

ÉCOLE DOCTORALE MER ET SCIENCES 548

Equipe Dynamiques de l'information (DYNI), LIS, CNRS UMR 7020

THÈSE présentée par :

Julie PATRIS

soutenue le : **18 décembre 2019**

pour obtenir le grade de Docteur en informatique

Spécialité : bioacoustique

**Contributions en méthodes pour le
suivi de mysticètes par acoustique
passive**

THÈSE dirigée par :

M. GLOTIN Hervé
M. ASCH Mark

PU, LIS, Université de Toulon (directeur)
PU, LAMFA, Université de Picardie (co-directeur)

JURY :

M. SEMPERE Richard
M. CRISTINI Paul
M. MARS Jérôme
Mme SAMARAN Flore
M. BONNEL Julien

DR, MiO, CNRS (président)
CR HdR, LMA, CNRS (rapporteur)
PU GIPSA-Lab Université Grenoble Alpes (rapporteur)
MdC, Lab STICC, ENSTA Bretagne (examinateuse)
MdC HdR, Woods Hole, USA (examinateur)

INVITÉE :

Mme SOUSA-LIMA Renata Profesora, U. Federal do Rio Grande do Norte, Brésil



Contributions en méthodes pour le suivi de mysticètes par acoustique passive

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 18 décembre 2019 pour l'obtention du grade de docteur de l'université de Toulon (discipline : informatique) par

Julie PATRIS

devant le jury composé de :

Rapporteurs : Paul Cristini (LMA, Marseille)
Jérôme Mars (GIPSA, Grenoble)

Examinateurs : Flore Samaran (ENSTA-Bretagne, Brest)
Julien Bonnel (WHOI, Woods Hole)
Richard Sempéré (MIO, Marseille)
Hervé Glotin (LIS, Toulon) Directeur
Mark Asch (LAMFA, Amiens) Co-directeur

Invitée : Renata Sousa-Lima (Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brésil)

Ils sont tout le temps agités. Ils ont de grandes extrémités qu'ils bougent tout le temps. Ils ne sont pas très ronds, n'ont pas la majestuosité des formes accomplies et suffisantes et ont une minuscule tête mobile où semble se concentrer toute leur étrange vie. Ils viennent en glissant sur l'eau mais sans nager, comme des oiseaux et donnent la mort avec une fragile et gracieuse férocité. [...] De temps en temps ils chantent mais seulement pour eux-mêmes et leur chant n'est pas un appel mais plutôt une lamentation déchirante. Rapidement ils se fatiguent et quand tombe la nuit ils se couchent sur les petites îles qui les transportent et peut-être qu'ils dorment ou qu'ils contemplent la lune. Ensuite ils s'éloignent en glissant en silence et c'est évident qu'ils sont tristes.

[*les êtres humains décrits par les baleines*]
Antonio Tabucchi, la dame de Puerto Pim, 1983.

Remerciements

Merci à toute l'équipe DYNI pour le soutien technique et théorique, et en particulier à Hervé Glotin.

Merci à l'université d'Aix Marseille de m'avoir accordé un congé de formation.

Merci aux collègues du LMA à Marseille, une pensée pour Dimitri dont l'enthousiasme a été fondamental pour commencer ce travail.

Merci aux relecteurs de cette thèse, à mes directeurs de thèse, aux examinateurs, et aux rapporteurs pour leurs nombreux conseils. Merci aux relecteurs anonymes des articles présentés.

Merci à Susannah Buchan de l'université de Concepción, César Villaroel et toute l'équipe du centre de plongée Explorasub, l'ONG Eutropia, l'équipe de l'université de Valparaiso, les nombreux étudiants et chercheurs chiliens qui nous ont aidé. Merci à tous ceux qui ont aidé d'une manière ou d'une autre, les marins, opérateurs touristiques et habitants de la caleta Chañaral de Aceituno pour le soutien logistique et scientifique lors des études dans l'archipel de Humboldt. Merci à toute l'équipe LAMLA, et surtout à Renata pour cette belle première rencontre à Natal. Merci Franck de m'avoir aidée à écrire les remerciements.

Merci à tous !

Mañum kom pu che !

Table des matières

1 Contexte et objectifs	11
1.1 Introduction	11
1.2 Les populations de grands cétacés	12
1.3 Bioacoustique des mammifères marins	14
1.4 Détection, Classification, Localisation et Estimation de Densité des mammifères marins	16
1.4.1 La surveillance acoustique passive ou PAM (Passive Acoustic Monitoring)	17
1.4.2 Détection et classification	18
1.4.3 Estimation d'abondance	19
1.5 Localisation de la source sonore	20
1.5.1 Techniques à plusieurs récepteurs	20
1.5.2 Localiser grâce à un seul capteur	24
2 Acoustique sous-marine	27
2.1 Un aperçu de la physique du son	27
2.1.1 Equation de d'Alembert	27
2.1.2 Passage en fréquentiel : équation de Helmholtz	30
2.1.3 Représentation d'une onde	30
2.1.4 Caractérisation du son	31
2.1.5 Interfaces	33
2.1.6 Le son dans l'océan	34
2.2 Modèles de propagation utilisés en bioacoustique	36
2.2.1 Types de modèles	37
2.2.2 Choix d'un modèle	41
2.3 SPECFEM	42
3 Constitution d'un nouveau corpus pour l'étude de mysticètes	45
3.1 Présentation de l'équipe	45
3.1.1 Université de Toulon et LIS : préparation et suivi technique	46
3.1.2 Université de Valparaíso et ONG Eutropia : suivi visuel des animaux	46
3.1.3 Equipe technique sur place	47
3.2 Eléments techniques du dispositif d'enregistrement	47
3.2.1 Hydrophone	47
3.2.2 Enregistrement	48
3.2.3 Caisson	49
3.3 Choix du lieu et pose de la ligne d'ancrage	50
3.3.1 La caleta Chañaral de Aceituno	50
3.3.2 Lieu de la bouée	51

3.3.3	Description de la ligne d'ancrage	52
3.4	Déroulé des mesures	53
3.4.1	Choix des paramètres	53
3.4.2	Calendrier	54
3.4.3	Quelques imprévus	55
3.5	Corpus obtenu	56
3.5.1	Volume de données	56
3.5.2	Analyse généraliste d'un sous-échantillon	56
3.5.3	Un signal non biologique : les explosions sous-marines	60
3.6	Conclusion	62
4	Caractérisation du signal d'intérêt : le chant de la baleine bleue du sud est du Pacifique	63
4.1	Une vocalisation très spécifique : les chants des baleines bleues	63
4.1.1	Le chant chez les rorquals	64
4.1.2	Variations locales des chants de baleines bleues	64
4.2	Identification du chant de la baleine bleue 'chilienne'	66
4.2.1	Résumé	66
4.2.2	Contribution des différents auteurs	68
4.2.3	Article	68
4.3	Etude détaillée d'un chant pulsé	79
4.3.1	Résumé	79
4.3.2	Contribution des différents auteurs	84
4.3.3	Article	84
5	La baisse en fréquence des chants de baleines bleues du sud-est du Pacifique	95
5.1	Résumé	95
5.2	Contribution des différents auteurs	98
5.3	Article	98
6	Vers une localisation de la source du chant par inversion monohydrophone	109
6.1	Etat de l'art de la localisation mono-hydrophone	109
6.1.1	Localisation mono-hydrophone	109
6.1.2	Application à la localisation de cétacés	110
6.1.3	L'intérêt des méthodes par éléments spectraux	111
6.2	Présentation de la méthode	112
6.2.1	Principe de réciprocité de la fonction de Green	112
6.2.2	Paramètres généraux des simulations SPECFEM	113
6.2.3	Description du premier terrain : le golfe de Corcovado	114
6.2.4	Simulation Chañaral : choix des paramètres physiques	117
6.2.5	Le problème du signal source	127
6.3	Premiers résultats	135
6.3.1	Résultats des tests simulés et discussion	136
6.3.2	Résultats terrain	143
6.4	Discussion	147
6.5	Article publié par la conférence MTS/IEEE Océans 2019	150

7 Conclusion et perspectives	161
7.1 Un corpus fondamental	161
7.2 L'analyse et la compréhension des chants	162
7.3 Faisabilité de la localisation monohydrophone en zone complexe	162
7.4 Collaborations transdisciplinaires et internationales	164
Appendices	168
A Rapport sur des explosions détectées près de la “reserva marina Isla Chañaral” à destination des organismes de gestion du site (Sernapesca, CONAF)	168
B Rapport sur la localisation monohydrophone d'un dauphin grâce aux sons brefs basse fréquence	179

Chapitre 1

Contexte et objectifs

1.1 Introduction

Notre XXIème siècle est marqué par une certaine prise de conscience de la fragilité des systèmes océaniques. La pollution, la surpêche, l’industrialisation, les effets du changement climatique représentent des menaces considérables à court terme. Les chiffres mis en avant lors de la première conférence internationale pour la conservation des océans à l’ONU en 2017 [33] sont frappant : d’ores et déjà, 30% des stocks mondiaux de poissons sont surexploités, et plus de 50% sont totalement exploités. Les habitats côtiers sont sous pression, avec environ 20% du récif corallien mondial perdu et 20% dégradé. A eux seuls, les déchets plastiques tuent chaque année d’innombrables poissons, près d’un million d’oiseaux de mer, une centaine de milliers de mammifères marins.

Ces derniers peuvent être d’une aide non négligeable pour la prise de conscience des risques, ainsi que la mise en œuvre d’une meilleure gestion de nos océans. Ceci est notamment vrai pour le plus grand des mammifères marins, la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*). Son charisme, la destruction spectaculaire qu’il a subi lors du XXème, en font une espèce parapluie emblématique. Cependant, il s’agit d’une espèce que l’on connaît comparativement assez peu. En effet, l’étude des grands cétacés est extrêmement difficile. Les moyens d’études classiques de la biologie ne sont pas toujours adaptés à une espèce qui, bien que très grande, présente une densité d’individus extrêmement faible, et des habitudes essentiellement pélagiques. Le suivi visuel est logistiquement complexe et peu informatif, puisqu’il ne renseigne que sur les moments où les animaux font surface. Le marquage des animaux par des appareils comprenant capteurs et émetteur est également complexe, et présente des aspects discutables : il est relativement invasif sur l’individu, ce qui biaise possiblement les données recueillies d’une part, et d’autre part pose des risques concrets pour une espèce comprenant si peu d’individus au niveau mondial. Dans ce cadre, la bioacoustique marine passive, qui consiste à utiliser le son émis par les animaux pour les étudier, est une piste très intéressante. Cette science, vieille d’un demi-siècle environ, a déjà fourni des résultats spectaculaires tant pour l’étude de la répartition des baleines bleues (voir Branch et al. 2007 [13]) que pour celle de son comportement (répartition en clans, voir McDonald 2006 [84]). Néanmoins, c’est un domaine jeune en grande demande de données et de méthodes. L’échelle de taille et la diversité des océans nécessite une immense quantité de données, et requiert de nouvelles méthodes d’analyse et d’exploitation de ce type spécifique de données.

C’est dans ce cadre que se situe ce travail de thèse. Nous proposons en effet l’étude de certaines vocalisations de la baleine bleue, dans une zone pour l’instant peu étudiée du point de vue acoustique, alors qu’elle présente des atouts remarquables : l’archipel de Humbolt, situé dans la partie nord du Chili, au sud du désert d’Atacama. Dans cette zone marine fertile, où le courant de Hum-

bolt présente des résurgences riches en nutriments, une dizaine d'espèces de mammifères marins viennent régulièrement se nourrir, et notamment la baleine bleue. C'est une opportunité rare de l'étudier dans des conditions logistiques relativement faciles. Nous profitons de cette zone exceptionnelle pour obtenir un corpus de données rare, dont le but est de tester et d'expérimenter deux types de méthodes utiles pour la bioacoustique : d'une part, l'analyse détaillée des vocalisations, avec de nouveaux outils de classification et de compréhension proposés à la communauté. D'autre part, nous étudions également la faisabilité d'une méthode de localisation monohydrophone côtière.

Ce manuscrit présente la synthèse de ces efforts pour proposer de nouvelles méthodes. Nous commencerons par préciser quelques éléments de contexte dans le chapitre 1, d'abord celui de notre objet d'étude, la baleine bleue *Balaenoptera musculus* dont nous évoquerons les conditions dramatiques actuelles, puis celui de la surveillance acoustique passive dans lequel se place notre travail. Enfin, nous présentons les méthodes actuelles pour analyser et classer les chants ainsi que pour localiser les animaux, et notamment à l'aide d'un seul capteur.

