHF clicks (Au, 1993), in concordance with the
205 only other paper published about the Chilean dolphin clicks (Götz et al., 2010). The code is given as
206 supplementary material. It computes the following parameters :

- 207 • Peak frequency is computed as the maximum of the Fast Fourier Transform (FFT) of 512 samples
208 (1 ms) around the clicks;
- 209 • Centroid frequency is the first raw moment of the FFT of the recorded signal during the same
210 extract;
- 211 • Inter-click interval (ICI) is computed as the time between two detections closer than 300 ms. In the
212 (unfrequent) case of two superimposed trains of clicks, this measure does not reflect an intrinsic
213 property of the emitted sound;
- 214 • Frequency bandwidth RMS (Root Mean Square) is the second central moment of the distribution of
215 frequencies in the same 1 ms extract;
- 216 • Bandwidth at -3 dB is the frequency band around the peak frequency where the value of the FFT is
217 higher than the maximum of the Fast Fourier Transform (FFT) divided by $\sqrt{2}$;
- 218 • Bandwidth at -10 dB is the frequency band around the peak frequency where the value of the FFT
219 is higher than the maximum of the Fast Fourier Transform (FFT) divided by $\sqrt{10}$;
- 220 • RMS duration is the second central moment of the distribution of time, where the absolute value of
221 the signal is considered a probability density;
- 222 • Duration at -10 dB is the duration around the maximum of the signal where the envelope of the
223 signal is higher than the maximum of the signal divided by $\sqrt{10}$. The envelope is obtained as the
224 modulus of the Hilbert transform of 1ms of signal around the clicks;
- 225 • Duration at -20 dB is the duration around the maximum of the signal where the envelope of the
226 signal is higher than the maximum of the signal divided by 10.

227 The statistical distribution of each of these parameters is computed for each 'event' or series of trains
228 separated by less than 20 minutes, and then for the total sample.

229 **2.2 First results**

230 **Clicks and events detections** The QHB instrument had several failures but recorded well from the
231 4/05/21 at 11h30 local time to the 6/05/21 20h local time, and then from the 8/05/21 11h local time to the
232 10/05/21 11h local time. We thus have two periods of recording, one of 56 hours with 339 files of 9'30"
233 and one of 48 hours with 291 files of 9'30". We total more than 550 Go of recorded sound.

234 We detected more than 13 000 clicks during the 56 hours from the 4th to the 6th of May, and almost
235 none in the second period from the 8th to the 10th of May. The clicks are organized in trains of several
236 clicks and usually grouped in 'events' or encounters. We define an 'event' as a series of trains separated
237 by less than 20 minutes. With this definition, we find 22 events or encounters during the 56 hours. Events
238 were separated by intervals from 30 minutes to 6.5 hours.

239 The C-POD detector recorded from the 4/05/21 to the 27/07/21. Although all the data have been
240 extracted from the instrument, amounting to about 34 000 clicks (all classified as NBHF) during the whole
241 three months, only the period when both instruments were in the water has been analysed here. Figure 4
242 shows the compatibility of the results between the QHB instruments and the C-POD detector for the first
243 three days, when a lot of clicks have been detected by both instruments. Most of the events (or encounters)
244 are detected by both the instruments, even though they were about 10 meters apart. However, the detection
245 rate of the QHB is significantly higher (more than 13 000 clicks as opposed to about 2 000 clicks for the
246 C-POD for the same period). The number of chunks of 10 minutes with at least one detection is 38 in
247 total for the CPOD and 49 for QHB, slightly more sensible.

248 QHB instrument also recorded contextual noise such as boat engines and sonars, as well as long
249 duration motors probably linked to a nearby salmon farm (situated at about 2 km), and noise from the