Le chapitre 2 offre un rapide panorama de l'acoustique sous-marine, présentée de façon très simple afin de justifier les choix de modèles que nous avons effectués.

Nous présentons ensuite dans le chapitre 3 les détails de l'expérience de terrain que nous avons menée dans l'archipel de Humboldt sur la côte nord du Chili, en détaillant les choix scientifiques, les aspects techniques et le corpus de données obtenues.

Le chapitre 4, après un rapide exposé du contexte des chants de baleines bleues, présente des résultats directement issus de notre corpus de données, d'abord concernant la découverte d'un chant spécifique dans une zone où il n'avait pas encore été détecté, puis présentant quelques résultats concernant des outils de classification et de modélisation de ce chant et de son évolution.

Enfin, nous terminons avec les chapitres 6 et 6.3 qui détaillent notre méthode de localisation mono-hydrophone, les différents tests effectués et les résultats préliminaires obtenus.

1.2 Les populations de grands cétacés

Le projet de cette thèse naît avant tout d'une préoccupation, assez partagée, sur l'état de conservation des populations de baleines, et notamment des grands rorquals tels la baleine bleue *Balaenoptera musculus* (voir illustration de couverture par Andrés Calderón [21], avec son aimable autorisation, et la photographie figure 1.1).

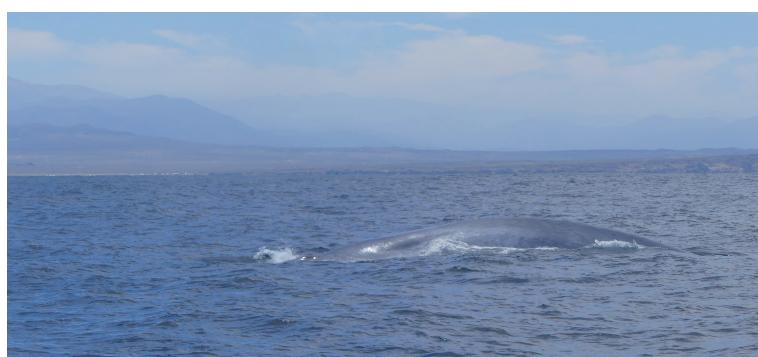


FIGURE 1.1 – La première baleine bleue (*Balaenoptera musculus*) aperçue près des côtes de Chañaral de Aceituno pour la saison 2017/2018, photographiée par Pascale Giraudet le 17 novembre 2017.

La chasse à la baleine est probablement un phénomène qui a accompagné les populations

humaines côtières depuis leurs premiers développements. De fait, sur la zone côtière nord du Chili où nous avons étudié ces animaux, de très anciens pictogrammes attestent de la relation entre les “changos”, un peuple de pêcheurs lié à la côte du désert d’Atacama (voir Rivera et al 2019 [118]), et les cétacés. Parmi plus d’un millier de pictogrammes composant la découverte du site Quebrada el Médano figure une scène représentant des pêcheurs sur leurs radeaux en boudins de cuir d’otarie, très caractéristiques, en train de pêcher d’énormes cétacés (voir figure 1.2).



FIGURE 1.2 – Représentation pictographique d’une chasse à la baleine par les Changos, peuple côtier du nord du Chili, datant probablement du début du second millénaire. Source : Museo chileno de arte precolombino (Photo F. Maldonado).

Cependant, les techniques de chasse, en s’améliorant, ont changé radicalement le rapport de force entre les grands cétacés et les chasseurs. Dès le XVIIème siècle, des pêcheurs basques ou nord-américains commencent à chasser sur les côtes chiliennes. Puis, l’ère industrielle au XIXème et surtout au XXème siècle a mené nombre d’espèces au bord de l’extinction.

Les espèces de baleines franches (*Eubalaena sp.*) ont d’abord subi l’assaut des grandes expéditions de chasse. Dès le XVIIème siècle, les pêcheurs basques réduisent drastiquement les populations de baleines franches nord atlantique (*Eubalaena glacialis*), rapidement suivis par d’autres pays (Handbook of the Mammals of the World, Wilson 2014 [155]). Les populations de l’est de l’océan Nord-Atlantique sont désormais éteintes, alors que le faible nombre d’individus de la côte ouest fait figurer cette espèce parmi les plus menacées d’entre les grands mammifères (de l’ordre de 400 individus recensés dans le rapport de la NOAA 2019 [42]). Les baleines franches du Pacifique et de l’océan Antarctique ont été à leur tour décimées. On estime à 115 000 le nombre de prises de baleines australes (*Eubalaena australis*) en deux cents ans de pêche intensive, et bien que cette espèce reste la moins menacée du genre, la population est actuellement estimée à moins de 12 000 individus, soit de l’ordre d’un individu sur 10 par rapport au nombre estimé au début du XXème siècle (Commission baleinière internationale, [58]).

L'autre grande famille de mysticètes, les rorquals (*Balaenopteridae*), plus rapides et difficiles à attraper, sont la cible des chasseurs dès que les stocks de baleines franches commencent à décliner. Le XXème siècle voit commencer l'exploitation industrielle des harpons explosifs, d'une efficacité redoutable lorsqu'ils sont associés à des navires-usines solides et rapides. Les effectifs du plus grand animal ayant jamais peuplé la terre, la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*) sont divisées par 100 en moins de 50 ans, l'ordre de grandeur de la durée de vie d'un individu (figure 1.3 tirée de l'étude de Branch et al. 2007 [13]).

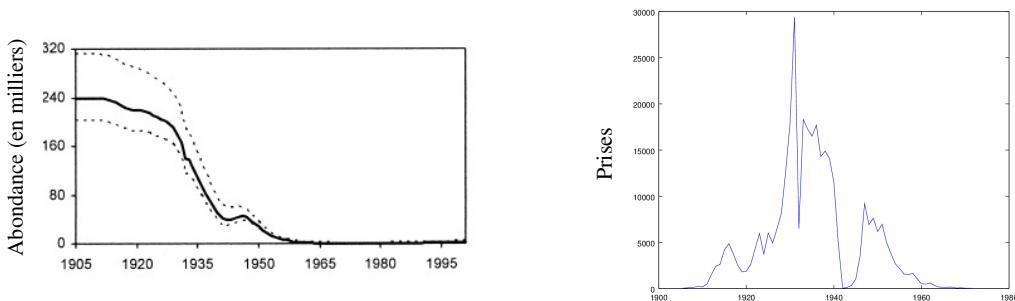


FIGURE 1.3 – Chiffres de la chasse à la baleine bleue antarctique, tirés de Branch et al. 2007 [13]. A gauche, le nombre de baleines estimées en fonction de la date. A droite, le nombre de prises recensées.

Ces chiffres sont alarmants non seulement pour les espèces concernées mais aussi pour toutes les autres espèces qui leur sont liées, que ce soit de leur vivant ou après leur mort. En effet, les carcasses de baleines jouent un rôle important dans les fragiles écosystèmes des abysses (voir notamment Smith et al. 2003 [129]). L'extraction de centaines de milliers d'individus durant le XXème siècle représente une perte de biomasse considérable pour les fonds abyssaux, que l'on commence tout juste à découvrir.

L'ambition de mieux connaître les grands cétacés, dans le but de les protéger et peut-être leur permettre de récupérer pleinement leur rôle dans l'écosystème marin est sans aucun doute le moteur du travail de la plupart des scientifiques qui ont la chance de travailler sur ce sujet. Parmi les outils pour mieux connaître les mammifères marins, la bioacoustique est très prometteuse, et c'est ce que nous allons présenter dans le paragraphe suivant.

1.3 Bioacoustique des mammifères marins

Comme son nom l'indique, la bioacoustique concerne l'étude du vivant (essentiellement du règne animal) via les sons. La discipline s'est notamment développée depuis que les sons peuvent être enregistrés, traités et analysés, au XXème siècle (voir une revue actuelle par Christine Erbe [38]). De très nombreuses espèces sont étudiées par la bioacoustique : des chauves souris aux oiseaux et aux batraciens (voir Narins et al. 2018 [92] pour une revue) pour les plus étudiés, ainsi que certains insectes et crustacés. Les apports de la bioacoustique concernent aussi bien les études de comportements que les recensements de populations ou les interactions (voir par exemple un des premiers index de biodiversités via l'acoustique proposé par Sueur et al. 2009 [137]).

Dans les milieux denses que représentent les océans et les rivières, la lumière pénètre peu (voir figure 1.4), alors que le son se propage efficacement (voir chapitre 2). Les ondes acoustiques sont donc un vecteur d'information majeur dans le monde aquatique. Beaucoup d'animaux marins

utilisent le son, que ce soit simplement pour la perception de leur environnement (réception) ou pour la communication (émission et réception). Les odontocètes (cétacés à dents), utilisent même un système de sonar (envoi et réception d'ondes acoustiques) pour sonder leur environnement.

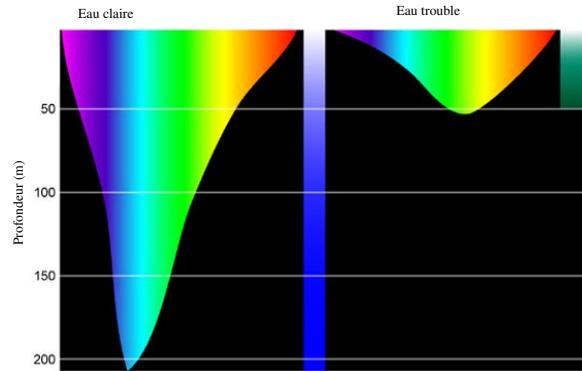


FIGURE 1.4 – Schéma représentant une profondeur typique de pénétration de la lumière dans l'océan selon la longueur d'onde, dans une eau claire (à gauche) ou une eau côtière plus trouble (à droite). D'après Kyle Carother, de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

La bioacoustique marine s'est développée depuis l'avènement d'appareils capables d'écouter dans l'eau (en général nommés hydrophones, variante du microphone adaptée à l'impédance acoustique de l'eau), ainsi que de systèmes de stockage et d'analyse de l'information (ordinateurs essentiellement de nos jours) - voir pour un exemple de suivi à long terme l'article de Sousa-Lima et al. 2018 [130]. La bioacoustique actuelle est multidisciplinaire, incluant des domaines tels que la biologie naturellement, la physique, l'informatique, le traitement du signal ... Ce champ dispose désormais d'ouvrages de références complets tels que celui de Au et Hastings "Principles of marine bioacoustics" [7] ou celui de Zimmer consacré au suivi des cétacés par la bioacoustique [157].

Le registre sonore des mammifères marins est extrêmement vaste et couvre pratiquement tout le spectre connu des ondes sonores.

En terme d'énergie, il comprend les sons les plus intenses d'origine animale jamais enregistrés, les chants de baleines bleues atteignant les 180 dB à 1 m (référence des décibels dans l'eau à $1\mu\text{Pa}$, voir chapitre 2). En terme de gamme de fréquence, les mammifères marins émettent des infrasons jusqu'aux ultra-sons, ainsi qu'on peut le voir sur la figure 1.5. Le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) par exemple émet des sons brefs entre 15 et 25 Hz (voir Watkins, 1981 [154]). De l'autre côté du spectre, les dauphins roses d'Amazonie (*Inia geoffrensis*) émettent des "clics" ou impulsions extrêmement courtes liées à leur biosonar dont la bande en fréquence va de 50 à plus de 250 kHz (Trone et al., 2015 [145]).

En Amérique Latine, l'étude des mammifères marins grâce à la bioacoustique est une science naissante, essentiellement représentée au Brésil.

Afin de renforcer les possibilités de développement de cette activité en Amérique latine, nous avons monté un groupe international des chercheurs en bioacoustique des mammifères aquatiques (LAMLA : Listening to Aquatic Mammals in Latin America). Ce groupement a déjà organisé trois rencontres régionales : en juin 2016 à Natal, au Brésil, en novembre 2016 à Valparaíso, au Chili et en novembre 2018 à Lima au Pérou. Cette activité, qui inclue la publication d'actes de conférence, ainsi que la maintenance d'un site internet [69] ont permis la diffusion d'information au sein d'une communauté en formation, et le développement de nombreuses collaborations à l'échelle régionale

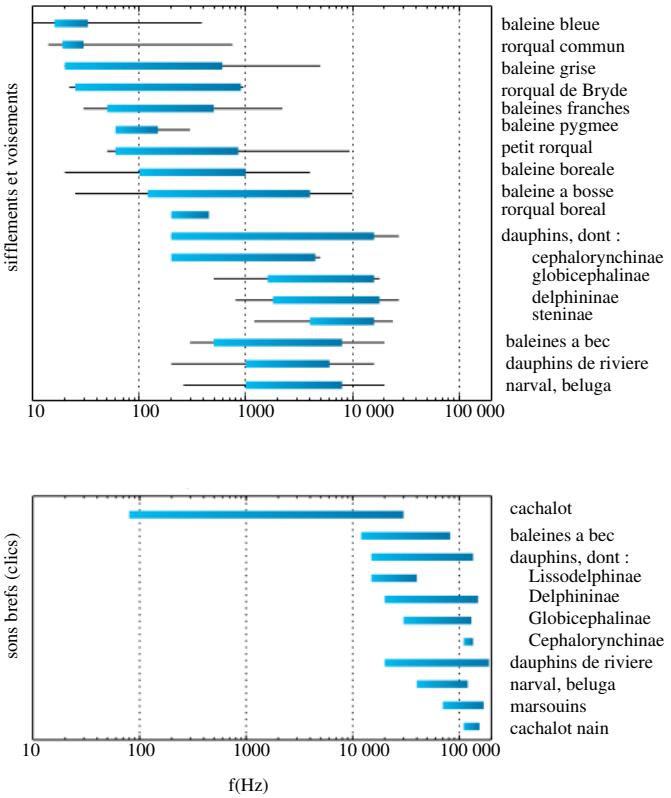


FIGURE 1.5 – Figure schématisant les fréquences couvertes par les émissions sonores de cétacés (tirée de Mellinger, 2007 [86]).

du sous continent. A notre échelle, cette collaboration continue et a conduit notamment à une publication en commun sur l’analyse des chants de baleine à bosse (un poster Patris et al. 2018 [107] et un article en cours de soumission à ‘Bioacoustics’).

Sur la figure 1.6 on peut notamment apprécier un des résultats des échanges entre les chercheurs sud-américains : une carte publique, régulièrement réactualisée, qui permet de voir quelles espèces sont étudiées et où.

Enfin, ce réseau de chercheurs du sous-continent a permis également d’organiser des formations de niveau international dans les zones où la communauté est naissante mais encore fragile, comme le stage organisé par Susannah Buchan à l’université de Concepción (sud du Chili).

1.4 Detection, Classification, Localisation et Estimation de Densité des mammifères marins

Le titre de cette partie fait référence à un groupe de travail international (DCLDE workshop, voir figure 1.8) qui est l’un des plus importants en bioacoustique des mammifères marins. Il a pour objet d’étude la question centrale de l’utilisation de l’acoustique comme outil d’aide à la gestion

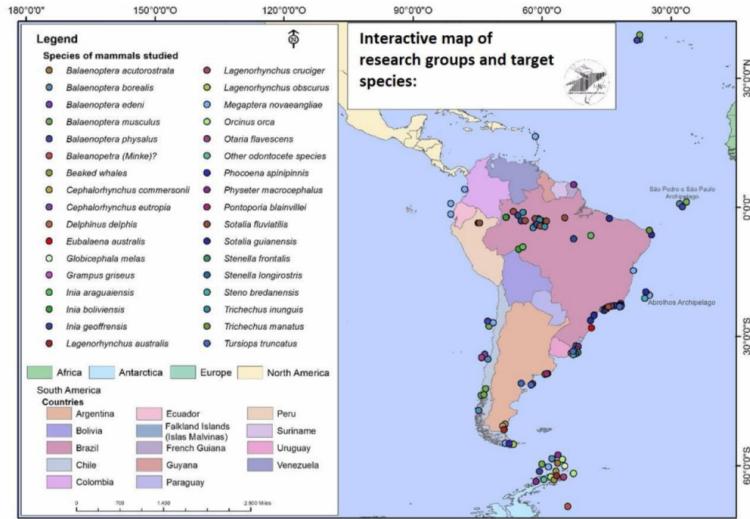


FIGURE 1.6 – Carte publiée sur le site du groupe LAMLA (Listening to Aquatic Mammals in Latin America [69]) représentant les espèces étudiées dans le sous-continent.

des populations, et s'intéresse à toutes les étapes entre la récolte des données et leur utilisation pour recenser des populations de mammifères marins.

1.4.1 La surveillance acoustique passive ou PAM (Passive Acoustic Monitoring)

La partie de la bioacoustique qui nous intéressera est ce qu'on appelle la surveillance acoustique passive. Cette technique consiste à écouter de façon relativement systématique sans injecter d'énergie dans l'environnement, contrairement aux techniques d'acoustique active qui concernent essentiellement les sonars utilisés pour mesurer bancs de poissons et planctons. La mise en œuvre de relevés acoustiques est en général relativement peu coûteuse en matériel et logistique, bien qu'il soit naturellement malaisé de comparer une petite expérience locale à l'échelle de quelques mois et un très grand projet de suivi d'un océan (l'antarctique par exemple) sur plusieurs années.

Il s'agit par ailleurs de techniques d'étude très peu invasives pour les animaux étudiés, ce qui est un aspect important lorsqu'on s'intéresse à des populations très réduites et très fragiles (un exemple extrême est la population de baleines franches du Chili/Pérou, estimée à quelques dizaines d'individus, voir les travaux d'Aguayo Lobo et al. en 2008 [76]). Ces surveillances acoustiques passives permettent de répondre aussi bien à des questions comportementales (étho-acoustique, voir le chapitre de référence de Peter Tyack en 2000 [147]) qu'à des études à plus large échelle sur les populations. Elles sont très efficaces pour la détection de présence d'animaux, ce qui permet de connaître des types de déplacements à différentes échelles de temps, tel un schéma de déplacement annuel (voir par exemple pour les grands rorquals Buchan et al. 2017 [14]), les liens entre déplacements et courants (voir Poupard et al. 2019 [114]) et éventuellement réduire les risques de collision.

Les relevés acoustiques peuvent être classés en deux catégories : les enregistrements de long terme à partir d'un ou plusieurs point(s) fixe(s) ou bien des enregistrements réalisés à partir d'un

bateau, soit avec un hydrophone laissé sous la surface de façon opportuniste, soit à l'aide d'un ou plusieurs hydrophones tractés (voir la revue d'Andriolo et al. 2018 [5] sur le sujet). Des techniques intermédiaires tel les engins autonomes (et notamment les planneurs sous-marins ou 'gliders', voir Baumgartner 2017 [10]) Dans tous les cas, il s'agit en général de bases de données importantes, et dont le volume augmente au fur et à mesure de l'amélioration des possibilités techniques des récepteurs.

Ces grandes bases de données très générales nécessitent, pour être utilisées, de plus en plus de compétences d'analyse, gestion et traitement de données, ainsi que du traitement du signal plus sophistiqué à différentes échelles. En effet, ces relevés sont très souvent 'aveugles' et comportent toujours un mélange de sources sonores très variées, réparties entre bruits anthropiques (bateaux, ...), bruits de mer (vagues, vent, côtes), et autres sources animales (plancton, crevettes, poissons, autres mammifères que la cible).

1.4.2 Détection et classification

La première étape dans l'analyse des données issues des relevés acoustique est la détection d'un signal cherché. En effet, le relevé acoustique représente en général des milliers d'heures d'écoute, parmi lesquelles figurent de nombreux sons, connus ou inconnus, plus ou moins intenses par rapport au bruit environnant. La détection du signal est un problème fondamental de traitement du signal et de très nombreuses réponses techniques peuvent être apportées selon les cas.

Beaucoup d'études utilisent le travail d'experts qui révisent manuellement les données, en général sous la forme de spectrogrammes, à la recherche de signaux identifiés ou nouveaux. C'est le cas des travaux pionniers en bioacoustique des mammifères marins (Cummings, 1971 [32]), mais aussi de certains travaux récents. En effet, lorsque la base de données est suffisamment petite pour pouvoir être parcourue par un expert, c'est une des seules méthodes pour découvrir des signaux encore non décrits, ou trop complexes et variables, pour lesquels un détecteur automatique peut difficilement être envisagé (voir les exemples de Nieuirkirk et al. 2016 [93] ou Stafford et al. 2018 [133]).

De nos jours cependant la majorité des études utilisent des détecteurs numériques pour identifier les signaux d'intérêt. Parmi les plus simples et les plus courants figurent les méthodes dites de 'matched filter' qui consistent à corrérer la base de données avec un exemple (réel ou artificiel) du signal recherché. Ces méthodes peuvent être améliorées pour augmenter leur résistance au bruit (Bouffaut et al. 2018 [12]). Les méthodes de réseaux de neurones, de plus en plus utilisées dans d'autres domaines comme la parole ou le traitement d'image requièrent de grandes bases de données annotées : pour cette raison elles ne sont pas encore très développées en bioacoustique des mammifères (contrairement à la bioacoustique des oiseaux, pour laquelle ces techniques sont désormais courantes). Cependant, ce sujet est en pleine évolution, et chaque année de nouvelles techniques mathématiques (souvent issus d'autres domaines) sont appliquées pour la détection de signaux liés à des mammifères marins (voir très récemment sur les baleines bleues chiliennes l'article de Buchan et al. 2019 [16]).

Pour certaines espèces, le problème de la détection est couplé avec celui de la classification. Pour de nombreux dauphins par exemple, des espèces ayant des manifestations sonores très voisines ont les mêmes habitats. Outre la détection d'un signal de dauphin, il est donc nécessaire de lui affecter un groupe qui correspond à son espèce ou sa sous-espèce. Ce problème est fondamental dans l'étude des delphinidés, et il se pose aussi parfois pour les mysticètes, en particuliers pour les rorquals : différentes espèces, caractérisées par des chants très différents, peuvent avoir d'autres types de vocalisation 'en commun'. Ainsi, l'étude de Ou et al. en 2015 [100] tente de séparer des vocalisations modulées en fréquence émises par trois espèces de rorquals (rorqual commun *Balaenoptera physalus*, baleine bleue *Balaenoptera musculus* et rorqual boréal *Balaenoptera borealis*).

Par ailleurs, les rorquals présentent un comportement vocal particulier, avec l'émission de

'chants', vocalisations dont on pense qu'elles sont spécifiques aux mâles, et qui présentent des caractéristiques spécifiques de stabilité et d'évolution. Ces caractéristiques sont présentées de façons générales dans l'introduction du chapitre 4 et nous détaillons dans ce même chapitre l'analyse du chant des baleines bleues présentes sur notre lieu d'expérience. En effet, la classification de ces chants permet la compréhension du comportement collectif de cette espèce, probablement constituée de 'clans' géographiques parfois considérés comme des sous-espèces distinctes, et notamment caractérisés par des chants propres (voir Mc Donald et al. 2006 [84]).

1.4.3 Estimation d'abondance

Les effectifs très fragiles mentionnés dans l'introduction font de l'estimation du nombre d'individus une question centrale à l'étude et la protection des mammifères marins. Malheureusement, ce sont des animaux en général très difficiles à recenser, malgré leur grande taille. En effet, les populations sont très mobiles, bien souvent à l'échelle d'un océan, et très peu denses. Les cétacés, bien qu'étant obligés de remonter à la surface pour respirer, n'y restent que très peu de temps en général et sont très difficiles à distinguer dès que l'état de la mer n'est pas idéal. Le comptage des populations, condition nécessaire pour déterminer l'efficacité des politiques de protection et anticiper le devenir des espèces, est donc un exercice très compliqué.

La bioacoustique présente un certain nombre d'atouts qui la rendent extrêmement séduisante comme outil d'estimation d'abondance. Elle permet une observation de nuit comme de jour, par tout temps. Selon les espèces et les sons émis, chaque récepteur peut avoir un rayon d'action considérable. Les enregistrements sonores ne sont pas très complexes à mettre en oeuvre, sont peu invasifs et ne nécessitent pas d'infrastructures énormes. Par ailleurs, des données utiles pour la bioacoustique peuvent être dérivées de façon opportuniste d'autres études : des réseaux de surveillances sismiques ou militaires, des récepteurs issus d'autres projets scientifiques (astrophysique), etc. Les données sont donc potentiellement très nombreuses.

Malgré ces atouts, la bioacoustique comme outil de recensement présente de sérieuses difficultés, qui font dire à Mellinger et al. dans un article général sur le sujet en 2007 : "De nombreux obstacles doivent encore être dépassés avant que les méthodes de bioacoustique puissent être utilisées de manière fiable pour une estimation d'abondance, qui est son ultime but à la fois pour les études d'écosystème et pour la gestion des effectifs" ("there are still numerous hurdles to be overcome before acoustics methods can be reliably used to estimate abundance, which is the ultimate goal for both ecosystem studies and management purposes", [86]).