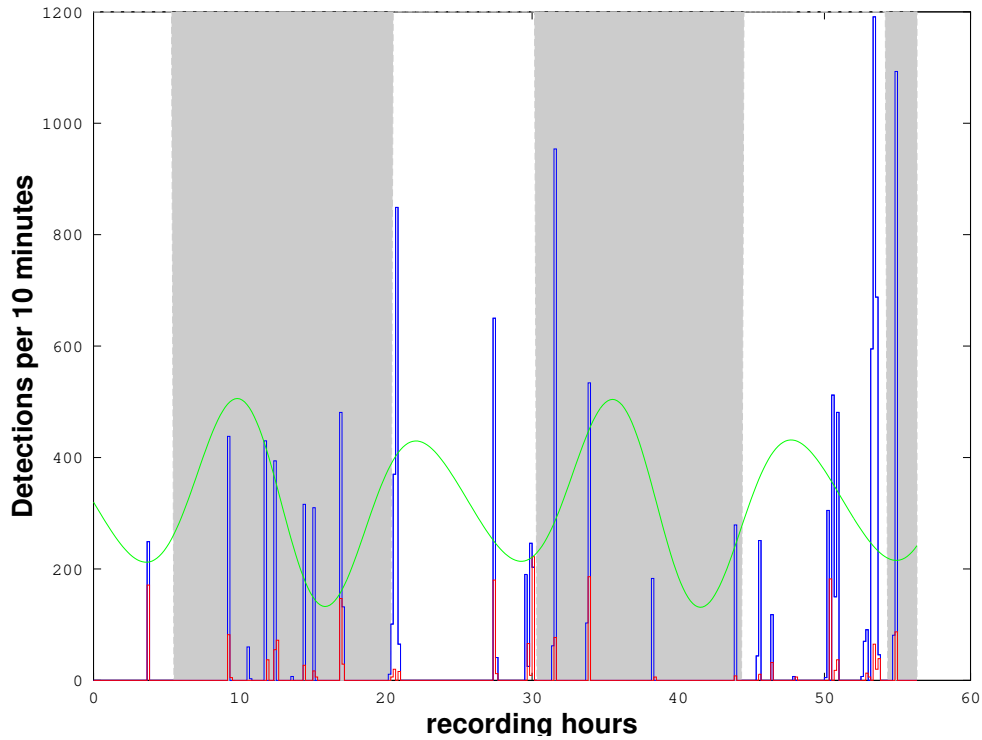


Figure 4. Number of clicks detected per 10 minutes by QHB (blue) and the C-POD (red). Superimposed are night and day lights (night is in grey) and tides in arbitrary units.

250 natural environment such as crabs, shrimps etc. However, no detailed analysis of background noise has
 251 yet been done.

252 It is intriguing to note that in both instruments, no click are detected between the 8/05 in the morning
 253 (when we changed the memory card, with two Chilean dolphins interacting with the diver) and the 10/05
 254 late at night. On the 11th of May, the QHB instrument was removed. In the data of the C-POD, such large
 255 intervals without click are quite unusual (only three registered in the three months of data).

256 **Clicks properties** The clicks that were registered by QHB have a good definition and are similar to the
 257 clicks of Chilean dolphins described in the literature (Götze et al., 2010). The clicks parameters, given in
 258 table 1, are consistent with NBHF clicks, as previously mentioned.

Table 1. Parameters of the clicks recorded by QHB instrument (average value and standard deviation, N=13 878.)

Peak frequency	Frequency bandwidth 'rms'	Duration 'rms'
(135 ± 15) kHz	(19 ± 5) kHz	(57 ± 21) μ s
Centroid frequency	Frequency bandwidth at -3 dB	Duration at -10 dB
(141 ± 10) kHz	(6 ± 3) kHz	(53 ± 26) μ s
Inter-click interval (ICI)	Frequency bandwidth at -10 dB	Duration at -20 dB
(88 ± 117) ms	(16 ± 8) kHz	(106 ± 52) μ s

259 Nevertheless, the statistical distributions of the parameters are not all Gaussian, as can be seen in
 260 figure 5. This is particularly the case with the distribution of ICI, with a standard deviation larger than the
 261 average value, and the peak frequency, which is clearly multimodal.

262 The main peak of the distribution of peak frequency is itself bi-modal with a mode around 126 kHz,
 263 and another at 134 kHz. On the other hand, a mode is visible at very high frequency around 164 kHz.
 264 These three modes have not been described for the Chilean dolphin but are strikingly similar to what
 265 Reyes Reyes et al. (2015) describe for the Commerson's dolphin (*Cephalorhynchus commersonii*), a close

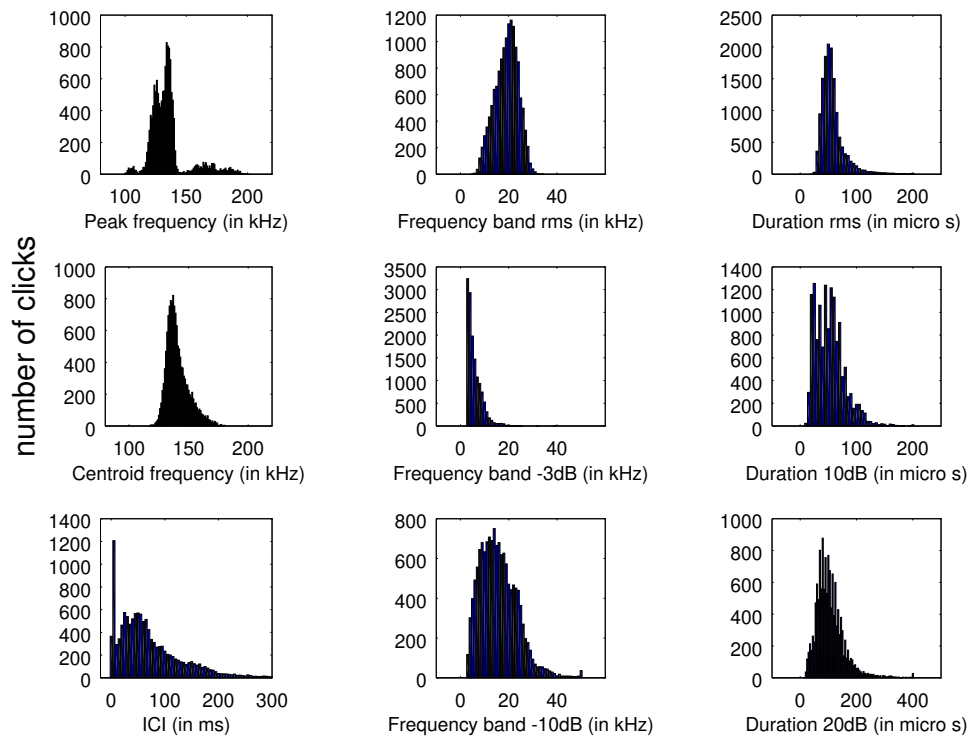


Figure 5. Distributions of the parameters of the detected clicks. Average and standard deviation are given in table 1

266 parent of the Chilean dolphin found mainly in the Argentina coast, subantarctic islands and Southern
 267 Chilean Patagonia (Crespo et al., 2017). Finally, a last mode is present around 107 kHz, corresponding
 268 to a few trains of very rapid clicks, or buzz. These clicks are also visible in the ICI distribution (very
 269 short ICI). Visual examination of the clicks with short ICI confirmed there was no superimposed trains of
 270 clicks, and thus the ICI actually corresponds to an intrinsic parameter of the emitted sound. Thus, we
 271 confirm the results of Götz et al. (2010) that buzz clicks are emitted at a slightly lower frequency.

272 Three examples of clicks are given in figure 6. We found a lot of the clicks had a bandwidth rather
 273 large, with some proportion having more energy at 170 kHz. A clear notch is also present in the spectra at
 274 150 kHz as noticed by Reyes Reyes et al. (2015) for the Commerson's dolphin. Interestingly, this notch at
 275 around 150 kHz has also been described for not-so-closely related species, such as different species of
 276 porpoises (Reyes Reyes et al., 2018). The clicks found in a buzz, or rapid sequence, have much shorter
 277 ICI and clearly different features. The number of cycles included in the envelope of the click is much
 278 lower than for normal NBHF clicks, and shows some similarity with typical clicks of larger odontocetes.
 279 The spectrum shows a greater bandwidth, with energy lower than 75 kHz. Though we had no means of
 280 measuring the distance of the dolphin to the sensor, and thus we could not calculate source levels in this
 281 study, the buzz clicks that we found are generally of lower intensity compared to nearby normal NBHF
 282 clicks.

283 3 DISCUSSION

284 3.1 Validation of C-POD detections

285 Our results concerning the comparison between C-POD detectors and a recording device are twofold.
 286 On the one hand, the absolute numbers of detections are widely different between the two instruments.
 287 On the other hand however, almost all 'events' have been detected by both. Although this comparison
 288 between C-POD detector and full signal recording has never been done for the Chilean dolphin, it has

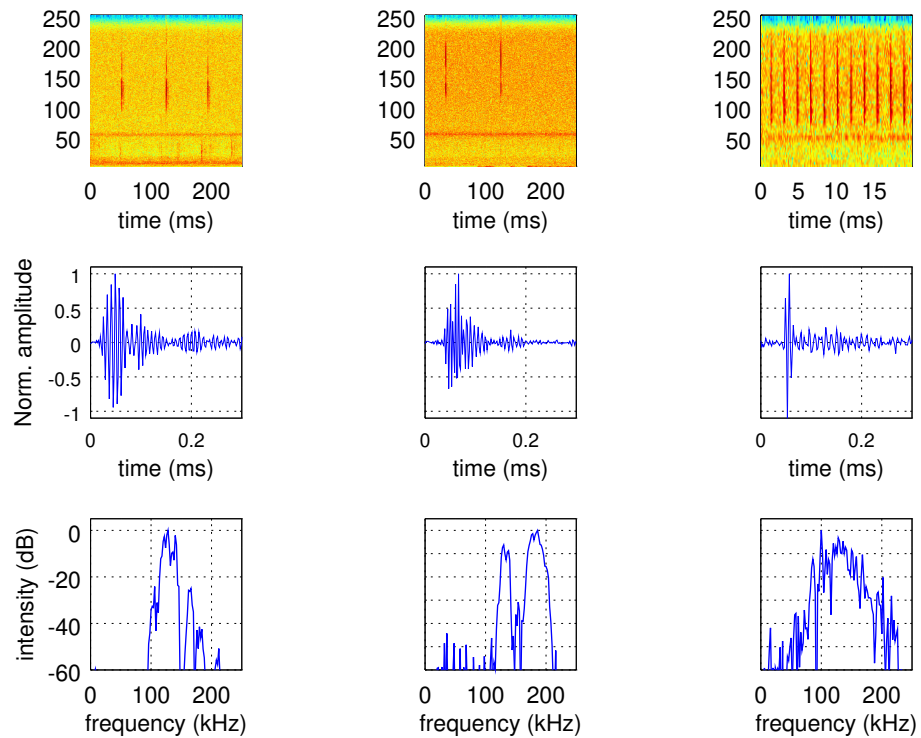


Figure 6. Examples of clicks of Chilean dolphins recorded by QHB. On the left, a typical click with peak frequency around 135 kHz. In the center, a less frequent click with peak frequency around 180 kHz. On the right an example of a click found in a buzz, or rapid sequence of clicks. **Top** : spectrogram of the signal with a FFT on 2^{10} points except for the right picture (2^7 points), Blackman window, 50% overlap. **Middle** : zoom on the normalized waveform of the click at the center of the figure just above. **Bottom** : spectra of the click with normalized intensity, FFT of $2^9 = 512$ points (1 ms of the signal), centered on the detection.