Examinons les difficultés auxquelles fait allusion cet auteur. La bioacoustique conduit à la détection d'un son ou un ensemble de son attribué à une espèce donnée. On parlera donc d'un nombre de détections acoustiques par unité de temps. A partir de cette valeur, pour pouvoir extrapoler à un nombre d'individus par unité de temps et par unité de volume, un certain nombre d'informations complémentaires seront nécessaires :

- l'évaluation du nombre d'individus associés au son détecté. Pour certaines espèces très sociales (typiquement des dauphins), les émissions sonores sont mêlées et il est en général impossible de distinguer les émissions sonores par individu. Dans ce cas, les données acoustiques permettent de détecter un groupe d'animaux plutôt qu'un individu. Pour arriver à une estimation de la densité de population, d'autres données relatives à l'espèce concernant le nombre moyen d'animaux par groupe sera nécessaire ;
- le taux d'émission de son par animal ou "cue rate". En effet, la détection d'émissions sonores, même si chacune ne correspond qu'à un seul animal, ne permet d'accéder au nombre d'individus que si il est pondéré par le taux d'émission sonore des individus. Les réalités sont là aussi très différentes selon les espèces : certains espèces sont globalement peu vocales sauf à certaines époques (on pensera aux chants liés à la reproduction pour les mysticètes), certaines espèces font un usage presque continu de leur sonar (comme par exemple des dauphins).

- phins de rivières, continuellement soumis à des obstacles à évaluer). L'estimation du taux d'émission de son par individu est donc délicate, dépendant de l'espèce, de son contexte social et de la saison ;
- enfin, pour un modèle de densité et non de présence, il est nécessaire d'estimer le volume (ou la surface) sondé(e). Dans le cas de mammifère marins il s'agit en général d'une répartition en trois dimensions, contrairement aux recensements en milieu terrestre, sauf exception dans des zones très peu profondes, ou pour des animaux considérés comme confinés aux eaux de surface. Estimer le volume sondé implique en général de connaître la distance des sources au récepteur, sauf de rares cas où on peut considérer le volume comme efficacement délimité (bassin fermé acoustiquement par exemple).

Ces problématiques sont notamment examinées en détail dans l'article de référence de Marques et al. 2013 [80] "Estimating animal population density using passive acoustics".

On voit donc que les difficultés de l'utilisation de l'acoustique pour recenser des populations sont sérieuses et nécessitent un traitement au cas par cas selon le lieu, l'espèce concernée et le récepteur (voir également la figure 1.7, tirée de Marques et al. 2013 [80] et qui synthétise le parcours épineux à emprunter pour arriver au but). Elles ne sont cependant pas incontournables, comme le montre un certain nombre d'études ayant permis de réels résultats, concernant diverses espèces et lieux, dont voici un rapide aperçu :

- dès 1999, Mc Donald et al. [82] proposent une estimation de la densité de rorquals communs *Balaenoptera physalus* au nord de Hawaï ;
- malgré son pessimisme exprimé dans l'article précédemment cité [86], David Mellinger fait partie de l'équipe de Küsel et al. [67] qui en 2011 estime la densité des baleines à bec de Blainville (*Mesoplodon densirostris*), espèce surfaçant très peu et donc rarement aperçue, dans les Bahamas ;
- Khyn et al. en 2012 [66] obtiennent en mer Baltique des résultats concernant le marsouin commun, (*Phocoena phocoena*), lui aussi très difficile à observer et à recenser par des suivis visuels ;
- l'équipe de Ward et al. [152] obtiennent la même année des résultats sur un autre odontocète, le cachalot (*Physeter macrocephalus*) ;
- récemment, c'est un mysticète, le rorqual à museau pointu (*Balaenoptera acutorostrata*) qui est étudié par l'équipe de Norris et al. en 2017 [95].

Un atelier international qui se réunit tous les deux ans fait régulièrement le point sur les avancées dans ce domaine (DCLDE, Detection, Classification, Localisation and Density Estimation of marine mammals using passive acoustics, voir figure 1.8).

Dans ce cadre, on voit que pour utiliser les immenses potentialités de la bioacoustique dans le but d'aider à la sauvegarde des cétacés, il est nécessaire d'obtenir la localisation de l'animal ayant émis le son étudié, ce qui n'est pas toujours une tâche facile.

1.5 Localisation de la source sonore

Comment localiser une source sonore ? Les méthodes les plus fréquemment utilisées mettent en jeu plusieurs récepteurs, mais quelques études ont également permis de travailler sur une localisation grâce à une seule acquisition. Petit tour d'horizon.

1.5.1 Techniques à plusieurs récepteurs

Pour localiser une source, les techniques varient selon le milieu traversé et la nature du signal émis.

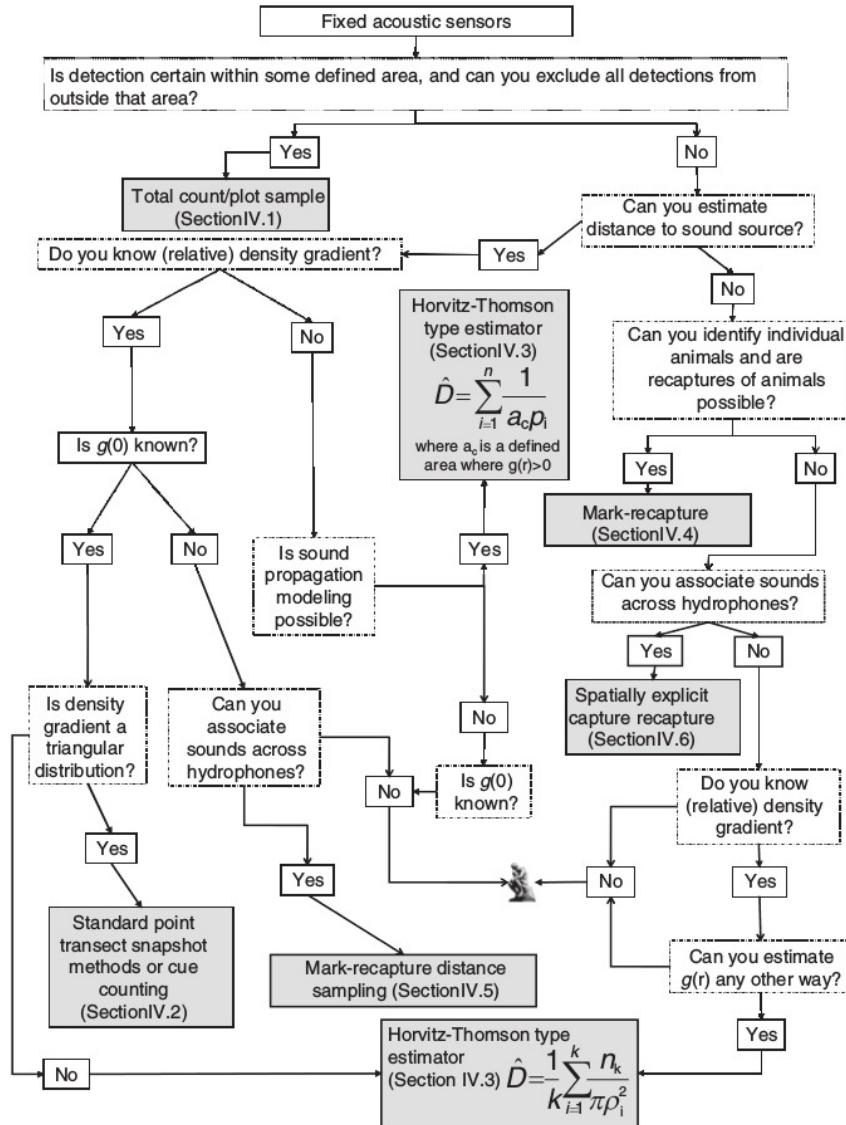


FIGURE 1.7 – Illustration tirée de l'article de référence Marques et al. 2013 [80] montrant le difficile chemin pour obtenir une densité de population à partir d'observations acoustiques. L'image du penseur de Rodin invite à de plus amples réflexions, aucune solution n'étant proposée dans les conditions qui y mènent.

1.5.1.1 Comparaison des délais à la réception ou méthode des TDoA

La technique la plus simple, qui s'applique particulièrement lorsque le signal est bref ou comporte une transition facilement décelable et lorsque le milieu traversé est peu complexe, est une mesure comparée des délais d'arrivée (ou TDoA, pour Time Delay of Arrival). Cette méthode correspond à une triangulation, elle est particulièrement utile dans des milieux transparents (l'air ..) et pour des signaux connus : elle est équivalente aux méthodes qui permettent de calculer la



FIGURE 1.8 – Annonce des huitièmes rencontres DCLDE (pour Detection, Classification, Localization and Density Estimation of marine mammals using passive acoustics) à Paris en 2018.

position d'un récepteur GPS grâce à la connaissance des positions des satellites émetteurs.

Son principe mathématique est simple : considérons une onde se propageant en ligne droite dans le milieu considéré. Un émetteur (prenons ici comme exemple un dauphin de l'Amazonie, *Inia Geoffrensis* voir figure 1.9), placé en un point D , produit à la date t_0 (inconnue) un signal bref dont on supposera qu'il se propage à vitesse constante dans toutes les directions (nous ne nous intéresserons pas ici aux variations éventuelles de ce signal selon la direction d'émission, mais on pourra creuser ce sujet par exemple en lisant l'article de Ladegaard et al. en 2015 [68]).

L'onde arrive sur les points H_1 , H_2 , H_3 et H_4 où sont placés quatre récepteurs, respectivement aux dates t_1 , t_2 , t_3 et t_4 (voir figure 1.9). On notera \mathbf{x}_D le vecteur des trois coordonnées du point D , et \mathbf{x}_i celui du point H_i ($i \in \{1 : 4\}$). Pour le trajet entre le point D et un point H_i , on peut noter que la date d'arrivée t_i dépend de la date d'émission t_0 , de la célérité de l'onde c et du trajet parcouru $DH_i = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_D\|$:

$$\forall i, \quad \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_D\| = c(t_i - t_0).$$

La date d'émission du son, t_0 est naturellement inconnue et ne présente aucun intérêt : on l'élimine donc en soustrayant l'équation du trajet j à celle du trajet i . On obtient alors un système de trois équations indépendantes, non-linéaire du type :

$$t_i - t_j = \frac{1}{c}(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_D\| - \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_D\|).$$

La résolution de ce système non linéaire, pour retrouver les coordonnées de D , s'effectue par ordinateur en minimisant une fonction à trois variables.

Une présentation relativement détaillée des calculs (avec recherche de cas où le calcul peut se faire de façon linéaire) est présentée par Au et Hastings dans leur ouvrage “Principles of Marine Bioacoustics”, chapitre 5.7 : Localisation with Hydrophones Arrays [7], nous appliquons également cette technique pour localiser un dauphin (calculs présentés dans l'annexe B).

Par sa simplicité, cette méthode est utile même en milieu marin, bien que la propagation y soit généralement plus complexe (voir par exemple Giraudet et al. 2008 [49] et Ferrari et al. 2019 [41]

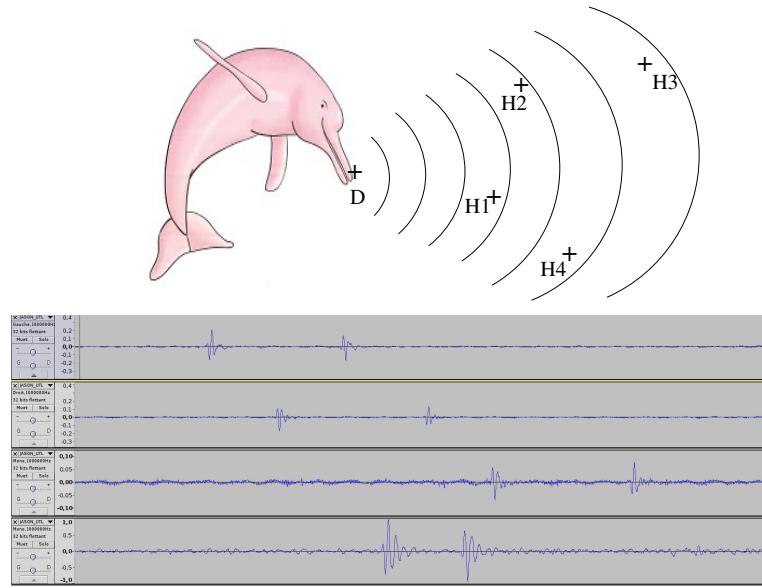


FIGURE 1.9 – La position du dauphin rose d'Amazonie déterminée par les temps d'arrivée d'un 'clic' sur quatre hydrophones. Données acquises par Hervé Glotin, Marie Trone, Franck Malige et Julie Patris en Août 2016. Voir notamment Trone et al. 2015 [145].

pour la reconstruction efficace de trajectoire de cachalots). On peut éventuellement y inclure des variations de la vitesse de propagation en fonction de la profondeur, technique utilisée par Caudal et Glotin, 2008 [23]. L'approche TDoA est valable aussi dans le cas à plusieurs sources suivant méthode "Whale Cocktail Party" (Glotin et al. 2008 [50]) où la position de la source permet de séparer les individus.