289 been measured for other species, such as the harbour porpoise, one of the species most studied with
 290 clicks detector, with somewhat distinct conclusions. While Sarnocinska et al. (2016) found a rather low
 291 correlation between the clicks per minutes detected by a C-POD detector and a Soundtrap recording
 292 device, installed at a distance of about 2 meters in the same mooring line, Jacobson et al. (2017) found
 293 a much better correlation between the results of the same two instruments, installed so that the two
 294 hydrophones were as close as possible. Such differences may be due to the respective position of the
 295 instruments, but, more importantly, by the difference of sensibility of each individual instrument. In our
 296 experiment, it is obvious that the recorder is much more sensible than the detector, independently of the
 297 difference of the location of the instruments. However, and though the numbers of detected clicks show a
 298 difference of 600 %, the number of detected 'events' is a much more robust indicator. Indeed, 20 of the
 299 22 events detected by the QHB recorder have also been detected by the C-POD instrument, a difference
 300 of hardly 5% (concerning the weakest events, see fig. 4). We have defined an 'event' as a series of trains
 301 separated by less than 20 minutes after observing that the number of 'events' obtained for a given duration
 302 were less variable for this time scale. The classical parameters of chunks with positive detection is thus
 303 much more robust to the global sensibility of the instrument than the absolute number of detections. The
 304 size of the chunks should be defined after considering the data, since it can be very different for each
 305 experiment, depending on the size of habitual territory of the dolphins (if any), the number of groups
 306 inhabiting the area, etc.

307 In this mark, our study validates the use of a C-POD detector for long-term monitoring of the Chilean
 308 dolphin in the Patagonia fjords.

309 **3.2 Clicks properties**

310 In a whole, our results for Chilean dolphins clicks compare well with those of Götz et al. (2010), the only
311 published study for this species to the date. However, a certain difference exists in the peak (or centroid)
312 frequency measures. While Götz et al. (2010) found peak frequency of around 127 kHz, with a small
313 standard deviation of 4 kHz, we found an average peak frequency about 10 % higher at 135 kHz and a
314 much bigger standard deviation of 15 kHz. To compute the average, we took all detected clicks, without
315 reference to on-axis or off-axis clicks. There is no precise study available describing the beam pattern of
316 Chilean dolphins, however, based on measurements of the NBHF clicks of harbour porpoise (Macaulay
317 et al., 2020), we can expect a narrow beam with little deformation of the clicks in a cone of 10° and then a
318 high attenuation (of more than 10 dB) making the detection difficult. Thus, most of the detected clicks
319 can be practically considered on-axis. What's more, Götz et al. (2010) found very little difference on the
320 average peak frequency between 'on-axis' clicks and the total set ('on axis' being defined as the most
321 intense clicks of a train).

322 On the other hand, our data set is much larger than the pioneer work of Götz et al. (2010) (almost
323 14 000 clicks were analysed in our study, as compared to less than 1000 in this previous work). The
324 distribution of peak frequencies along the set shows a certain diversity, as was described in the 'Results'
325 section. Four modes are visible in the frequencies distribution, respectively at 107, 126, 134 and 164 kHz.
326 Obviously, the panel of possible frequencies is much bigger and we can imagine that Götz et al. (2010)
327 data is mainly similar to our second mode (second in order of importance) at 126 kHz. Thanks to the large
328 number of clicks of our data set, we can precise the values of the main peaks by fitting a sum of Gaussian
329 functions on the histogram of peak frequencies of figure 5. Using an implemented Marquardt-Levenberg
330 algorithm in Octave, we find that the peak frequencies are 105.8, 125.1, 135.5 and 168.3 kHz (with
331 respective standard deviations of 4.3, 6.0, 4.4, and 18.0 kHz, see figure 7). These values of the standard
332 deviations compares well with the value in Götz et al. (2010) and show the interest of a large data set,
333 made possible by mid-term monitoring.

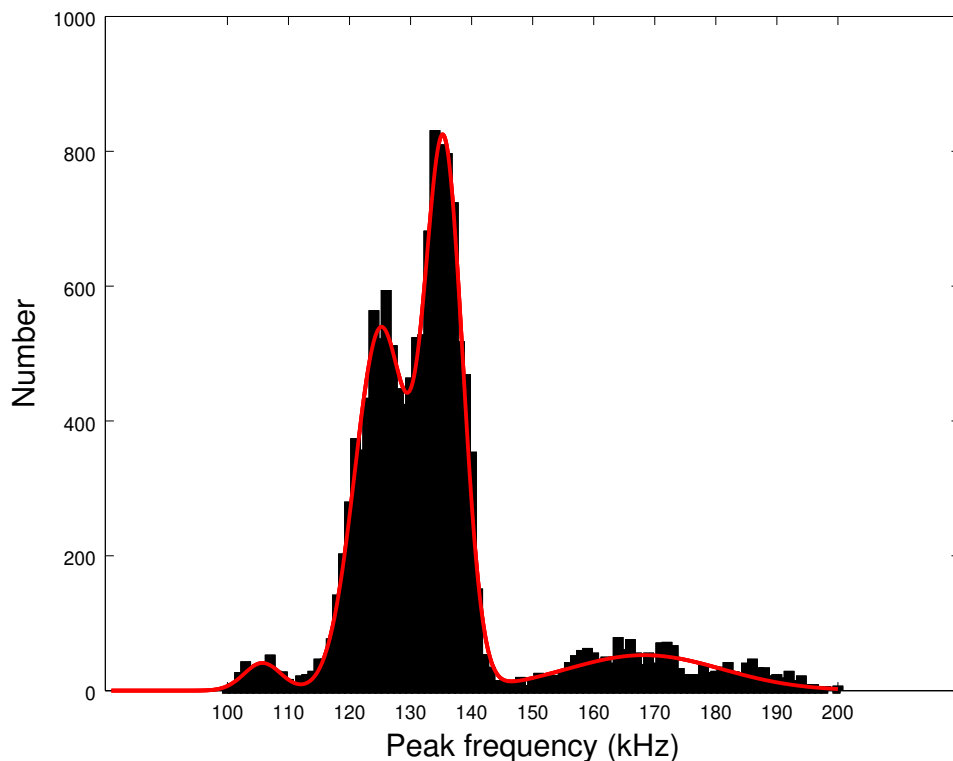


Figure 7. Fitting of the four peaks of the first histogram in figure 5 (peak frequencies) by a sum of four Gaussian functions

334 Why the first work on Chilean dolphin did not evidence the other types of clicks, such as high
335 frequency clicks, may be explained by the setting of the experiment, which had much less signals and
336 possibly selected certain types of behaviour due to the presence of the boat. Dolphins have been shown
337 to respond actively to the presence of a boat, even without engine (Martin et al., 2021), and thus their
338 clicks repertoire is possibly modified by the observation. What's more, they probably used a low pass
339 filter (Rojas-Mena, 2009) at 200 kHz, making high frequency not so easily detectable. A last possible
340 explanation is the geographical difference, since Götz et al. (2010) study is located about 1 000 km North
341 of our experiment, in the much more frequented waters of Chiloe archipelago.

342 We can remark that the study of the Commerson dolphin by Reyes Reyes et al. (2015) also presented
343 dissimilarity with the pioneer measures of Kyhn et al. (2010), with higher average frequencies and a much
344 larger standard deviation for peak or centroïd frequencies. They also describe three clusters of clicks
345 for this species, highly similar to what we found, with the median for each cluster being respectively at
346 129, 137 and 173 kHz. No lower frequency or larger band buzz clicks are found in Reyes Reyes et al.
347 (2015) study, though some have been described afterwards by Martin et al. (2021). It is probable that
348 a larger set of data, and more quietly recorded than the pioneer studies on these cryptic species, lead to
349 a panel of novel types of clicks that is particularly rich and interesting. We can mention that the high
350 frequency component of the clicks cannot be found by automated detectors such as C-POD (low-pass
351 filter at 160 kHz) or more traditional recorders such as Soundtrap (low-pass filter at 150 kHz).

352 Another type of clicks detected in our data set are usually found in a very rapid train of clicks, usually
353 denominated buzz (fig. 6, right). A visual examination of our data show about 20 such trains, 7 of them
354 within the same file of 9'30". We define a 'buzz' when the ICI is lower than 5 ms, usually around 2 ms,
355 as compared to normal trains with ICI being between 50 and 100 ms. Our data does not allow a clear
356 separation between 'buzz' and 'burst pulse' as suggested by Martin et al. (2018) for the Heaviside's
357 dolphin (*Cephalorhynchus heavisidii*), a close parent of the Chilean dolphin. While some of the rapid
358 trains are part of normal trains with an accelerating or decelerating pattern, some seem isolated without a
359 normal train around. The characteristics of the clicks are similar in both cases, unlike what was found
360 by the cited authors. Despite some variability, possibly due to a variable signal to noise ratio, a general
361 pattern of a larger bandwidth and a lower intensity is visible for most of the clicks with short ICI, as
362 shown in figure 6, confirming Götz et al. (2010) measures. No visual follow-up was done, so that we
363 cannot link the buzz to a specific behaviour. Nevertheless, in our data we found no superimposed trains
364 (indicating several individuals), so the hypothesis of a foraging compartment seems more probable than
365 social interaction. Obviously, visual monitoring would be necessary to assert this point.