1.5.1.2 Champs d'onde adaptés ou “Matched field processing”

Dans le cas d'un milieu dense et complexe, typiquement l'océan côtier, la situation est à la fois plus difficile et plus riche. Plus difficile car la propagation dans ces milieux fait appel à des théories physiques délicates (voir partie 2) et met en jeu beaucoup de paramètres difficiles à évaluer en pratique. Plus riche car cette complexité apporte paradoxalement de l'information, et permet de briser des symétries dans un certain nombre de cas.

Les méthodes utilisées dans ce cas font appel à l'inversion d'un modèle physique de propagation du son dans l'eau. La figure 1.10 permet d'en comprendre le principe : on modélise les données acquises sur un ensemble de récepteurs selon la position de l'animal qui a émis le son. En comparant ces résultats modélisés aux données acquises, on peut trouver la position avec une certaine précision dépendant des données et du modèle utilisé (pour les différentes familles de modèles classiquement utilisées, voir la partie 2). Formalisées dans les années 70 (voir Bucker 1976 [101]), ces méthodes offrent l'avantage non-intuitif qu'un ensemble linéaire de récepteurs balayant toute la profondeur (antennes verticales) permet de reconstruire une position parfois en trois dimensions (selon la distribution des profondeurs de la zone, ou bathymétrie). L'antenne verticale est en effet une des plus faciles à poser en pratique, notamment car elle est symétrique par rotation et il suffit donc de poser des hydrophones régulièrement espacés le long d'une ligne lestée.

Ces méthodes ont été appliquées avec succès à la localisation de baleines. On peut citer no-

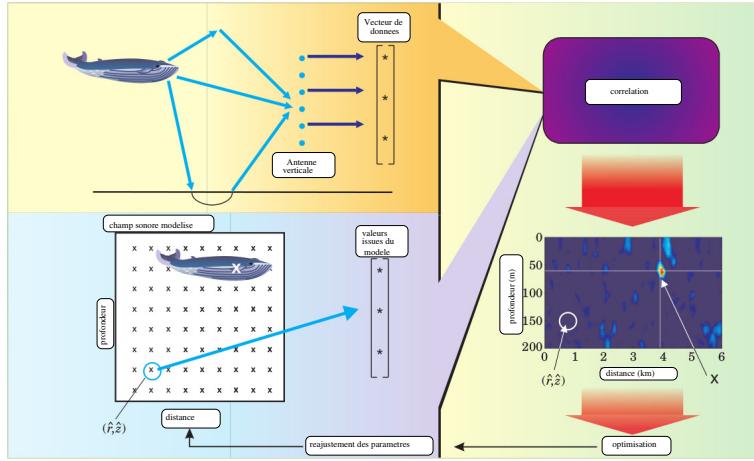


FIGURE 1.10 – Schéma tiré de 'Shallow water acoustics', Kuperman 2004 [65], représentant les méthodes d'inversion dites 'matched field processing' (MFP). Une antenne verticale composée de plusieurs hydrophones permet de constituer un vecteur de données. Celui-ci est comparé à un vecteur prédict dans le cas où l'émetteur est dans une certaine position. On maximise l'accord entre prédiction et données en faisant varier la position de l'émetteur dans le modèle (et, parfois, les paramètres physiques de celui-ci).

tamment les travaux très détaillés de Thode, 2000 [140] comme référence sur le sujet. L'analyse de données recueillies sur deux antennes (l'une horizontale et l'autre verticale) permet de trouver la trajectoire de baleines bleues à quelques kilomètres de distance. De même, le travail de Dunn et Hernandez en 2009 [36] permet de reconstruire la trajectoire de quatre baleines bleues pendant plus de 20h, grâce à l'utilisation couplée d'un réseau d'hydrophones fixés au sol et d'un récepteur sismique.

1.5.2 Localiser grâce à un seul capteur

1.5.2.1 Intérêt

Bien que les techniques d'inversion à l'aide d'antennes soient efficaces, elles présentent l'inconvénient d'être relativement chères. En effet il est nécessaire d'échantillonner correctement la colonne d'eau pour une bonne utilisation de la méthode, ce qui conduit à des réseaux comportant parfois des dizaines de récepteurs. La logistique d'installation de ces antennes est relativement complexe, la mise à l'eau et la récupération nécessitant en général des moyens importants. Ceci explique que l'utilisation de réseaux composés de plusieurs hydrophones ne soit pas si fréquente, et notamment pour des études en bioacoustiques, où les moyens sont généralement réduits par rapport à des domaines comme l'inversion géosismique.

De plus, de nombreuses expériences de bioacoustique sous-marine n'ont pas comme objectif a priori la localisation des sources. Bien souvent, il s'agit de connaître un paysage acoustique sous-marin local, de compter les espèces présentes, ou bien de mener des études de comportement. Dans ces cas, le protocole expérimental est souvent constitué d'un seul hydrophone fixe placé dans la colonne d'eau.

Pour ces deux raisons (le coût, et le fait que la localisation n'est pas le but principal), les données de bioacoustiques sont rarement acquises grâce à des antennes. L'enjeu de localiser la

source, au moins avec un certain degrés d'approximation, en n'ayant qu'un seul récepteur est donc particulièrement important dans ce domaine. Il est intéressant d'essayer de localiser la source a posteriori, à partir d'un signal recueilli en un point seulement. Cela permet de réutiliser des bases de données acoustiques historiques en ajoutant une information cruciale aux corpus. En particulier, pour la gestion des populations, il est important d'avoir un suivi historique de la densité d'individus. Les classifications de l'IUCN (Union internationale pour la conservation de la Nature [28]) se basent plus sur les variations temporelles du nombre d'individus que sur les données absolues de comptage.

1.5.2.2 Principe

La localisation mono-hydrophone peut être vue comme une méthode d'inversion de type Matched Field Processing (voir paragraphe 1.5.1.2) comportant un seul récepteur. L'objection a priori est que l'information acquise par un seul récepteur n'est pas assez riche pour discriminer entre différents points de l'espace. En particulier, le modèle le plus simple du champ acoustique émis par une source dans un demi-espace infini (qui correspond assez bien au cas d'une baleine émettant au large, par grands fonds, et écoutée à une distance significativement plus faible que la profondeur) présente une évidente symétrie cylindrique : le problème est invariant par rotation autour de l'axe vertical passant par l'émetteur. Dans ce cas, il n'est physiquement pas envisageable de retrouver la position d'un locuteur avec un seul capteur.

Cependant, le cas est différent lorsque l'on considère une source placée dans un environnement complexe, typique des zones côtières et des zones peu profondes. Dans ce cas, c'est la complexité de l'environnement qui brise la symétrie autour de l'émetteur. Le schéma de la figure 1.11 en montre le principe : le signal arrivant sur l'hydrophone est un mélange de signaux ayant suivis des chemins distincts dépendant de la position de l'émetteur par rapport aux fonds. Si celui-ci est suffisamment riche (zones côtières), on peut imaginer que l'information est suffisante, même avec un seul hydrophone, pour distinguer entre des signaux émis par des animaux se trouvant en deux endroits différents.

Ainsi, l'information de position est exclusivement portée par l'environnement et sa modification du champ acoustique. En effet, nous montrerons rapidement, au chapitre 2, que l'expression du champ acoustique en zone peu profonde est extrêmement complexe, ces zones constituant des guides d'onde à géométrie non triviale dont la résolution relève de méthodes fines de modélisation physique du phénomène.

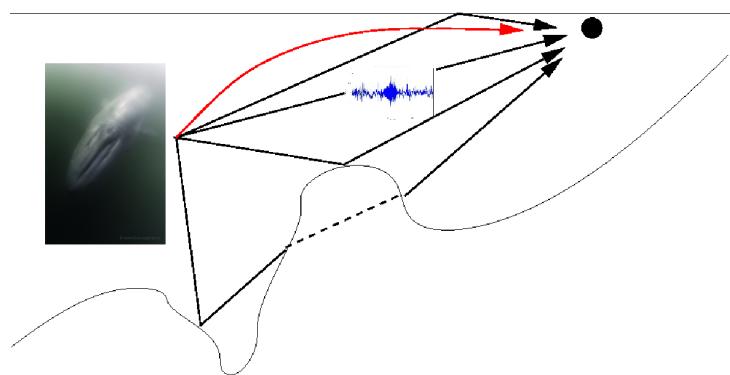


FIGURE 1.11 – Schéma de principe de fonctionnement d'une localisation à un seul hydrophone : le peu d'information dû à l'utilisation d'un seul capteur est partiellement compensé par la richesse de la modification du signal par l'environnement.

Chapitre 2

Acoustique sous-marine

Dans ce chapitre nous allons présenter succinctement les bases physiques nécessaires à notre méthode. Le texte est inspiré des ateliers réalisés dans différents cadres au Chili : séances du ‘café bioacoustique’ organisé entre collègues à Santiago, formation “Training Workshop in Signal Processing and Bioacoustic Analysis”, University of Concepcion, COPAS Sur-Austral Center, Chile, 22-24 August 2018 dans laquelle nous assurons la partie physique et propagation. Les parties plus spécialisées sont largement tirées du livre “Computational Ocean Acoustics” Jensen 2011 [59], référence sur le sujet des modèles numériques de propagation dans l’océan. Enfin, nous avons également en partie repris un travail réalisé en Novembre 2018 pour le ministère de l’environnement Chilien [17]. Ce rapport, écrit en collaboration avec Susannah Buchan et Ivan Hinojosa, présente un panorama des risques sous-marins liés au bruit anthropique. Nous y avons rédigé la partie caractérisation du bruit et propagation.

2.1 Un aperçu de la physique du son

Ce chapitre n’a pas pour prétention de remplacer un manuel d’acoustique physique. Le lecteur intéressé pourra trouver un descriptif détaillé adapté à des non-experts dans l’ouvrage “Principles of marine bioacoustics” de Au et Hastings [7].

2.1.1 Equation de d’Alembert

Le son est une onde mécanique se propageant (pour ce qui nous intéresse) dans un fluide, c’est-à-dire un milieu non rigide. Bien que certains aspects de la propagation des ondes sonores (ou de vibration) dans les solides soit abordés dans la suite du manuscrit, considérons d’abord le cas plus simple de l’onde acoustique classique, propagée dans un fluide. Cet onde peut être comprise comme la propagation d’une compression des particules de fluide, sous l’effet d’une modification locale de leur densité. En raison des interactions entre les particules, cette modification locale perturbe son environnement, et, de proche en proche, on a donc naissance d’une onde de propagation (voir figure 2.1). L’onde est ici définie comme une fonction de l’espace et du temps, caractérisée par un transport d’information et d’énergie sans transport de matière (les particules de fluide transmettent un état de perturbation à leurs voisines mais ne se transportent pas globalement d’un point à un autre). On voit donc que *microscopiquement*, le son est un déplacement d’ensemble des particules, mais *macroscopiquement*, il s’effectue sans transport de matière : cette remarque se traduit pour les variables de description de l’état du fluide par le fait que le son concerne des “petites variations” des grandeurs, autour d’une valeur moyenne inchangée.

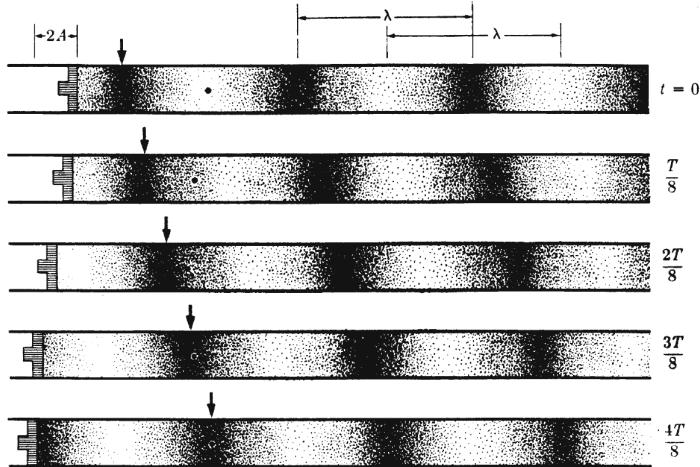


FIGURE 2.1 – Schéma de la propagation d'une onde sonore dans un tube à différents instants. Un piston effectue un déplacement d'amplitude $2A$ et de période T , poussant les particules du fluide. Celles-ci présentent alors des zones de sur-densité (compression) et des zones de déplétion (dépression) avec une longueur d'onde λ . Tiré de Rossing, 1990 [119].