366 3.3 Feasibility of mid-term monitoring

367 Even though the experiment described in this study only lasted one week, we classified it as mid-term
368 monitoring because it combined characteristics of the two usual ways to study acoustic productions
369 of coastal dolphins : several months of long term monitoring by mean of detectors versus few hours
370 short term studies with dipping hydrophones from a boat. We think that our approach could be a good
371 alternative for future studies.

372 A long term monitoring, such as few months of recording at a sample rate around 500 kHz is still
373 not feasible in remote areas or without very large resources. It produces about one terabyte of data in ten
374 days, which is the order of magnitude of the duration of our experiment. The alternative of a very low
375 duty cycle is not very well adapted to dolphins which produce a few minutes of sound at each passage as
376 presented in this work. On the other hand, the short term studies are usually invasive or not adapted to
377 remote areas. Much less clicks are recorded and the whole repertoire of the recorded species is difficult to
378 obtain. Our protocol enables to have a relatively non invasive experiment along with a detailed audio data
379 set which is quasi continuous for several days.

380 We also showed the feasibility of acoustic monitoring of NBHF species in remote habitat, with
381 university built material. Our device is adapted to simple installation (two stable feet) in the sheltered
382 channels of Patagonia, at low depth but can be modulated to other uses, depending of the place or species
383 to monitor. The presence of the material did not seem to modify the acoustic behavior of the dolphins
384 during the recordings. Nevertheless it is worth noting that during the maintenance, a group of Chilean
385 dolphins present in the zone fled away while two dolphins of the group stayed and repeatedly approached
386 the diver. Afterwards, no acoustic production were recorded by HQB nor detected by the CPOD during
387 three days. The setting-up of this type of device and/or the unusual presence of a diver could have had an

388 impact on the mid-term presence of coastal dolphins. We thus recommend to install, maintain and retrieve
389 the instruments when dolphins are not present.

390 4 CONCLUSION

391 Mid-term recording shows an interesting complementarity with other more traditional methods of acoustic
392 studies of small dolphins in remote areas. They allow an insight on a repertoire much more diverse than
393 was previously considered. This detailed examination of clicks recorded from animals as little disturbed
394 as possible opens new questions concerning sound production or sonar utilization by these species. To
395 complete this work, we suggest mid-term studies should be associated with visual monitoring, ideally
396 from the shore, to avoid disturbing the animals, and taking advantage of the very coastal habits of these
397 species in remote and pristine areas. On the other hand, by comparing our detection results with C-POD
398 detection, this study also validates the use of standard detectors for large term monitoring of the presence
399 of small cetaceans in remote areas.

400 Working with local communities and international universities, affordable missions can be designed
401 to know more about these sensitive species, very prone to be affected by the unregulated development of
402 human activities on the coastal environment.

403 ACKNOWLEDGMENTS

404 The authors want to thank the CNRS 'appel à projets unique INS2I 2021' for the grant BIOSSA :
405 Biodiversity Songs of South America, and the Pole INPS of university of Toulon, which have granted
406 some material from SMIoT Scientific Instrumentation Platform. We thank "Agrupación de turismo
407 náutico y conservación de cetáceos de Puerto Cisnes" and particularly Celestino Ancamil, Israel Ancamil,
408 Francisca Castro Muñoz, Jorge Duamante, Catalina Paz Jorquera, Cristian Maldonado y Hector Pérez
409 Baez for their knowledge of the studied zone and their participation in field work. The authors want to
410 thank CIEP staff : Daniel Pérez and Claudio Herranz for the preparation of the devices and the logistics.