Pour comprendre les lois qui régissent cette propagation, plusieurs variables peuvent être utilisées. On a vu que la densité ρ en est une, ainsi que le déplacement \vec{U} particulaire, ou la vitesse \vec{V} des particules. On peut également introduire la pression, P , scalaire qui permet de voir l'effet de l'onde de compression sur une membrane réceptrice, et qui est donc fondamentale en biologie puisque les mammifères utilisent cette technique pour capter les ondes sonores. Comme il a été vu plus haut, c'est la variation des variables qui porte l'information de l'onde, on notera donc les valeurs moyennes indiquées d'un zéro, et les petites variations (faibles par rapport aux valeurs moyennes) en lettres minuscules :

- $\vec{V}(t) = \vec{V}_0 + \vec{v}(t)$,
- $\vec{U}(t) = \vec{U}_0 + \vec{u}(t)$,
- $P(t) = P_0 + p(t)$,
- $\rho(t) = \rho_0 + \mu(t)$.

A priori, les variables décrites dépendent du lieu. Cependant, on supposera ici que l'on travaille dans un fluide au repos ($\vec{V}_0 = 0$) homogène (ρ_0 indépendant du lieu) à pression atmosphérique ($P_0 = P_{\text{atm}}$). En conséquence, seules les variations dépendront de la position et du temps, les valeurs moyennes étant constantes dans le temps et homogènes dans l'espace.

Pour montrer l'apparition d'une onde dans un milieu fluide, on utilise trois lois physiques fondamentales. La première est issue de la conservation de la masse. Appliquée aux variations de masse volumique μ , elle conduit à l'équation suivante :

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \rho_0 \text{div}(\vec{v}) = 0, \quad (2.1)$$

où l'opérateur divergence exprime une dérivée spatiale : dans les coordonnées cartésiennes, la divergence d'un vecteur \vec{A} de coordonnées A_x, A_y, A_z est $\text{div}(\vec{A}) = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$.

La deuxième loi nécessaire à notre étude est la conservation de l'impulsion, ou seconde loi de Newton. Appliquée à un fluide immobile soumis au champ de pesanteur terrestre, cette équation

(équation d'Euler) peut s'approcher au premier ordre par :

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{\text{grad}}(p). \quad (2.2)$$

L'opérateur vectoriel $\vec{\text{grad}}$ est le gradient d'un champ scalaire. Dans un espace cartésien représenté par les vecteurs orthonormés $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$, il s'exprime par $\vec{\text{grad}}(A) = \frac{\partial A}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial A}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial A}{\partial z} \vec{e}_z$.

Enfin, la troisième loi qui régit la propagation d'une perturbation mécanique dans un fluide est l'équation d'état de ce fluide : c'est là que se manifestent les propriétés spécifiques du fluide (l'air et l'eau ne transmettront pas le son de la même manière par exemple ...). Cette équation d'état peut s'écrire en faisant intervenir une constante caractéristique du fluide nommée χ_s , compressibilité isentropique du fluide, dont la définition est :

$$\chi_s = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_S. \quad (2.3)$$

Attention, dans la littérature spécialisée en anglais ainsi qu'en mécanique du solide, on utilise plus souvent le module l'élasticité isostatique K (bulk modulus) qui est l'inverse de la compressibilité isentropique : $K = \frac{1}{\chi_s}$.

Quelques manipulations mathématiques simples permettent de résoudre ce système de trois équations à trois inconnues (variation de pression, variation de densité et variation de vitesse particulière). De l'équation d'état on déduit, au premier ordre, une relation linéaire entre variation de densité et variation de pression : $\mu = \rho_0 \chi_s p$, ce qui permet d'éliminer μ des équations. En prenant la divergence de l'équation d'Euler, puis en remplaçant $\text{div} \vec{v}$ grâce à son expression dans l'équation de conservation de la masse, on obtient finalement l'équation d'onde vérifiée par les variations de pression (hors des sources de perturbation, qui n'ont pas été incluses dans l'analyse) :

$$\Delta p - \rho_0 \chi_s \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (2.4)$$

où Δ est l'opérateur Laplacien, opérateur de dérivée spatiale seconde d'un scalaire, tel qu'en coordonnées cartésiennes

$$\Delta A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2}.$$

Cette équation est une équation de d'Alembert ou équation d'onde. On peut montrer qu'elle est vérifiée également par la variation de densité ou (sous sa forme vectorielle) par la vitesse et le déplacement particulière. C'est l'équation qui régit tous les phénomènes de propagation ondulatoire, qu'ils soient électromagnétiques (lumière, radio, ...) mécaniques (son, vagues, vibrations) ou plus exotiques (ondes gravitationnelles ...).

Pour un problème à une dimension d'espace, cette équation se résout simplement et on peut montrer que la famille de solution sont les fonctions de type $g(x, t) = \pm g(x - ct)$, avec $c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 \chi_s}}$, qui est une onde se déplaçant à la vitesse c le long de l'axe des x . La fonction f peut-être quelconque, selon la nature de la perturbation initiale et l'environnement dans lequel est le fluide (voir plus bas). Un cas particulier utile est celui des fonctions trigonométriques de type :

$$g(x, t) = p_{max} \sin(k(x - ct) + \varphi),$$

où k est le nombre d'onde (homogène à l'inverse d'une longueur). On peut reformuler cette fonction en faisant apparaître ses périodicités en temps (période T) et en longueur (longueur d'onde λ) :

$$g(x, t) = p_{max} \sin(kx - kc t + \varphi) = p_{max} \sin(kx - \omega t + \varphi) = p_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t + \varphi\right).$$

Dans cette expression, ω est la pulsation du signal, telle que $\omega = 2\pi f$ ou f est la fréquence de l'onde. On voit donc les relations entre nombre d'onde et périodes : $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$. On rappelle également qu'il vient $\lambda = cT = \frac{c}{f}$. Cette fonction trigonométrique peut également être décrite par l'expression correspondante en nombres complexes ($i^2 = -1$) :

$$g(x, t) = p_{max} e^{i(kx - \omega t + \varphi)}.$$

Pour un problème à trois dimensions, plongé dans un milieu infini et homogène, constitué d'une source ponctuelle, on peut montrer que la fonction de Green ci-dessous est une solution de l'équation 2.4 correspondant à la solution trigonométrique mentionnée pour le problème mono-dimensionnel. On note \vec{k} le vecteur d'onde, dont la norme est le nombre d'onde k et la direction celle de propagation de l'onde, et \vec{r} le vecteur position du point considéré dans un repère sphérique (r_0 est une distance de référence en général prise à un mètre).

$$g(\vec{r}) = g_0 \cdot r_0 \frac{e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi)}}{4\pi \|\vec{r}\|}. \quad (2.5)$$

Si on peut reconnaître dans l'exponentielle complexe l'oscillation exprimée par la sinusoïde dans le cas précédent, on constate une différence fondamentale avec le facteur $\frac{1}{r}$ dit de divergence sphérique qui exprime la conservation de l'énergie sur une surface fermée autour de la source.

2.1.2 Passage en fréquentiel : équation de Helmholtz

L'analyse de Fourier est très adaptée à l'étude et la compréhension des ondes. Elle permet de reformuler un problème *temporel* en un problème *fréquentiel*, c'est-à-dire de passer d'une fonction du temps $g(t)$ à une fonction de la fréquence $G(f)$ ou de la pulsation $G(\omega)$ (définie comme $\omega = 2\pi f$). Cette variable fréquence (ou fréquence instantanée) peut être assimilée, dans le cas d'une fonction trigonométrique simple (sinus ou cosinus), à l'inverse de la période, qui est la notion intuitive de la fréquence.

La transformée de Fourier d'une fonction $g(t)$ s'exprime par :

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{2i\pi ft} dt.$$

Il s'agit d'une fonction complexe, décrite par exemple par sa phase et son module.

La fonction initiale peut être reconstruite par la transformée de Fourier inverse :

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) e^{-2i\pi ft} df.$$

Si l'on prend la transformée de Fourier de l'équation de d'Alembert 2.4, on obtient son équivalent dans le domaine fréquentiel, appelée équation de Helmholtz (hors des sources) :

$$\Delta p - k^2 p = 0. \quad (2.6)$$

2.1.3 Représentation d'une onde

On a donc vu que le son est une onde de pression se propageant à une vitesse c caractéristique du milieu considéré. Pour représenter la propagation d'une onde dans l'espace (ou le plan ..), on utilise en général deux indicateurs :

- les fronts d'onde, qui sont des surfaces (ou des courbes, en deux dimensions) isophases,

- les rayons, ou lignes d'onde, qui sont des lignes continues normales en tout point au front d'onde.

La représentation en front d'onde permet de visualiser l'onde en un temps donné (“photo” instantanée) alors que la représentation en rayon, qui se rapproche de l'optique géométrique pour le traitement de l'onde lumineuse, permet de visualiser la “trajectoire” de l'onde. Ces deux représentations sont illustrées sur la figure 2.2 pour deux types simples d'onde dans le plan : ondes planes (propagation selon une seule direction) et ondes circulaires (propagation à partir d'un point source).

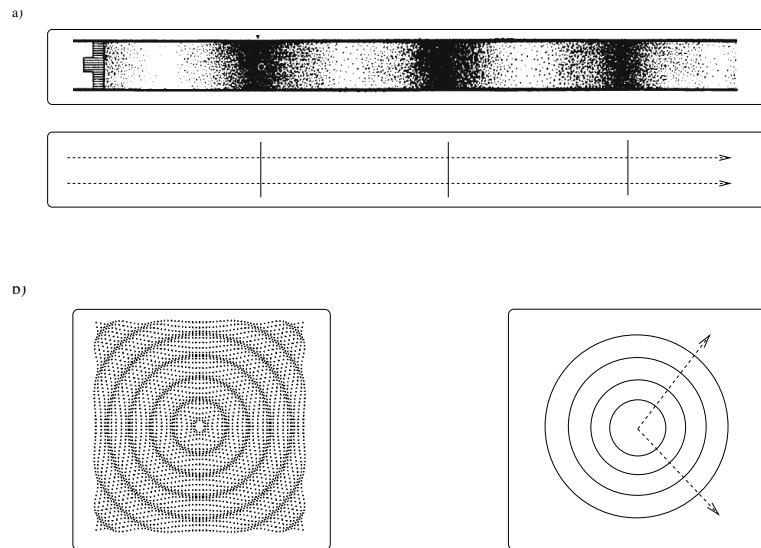


FIGURE 2.2 – Représentation de deux ondes contenues dans le plan : une onde plane (a) et une onde circulaire (b). Sont schématisées la répartition particulière à un instant donné, et les représentations classiques associées : les fronts d'ondes (traits pleins) et les rayons (traits pointillés). Dessins adaptés de Rossing, 1990 [119] et du site d'animation de Russell à l'université de Pennsylvania [120].

2.1.4 Caractérisation du son

2.1.4.1 Etude énergétique

La propagation de l'onde s'accompagne d'une transmission d'énergie, sous forme d'énergie cinétique puisqu'il y a déplacement, ou de travail des forces de pression. Puisque l'énergie dépend de la surface considérée, on s'intéressera plus volontiers à l'intensité du son, la définition de l'intensité étant ici le flux de puissance par unité de surface. On peut montrer dans le cas d'ondes planes que l'intensité s'exprime par

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} . \quad (2.7)$$

L'intensité est donc une puissance par unité de surface et s'exprime en W/m^2 . Définie ainsi, l'intensité dépend du lieu et du temps : on définira souvent une intensité indépendante du temps en prenant une valeur significative, sur un intervalle de temps donné, de la pression. Cette valeur ne peut en général pas être la moyenne, car celle-ci est a priori nulle puisque p désigne une variation autour de la valeur moyenne dans le temps. Les grandeurs les plus souvent utilisées sont la valeur

maximale de la pression prise sur une durée donnée, ou bien sa valeur efficace. Dans le cas d'une onde sinusoïdale, ces deux grandeurs sont proportionnelles et sont naturellement définies sur une période (on a $p_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$).