411 REFERENCES

- 412 Andersen, S. H. and Amundin, M. (1976). Possible predator-related adaption of sound production and
413 hearing in the harbour porpoise (*phocoena phocoena*). *Aquat. Mamm.*, 4:56–58.
- 414 Au, W. (1993). *The sonar of dolphin*. Springer.
- 415 Betti, F., Bavestrello, G., Bo, M., Enrichetti, F., Loi, A., Wanderlingh, A., Perez-Santos, I., and Daneri, G.
416 (2017). Benthic biodiversity and ecological gradients in the seno magdalena (puyuhuapi fjord, chile).
417 *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 198:269–278.
- 418 Crespo, E., Olavarria, C., Dellabianca, N., Iñíguez, M., Ridoux, V., and Reeves, R. (2017).
419 *Cephalorhynchus commersonii (errata version published in 2018)*. The IUCN Red List of Threatened
420 Species.
- 421 Eaton, J., Bateman, D., and Hauberg, S. (2009). *GNU Octave version 3.0.1 manual: a high-level*
422 *interactive language for numerical computations*. CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN
423 1441413006.
- 424 Försterra, G., Häussermann, V., and Laudien, J. (2017). *Animal Forests in the Chilean Fjords: Discoveries,*
425 *Perspectives, and Threats in Shallow and Deep Waters*, pages 277–313.
- 426 Gallus, A., Dähne, M., Verfuss, U., Bräger, S., Adler, S., Siebert, U., and Benke, H. (2012). Use of static
427 passive acoustic monitoring to assess the status of the 'critically endangered' baltic harbour porpoise in
428 german waters. *Endangered Species Research*, 18:265–278.
- 429 Gillespie, D., Palmer, L., Macaulay, J., Sparling, C., and Hastie, G. (2020). Passive acoustic methods for
430 tracking the 3d movements of small cetaceans around marine structures. *PLOS ONE*, 15:e0229058.
- 431 Götz, T., Antunes, R., and Heinrich, S. (2010). Echolocation clicks of free-ranging chilean dolphins
432 (*cephalorhynchus eutropia*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128:563–6.
- 433 Guzmán, D. and Silva, N. (2006). Condiciones oceanográficas físicas y químicas, entre boca del guafo y
434 fiordo aysén (crucero cimar 7 fiordos). *Ciencia y Tecnología del Mar*, 29.
- 435 Hammond, P., Bearzi, G., Bjørge, A., Forney, K., Karczmarski, L., Kasuya, T., Perrin, W., Scott, M.,
436 Wang, J., Wells, R., and Wilson, B. (2008). *Lagenorhynchus australis*. The IUCN Red List of
437 Threatened Species.

- 438 Hammond, P., Bearzi, G., Bjørge, A., Forney, K., Karczmarski, L., Kasuya, T., Perrin, W., Scott, M.,
439 Wang, J., Wells, R., and Wilson, B. (2012). *Phocoena spinipinnis*. The IUCN Red List of Threatened
440 Species.
- 441 Heinrich, S., Genov, T., Riquelme, M., and Hammond, P. (2019). Fine scale habitat partitioning of Chilean
442 and Peale's dolphins and their overlap with aquaculture. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater
443 Ecosystems*, 29:212–226.
- 444 Heinrich, S. and Reeves, R. (2017). *Cephalorhynchus eutropia*. The IUCN Red List of Threatened
445 Species.
- 446 Häussermann, V. and Försterra, G. (2009). *Marine benthic fauna of Chilean Patagonia*.
- 447 Iriarte, J., González, H., and Nahuelhual, L. (2010). Patagonian fjord ecosystems in southern Chile as a
448 highly vulnerable region: Problems and needs. *Ambio*, 39:463–6.
- 449 Jacobson, E., Merrens, K., Forney, K., and Barlow, J. (2017). Comparison of harbor porpoise (*Phocoena
450 phocoena*) echolocation clicks recorded simultaneously on two passive acoustic monitoring instruments.
451 Technical report, NOAA.
- 452 Jaramillo Legorreta, A. M., Cárdenas Hinojosa, G., Nieto, E., Rojas-Bracho, L., Thomas, L., Ver Hoef,
453 J., Moore, J., Taylor, B., Barlow, J., and Tregenza, N. (2019). Decline towards extinction of Mexico's
454 vaquita porpoise (*Phocoena sinus*). *Royal Society Open Science*, 6:190598.
- 455 Kyhn, L., Jensen, F., Beedholm, K., Tougaard, J., Hansen, M., and Madsen, P. (2010). Echolocation in
456 sympatric Peale's dolphins (*Lagenorhynchus australis*) and Commerson's dolphins (*Cephalorhynchus
457 commersonii*) producing narrow-band high-frequency clicks. *The Journal of Experimental Biology*,
458 213:1940–9.
- 459 Ladegaard, M., Jensen, F., de Freitas, M., Silva, V., and Madsen, P. (2015). Amazon river dolphins (*Inia
460 geoffrensis*) use a high-frequency short-range biosonar. *Journal of Experimental Biology*, 218:3091–
461 3101.
- 462 Macaulay, J., Malinka, C., Gillespie, D., and Madsen, P. (2020). High resolution three-dimensional beam
463 radiation pattern of harbour porpoise clicks with implications for passive acoustic monitoring. *The
464 Journal of the Acoustical Society of America*, 147:4175–4188.
- 465 Marques, T., Thomas, L., Martin, S., Mellinger, D., Shaffer, J., Moretti, D., Harris, D., and Tyack,
466 P. (2012). Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological Reviews of the
467 Cambridge Philosophical Society*, 88.
- 468 Martin, M., Elwen, S., Kassanjee, R., and Gridley, T. (2019). To buzz or burst-pulse? The functional role
469 of Heaviside's dolphin, *Cephalorhynchus heavisidii*, rapidly pulsed signals. *Animal Behaviour*, 150.
- 470 Martin, M., Gridley, T., Elwen, S., and Jensen, F. (2018). Heaviside's dolphins (*Cephalorhynchus
471 heavisidii*) relax acoustic crypsis to increase communication range. *Proceedings of the Royal Society B:
472 Biological Sciences*, 285.
- 473 Martin, M., Torres Ortiz, S., Reyes Reyes, M., Marino, A., Iñiguez, M., and Wahlberg, M. (2021).
474 Commerson's dolphins (*Cephalorhynchus commersonii*) can relax acoustic crypsis. *Behavioral Ecology
475 and Sociobiology*, 75.
- 476 Palmer, L., Gillespie, D., Macaulay, J., Sparling, C., Russell, D., and Hastie, G. (2021). Harbour porpoise
477 (*Phocoena phocoena*) presence is reduced during tidal turbine operation. *Aquatic Conservation:
478 Marine and Freshwater Ecosystems*.
- 479 Pichinao, I., Rojas Martínez, I., Soto, C., Cabrera, R., and Boldt, J. (2019). Reporte de resultados:
480 Censo fauna marina y avifauna en Raúl Marín Balmaceda. febrero 2019. región de Aysén. *Revista de
481 Aysenología*, 7:49–57.
- 482 Reyes Reyes, M., Iñiguez, M., Hevia, M., Hildebrand, J., and Melcón, M. (2015). Description and
483 clustering of echolocation signals of Commerson's dolphins (*Cephalorhynchus commersonii*) in Bahía
484 San Julián, Argentina. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138:2046.
- 485 Reyes Reyes, V., Marino, A., Dellabianca, N., Hevia, M., Torres, M., Raya Rey, A., and Melcón, M.
486 (2018). Clicks of wild Burmeister's porpoises (*Phocoena spinipinnis*) in Tierra del Fuego, Argentina:
487 Notes. *Marine Mammal Science*, 34.
- 488 Robbins, J., Brandecker, A., Cronin, M., Jessopp, M., McAllen, R., and Culloch, R. (2015). Handling
489 dolphin detections from c-pods, with the development of acoustic parameters for verification and the
490 exploration of species identification possibilities. *Bioacoustics*, pages 1–12.
- 491 Rojas-Mena, R. (2009). *Caracterización del repertorio acústico del delfín chileno Cephalorhynchus
492 eutropia (Gray, 1846) y del delfín austral Lagenorhynchus australis (Peale, 1848) en la isla de Chiloé,*