Cependant, les grandes variations de l'ordre de grandeur de la variation de pression due à un son selon que celui-ci ait une "grande" ou une "faible" intensité font qu'il est plus pratique de l'exprimer en échelle logarithmique. On définit donc l'unité la plus employée dans la mesure de l'intensité du son, qui est le décibel, par la formule suivante :

$$I(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right). \quad (2.8)$$

Dans cette formule, le logarithme est à base 10 et I_0 représente une intensité de référence. Lorsque l'on considère la formule 2.7, on voit que l'on peut mettre cette définition du décibel sous la forme équivalente :

$$I(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right). \quad (2.9)$$

On trouvera fréquemment le nom de "Sound Pressure Level" ou SPL pour l'intensité sonore exprimée en décibel. Dans la définition 2.9, universellement utilisée, figurent plusieurs ambiguïtés.

- La définition de la pression. Comme on l'a vu, il est en général souhaitable d'avoir une mesure qui ne dépend pas du temps, en tout cas pas à l'échelle des fluctuations de pression (fréquence du son). Dans la définition 2.9, la pression fait parfois référence à une pression maximale, parfois à une pression efficace. Dans les deux cas, il convient de préciser la durée sur laquelle est calculée la valeur. Pour une onde sinusoïdale, les deux grandeurs aboutissent à la même valeur en décibel, cependant, le cas est plus complexe pour des perturbations impulsionales (brèves). Dans ce cas, on utilise parfois un autre indicateur d'énergie, appelé le "Sound Exposure Level" ou SEL, et défini par :

$$\text{SEL}(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2 dt}{p_0^2 \cdot T_{\text{ref}}} \right).$$

La référence de temps est normalement prise à $T_{\text{ref}} = 1 \text{ s}$.

- La pression de référence p_0 . Elle est choisie une fois pour toute, mais il existe deux références normalement utilisées en acoustique, l'une pour l'air : $p_0^{\text{air}} = 20 \mu\text{Pa}$ et l'autre pour l'eau : $p_0^{\text{eau}} = 1 \mu\text{Pa}$.

Les mesures des niveaux d'intensité sonore dans l'eau les plus utilisées font en général mention dans leur unité de la pression de référence. En revanche, il n'est pas souvent mentionné quelle 'moyenne' est utilisée pour la mesure de la pression, ni sur quelle durée. En résumé, les grandeurs que l'on trouvera dans la littérature spécialisée sont en général les suivantes, avec une pression normalement mesurée en pression efficace sur une durée égale à la période du signal :

- l'intensité en dB, notée SPL, exprimée en dB ref $1\mu\text{Pa}$,
- plus rarement, pour des sons brefs, le niveau d'exposition sonore, SEL, exprimé en dB ref $1\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$

Pour étudier les niveaux sonores acceptables pour les cétacés dans le cadre de réduction des nuisances dues aux bruits, comme pour étudier leur communication à longue échelle, il est utile de distinguer la production sonore "à la source" et le niveau sur le récepteur considéré. Il est difficile de caractériser géométriquement une source : on considère donc souvent comme niveau sonore à la source le niveau qui serait mesuré à un mètre de celle-ci, ce qui constitue une référence internationale (SL pour Source Level, en dB ref $1\mu\text{Pa} @ 1 \text{ m}$). Entre la source et le récepteur, la propagation est caractérisée par des pertes qui peuvent aussi être exprimées en échelle logarithmique. On les note souvent les "pertes de propagation" ou TL (Transmission Loss) et on les exprime en dB. Il vient

alors l'équation simple dite équation du SONAR passif :

$$SPL = SL - TL. \quad (2.10)$$

Cette équation permet de différencier les propriétés de la source, qui peuvent être mesurées indépendamment, et celles de la propagation, qui sont considérées comme étant indépendantes de la source.

2.1.4.2 Ordres de grandeur

Il peut être utile d'avoir en tête quelques ordres de grandeur concernant les volumes sonores. Les volumes mesurés sont normalement positifs, ce qui signifie que la référence ($1 \mu\text{Pa}$) correspond à une variation de pression très faible. Les chants des baleines bleues sont considérés comme étant parmi les sons biologiques les plus intenses dans l'océan, leur valeur maximale atteint 190 dB ref $1\mu\text{Pa}$ à un mètre de distance (voir par exemple Cummings, 1971 [32]). Notons que même pour ces sons considérés comme très forts, l'intensité correspond à une variation de pression efficace de $p_{\text{eff}} \simeq 3 \text{ kPa}$ et reste près de trente fois inférieure à la pression atmosphérique : $p_{\text{eff}} \simeq \frac{p_{\text{atm}}}{30}$ ce qui justifie l'approximation des petites variations et la linéarisation de l'équation d'onde au premier ordre.

2.1.5 Interfaces

On a vu que l'équation de propagation du son dans un fluide est relativement facile à résoudre dans un milieu homogène infini. Naturellement, ce modèle est peu satisfaisant pour l'étude de cas réels et il est donc important de comprendre les phénomènes qui interviennent en présence de discontinuité, ce qu'on appelle en général l'étude des interfaces entre plusieurs milieux.

Par analogie avec les lois de l'électricité, on définit l'impédance acoustique d'un milieu. Cette impédance acoustique représente le ratio pression sur norme de la vitesse particulaire en un point donné. C'est a priori un nombre complexe dont l'argument permet d'apprécier le déphasage entre l'onde de pression et l'onde de vitesse particulaire. On peut montrer (voir par exemple Zimmer 2011 [157] pour une démonstration simple) que pour des ondes planes, l'impédance acoustique est réelle et vaut $Z = \rho_0 c$, avec ρ_0 la densité moyenne du milieu et c la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu. L'interface entre deux milieux se traduit par un changement brutal d'impédance acoustique qui aura deux conséquences : un changement dans la direction de propagation de l'onde (modification de la trajectoire de l'onde) et dans son intensité. Considérons une onde plane se propageant à l'interface entre deux milieux notés 1 et 2 (figure 2.3). Les problèmes aux interfaces sont équivalents à ceux étudiés en optique géométrique et les mêmes lois s'y appliquent :

- la loi de Snell-Descartes sur la direction de réflexion et de réfraction de l'onde : on a donc, pour une onde incidente faisant un angle θ_i avec la normale à l'interface, une onde réfléchie faisant un angle $\theta_r = -\theta_i$ et une onde transmise faisant avec la normale un angle θ_t tel que $c_2 \sin \theta_i = c_1 \sin \theta_t$ (voir figure 2.3).
- les lois de calcul des coefficients de réflexion et de transmission permettant de savoir quelle énergie est transmise ou réfléchie. On donnera ici le résultat de leur calcul sans leur démonstration, qui peut être trouvée dans les divers ouvrages cités en début de chapitre [157], [59] :

$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_r}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_r}$$

$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2\rho_2 c_2 \cos \theta_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_r}.$$

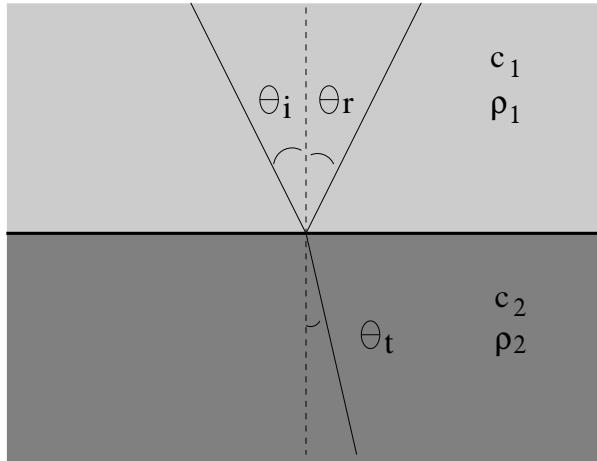


FIGURE 2.3 – Schéma du rayon représentant une onde plane acoustique à l’interface entre deux milieux d’impédance acoustique différente. Ici, on a $c_2 < c_1$.

Ces changements de direction et d’intensité ont des répercussions importantes pour la transmission des ondes acoustiques entre deux milieux. En particulier, lorsque la vitesse varie continûment le rayon acoustique est courbé par les gradients de vitesse (la courbure se trouvant vers les vitesses lentes). Il arrive donc dans ce cas que le rayon soit ‘piégé’ dans un guide d’onde - phénomène à l’origine des techniques de transmission par fibres optiques par exemple.

2.1.6 Le son dans l’océan

Dans l’océan, les changements de vitesse du son sont relativement importants. Une formule empirique proposée par Medwin en 1975 [85] exprime la vitesse du son en fonction de la température T en degré Celsius, la salinité S en parts pour mille et la profondeur z en mètres :

$$c = 1449,2 + 4,6 T - 0,055 T^2 + 0,00029 T^3 + (1,34 - 0,01 T)(S - 35) + 0,016 z. \quad (2.11)$$

Les influences contraires de la température et de la profondeur créent des profils très différents pour chaque lieu et chaque saison, surtout à faible profondeur. Dans les abysses, la température varie peu (la grande majorité du volume océanique se trouve à une température comprise entre 3 et 5 °C) et c’est en général la profondeur qui domine : la vitesse est donc croissante lorsqu’on augmente la profondeur. A faible profondeur en revanche, la température a une influence dominante et complexe, qui crée des effets variant beaucoup avec les saisons. La thermocline, interface entre la zone de surface, pour laquelle la température est élevée à cause de l’ensoleillement, et la zone fraîche plus en profondeur, peut varier de position ou quasiment disparaître en quelques heures. La salinité joue aussi beaucoup en surface, notamment près des embouchures de fleuve, sous la glace et le long des courants sous-marins. A titre d’exemple, on pourra comparer sur la figure 2.4 les profils de vitesse mesurés pour notre étude sur la zone du golfe de Corcovado (voir chapitre 6) et la zone de Chañaral, respectivement au sud et au nord du Chili. On note aussi sur ces données les variations saisonnières pour la zone de Chañaral, où l’étude a été menée sur les deux saisons.

Etant données les variations importantes dans le profil de vitesse, les océans constituent bien souvent de véritables guides d’onde. A différentes échelles, les études de propagation montrent

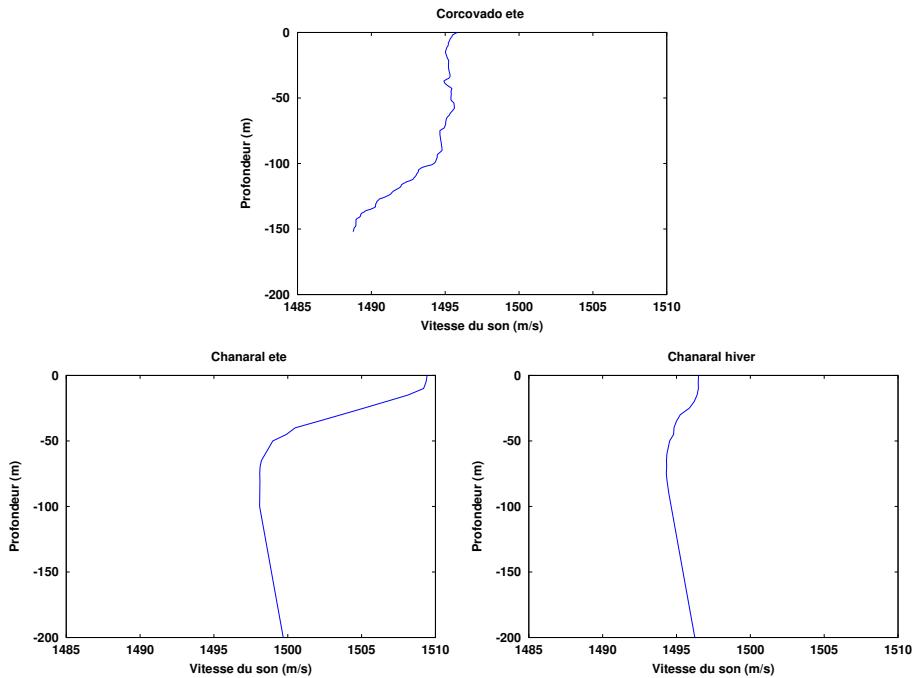


FIGURE 2.4 – Représentation des profils de vitesse dans la colonne d'eau sur les deux terrains étudiés : Corcovado (données mesurées par Renato A. Quiñones et Susannah Buchan [18]) et Chañaral (données mesurées par nos soins, ainsi que relevées de divers rapports, voir par exemple [48]). On remarque les variations importantes non seulement d'un site à l'autre mais aussi selon la saison. Corcovado est situé dans une zone très irriguée par les fleuves de Patagonie à une latitude de 43° sud alors que Chañaral est en bordure de désert vers 29° sud.

des phénomènes de concentration, des zones d'ombre, qui font de l'océan un milieu acoustique extrêmement complexe. Un guide d'onde caractéristique de l'océan profond, nommé le SOFAR, est utilisé pour la communication acoustique : la courbure du profil de vitesse constitue un piège acoustique à une profondeur variant de 1000 m à 3000 m selon les conditions locales. Dans les zones côtières, le problème se complexifie remarquablement : aux interactions de type réflexion ou transmission avec les différentes couches du fond s'ajoutent les effets du profil de vitesse très dépendants de la saison et des apports d'eau douce.