- 493 *region de los lagos, chile*. Tesis de grado, Universidad Austral de Chile.
- 494 Sarnocinska, J., Tougaard, J., Johnson, M., Madsen, P., and Wahlberg, M. (2016). Comparing the
495 performance of c-pods and soundtrap/pamguard in detecting the acoustic activity of harbor porpoises
496 (*phocoena phocoena*). volume 27, page 070013.
- 497 Silva, D., Barbosa, R., Conversani, V., Botta, S., Hohn, A., and Santos, M. (2020). Reproductive
498 parameters of franciscana dolphins (*pontoporia blainvillei*) of southeastern brazil. *Marine Mammal*
499 *Science*, 36.
- 500 Silva, N. and Palma, S. (2008). *Progress in the oceanographic knowledge of Chilean interior waters,*
501 *from Puerto Montt to Cap Horn*. Comité Oceanográfico Nacional Pontificia Universidad Católica de
502 Valparaíso.
- 503 Silva, N. and Vargas, C. (2014). Hypoxia in chilean patagonian fjords. *Progress in Oceanography*, 129.
- 504 Sousa-Lima, R., Norris, T., Oswald, J., and Fernandes, D. (2013). A review and inventory of fixed
505 autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals. *Aquatic Mammals*, 39:205–
506 210.
- 507 Stern, S., Keener, W., Szczepaniak, I., and Webber, M. (2017). Return of harbor porpoises (*phocoena*
508 *phocoena*) to san francisco bay. *Aquatic Mammals*, 43:691–702.
- 509 Sucunza, F., Danilewicz, D., Andriolo, A., Azevedo, A., Secchi, E., and Zerbini, A. (2019). Distribution,
510 habitat use, and abundance of the endangered franciscana in southeastern and southern brazil. *Marine*
511 *Mammal Science*, 36.
- 512 Tregenza, N. (2014). Cpod.exe: a guide for users. Technical report, Chelonia Ltd.
- 513 Van Waerebeek, K., Van Bresseem, M.-F., Félix, F., Alfaro Shigueto, J., García-Godos, I., Chávez-
514 Lisambart, L., Ontón, K., Montes, D., and Bello, R. (1997). Mortality of dolphins and porpoises in
515 coastal fisheries off peru and southern ecuador in 1994. *Biological Conservation*, 81:43–49.
- 516 Weel, S., Geelhoed, S., Tulp, I., and Scheidat, M. (2018). Feeding behaviour of harbour porpoises
517 (*phocoena phocoena*) in the ems estuary. *Lutra*, 61:137–152.
- 518 Wilson, D. and Mittermeier, R., editors (2014). *Handbook of the mammals of the world*, volume 4. Lynx
519 Edicions.
- 520 Zamorano-Abramson, J., Gibbons, J., and Capella, J. (2010). Diversity and summer distribution of
521 cetaceans in inlet waters of northern aisé, chile. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 38:151–157.