Ces propriétés sont illustrées sur la figure 2.5 (représentations tirées du livre de Jensen et al. [59]).

Enfin, plusieurs phénomènes chimiques (selon la fréquence) conduisent à l'absorption des ondes acoustiques. Les processus en jeu sont complexes, et souvent résumés dans un graphique présentant l'absorption α en fonction de la fréquence, ou bien une formule expérimentale dépendant de la fréquence du son. Le coefficient d'absorption α est en général défini comme la perte énergétique relative par longueur d'onde : $\alpha = \frac{E(x+\lambda)-E(x)}{E_0} \cdot \frac{1}{\lambda}$. Un coefficient d'absorption constant correspond à un modèle classique de pertes exponentielles : $E(x) = E_0 e^{-\alpha x}$. On utilise en général une échelle en décibel, pour obtenir un coefficient d'absorption en dB par longueur d'onde. L'absorption en dB par km, qui n'est pas référencée par rapport à la longueur d'onde, est aussi utilisée (voir figure 2.6). On notera sur cette figure que l'absorption dans l'océan est surtout importante dans les

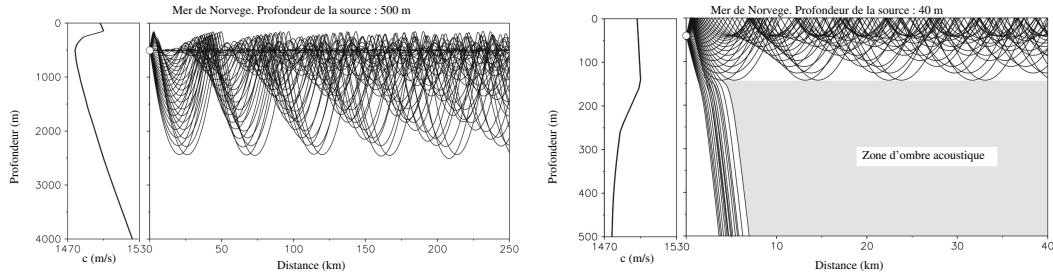


FIGURE 2.5 – Illustrations tirées de Computational Ocean Acoustics (Jensen et al. 2011 [59]). A gauche, un effet de canal à grande profondeur de type SOFAR. A droite, un profil particulier dû aux eaux froides et douces de surface créant un canal peu profond, ainsi que des zones d'ombre acoustique où la propagation est pratiquement nulle. Simulation pour une source émettant à des fréquences de l'ordre du kilohertz.

hautes fréquences, elle est faible et assez mal connue en basse fréquence. Ce phénomène explique que les ondes à basse fréquence se propagent efficacement sur de longues distances, contrairement aux hautes fréquences qui sont en général rapidement atténuerées. L'absorption est aussi importante lorsque l'on étudie la propagation de l'onde dans les fonds (voir chapitre 6).

2.2 Modèles de propagation utilisés en bioacoustique

Etudier la propagation du son dans l'océan revient donc à résoudre une équation différentielle à coefficients non constants ($c = c(z)$) avec des conditions aux bords complexes. Quelques cas simples peuvent être résolus analytiquement, et ils sont utiles pour comprendre les phénomènes (notamment le guide de Pekeris, qui correspond à une couche homogène d'eau comprise entre l'air et un sol connu). Cependant, les écarts sont souvent trop importants pour qu'une approximation grossière soit suffisante, et le problème doit alors être résolu de façon numérique. Dans ce cadre, plusieurs familles de modèles existent, qui s'appuient sur certaines hypothèses physiques et différentes méthodes de résolution mathématique. Chacune est destinée à résoudre certains types de problème et a des coûts en terme de calcul.

On présentera ici les grandes familles de modèles sans rentrer dans les détails mathématiques ou informatiques, mais en expliquant leurs buts et leurs utilisations principales en bioacoustique. Pour une référence détaillée sur les développements physiques, mathématiques et informatiques de chaque type de modèle, on pourra lire le livre de Jensen et al. "Computational Ocean Acoustics" [59]. Pour une présentation plus sommaire centrée sur les principes généraux et la propagation par rayons, on pourra se contenter de la présentation de Au et Hastings [7]. Les développements ci-dessous sont largement inspirés du travail réalisé pour le ministère de l'environnement Chilien en vu de réguler le bruit dans les océans, travail que nous avons produit en collaboration avec Susannah Buchan, Ivan Hinojosa et Marcelo Flores en Novembre 2018 [17]. Pour cette raison, les exemples d'utilisation des modèles de propagation sont en général tirés des réglementations internationales ou des études d'impact du bruit.

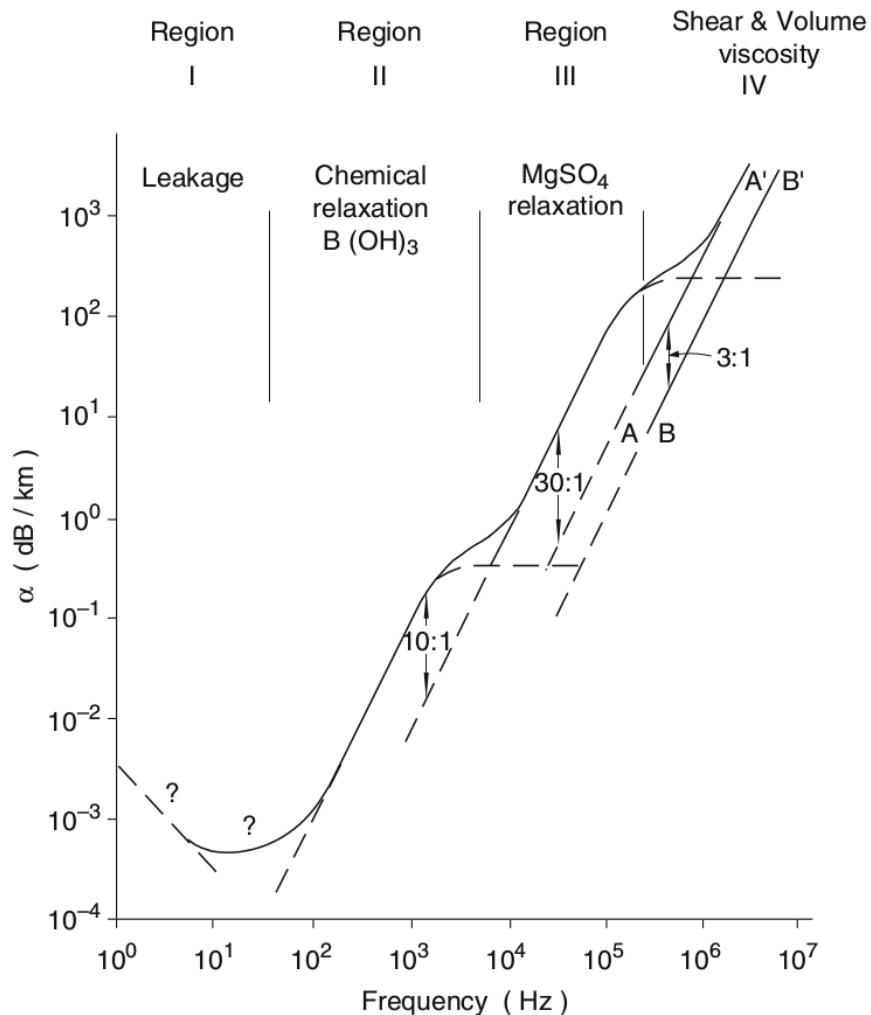


FIGURE 2.6 – L'atténuation du signal selon la fréquence est répartie en grandes régions selon le phénomène physico-chimique à l'origine de l'absorption. Illustration tirée de Computational Ocean Acoustics (Jensen et al. 2011 [59]).

2.2.1 Types de modèles

2.2.1.1 Modélisation linéaire simple : application à l'équation du SONAR

Dans le cas où le problème ne nécessite pas une grande précision, où si l'environnement est trop peu connu, il est possible d'avoir une première approximation de la propagation en utilisant simplement la fonction de Green (prise au carré car on s'intéresse à l'énergie et non à la pression). C'est une solution simple qui s'insère facilement dans l'équation du SONAR (équation 2.10) lorsqu'elle est exprimée en échelle logarithmique. En effet, il s'agit simplement de mettre en évidence que le premier effet de la propagation est la perte par divergence. Lorsqu'on considère un milieu

infini à trois dimensions, les pertes dues à la propagation se résument à

$$SPL(r) = SL - 20 \log \frac{r}{r_0}.$$

On peut facilement ajouter à cette équation un terme dû à l'atténuation (noté $\alpha(f)$ puisqu'elle dépend fortement de la fréquence du signal) :

$$SPL(r, f) = SL - 20 \log \frac{r}{r_0} - \alpha(f)r.$$

Ces modèles très approximatifs sont ensuite 'adaptés' à une situation locale. En effet, en eaux peu profondes, la géométrie est plus proche d'une symétrie cylindrique que d'une symétrie sphérique. Dans ce cas, la divergence n'est plus qu'en $\frac{1}{r}$ et on a une équation modifiée. On trouve donc des travaux faisant état d'une "équation" ad hoc pour laquelle le facteur multiplicatif du logarithme varie de 10 (propagation cylindrique, eaux peu profondes) à 20 (propagation sphérique, grandes profondeurs) de façon continue.

Un exemple de travaux utilisant ces calculs rapides de pertes peut se trouver dans le rapport de la Commission Européenne sur la régulation du bruit dans les Océans, l'étude de Ainslie et al. en 2010 [3] qui utilise pour des petits fonds :

$$TL(r) = 15 \log \frac{r}{r_0} + 5 \log \frac{\eta H}{\pi r_0},$$

où $\eta = 0,25$ est un coefficient de pertes dues aux réflexions sur le sol (une valeur typique pour des fonds sableux) et $H = 20$ m est la profondeur moyenne.

2.2.1.2 Modèles par rayons acoustiques

De tels modèles simplistes sont néanmoins très peu précis, et n'intègrent pas du tout toutes les interférences générées par les réflexions sur les bords (et notamment sur la surface, générant ce qu'on nomme en général le 'miroir de Lloyd').

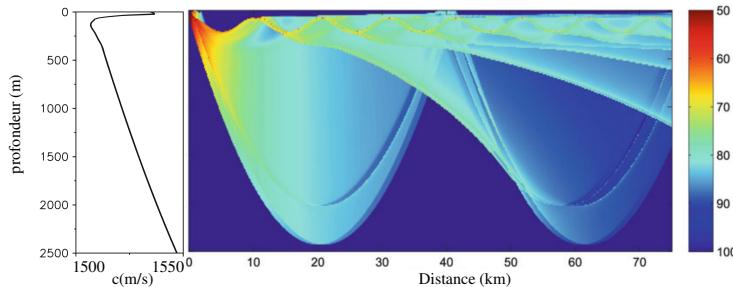


FIGURE 2.7 – Profil de vitesse du son dans la mer des Baléares et opposé des pertes par transmission (-TL, en dB) pour un faisceau sonore émis à 75 mètres de profondeur à 100 Hz. Le modèle utilisé est un modèle par rayons. On notera le guide d'onde à faible profondeur, caractéristique de la zone. On voit aussi apparaître des zones d'ombre acoustique (zones peu insonifiées) notamment sur la surface et dans les abysses. Image tirée de Jensen et al. 2011 [59].

Il est donc nécessaire de produire des modèles mathématiques fondés sur la résolution de l'équation d'onde (ou de l'équation de Helmholtz, en domaine fréquentiel). Les modèles de propagation

par rayons en sont une des premiers exemples. Bien que le traitement puisse paraître simple, il est basé sur une analyse mathématique rigoureuse, faisant l'approximation des 'hautes' fréquences, c'est-à-dire une approximation au premier ordre en $\frac{\omega_0}{\omega}$. Dans les faits cependant, la notion de haute ou basse fréquence est très variable selon les domaines et les modèles par rayon sont utilisés y compris pour des fréquences qui seraient considérées comme basses pour beaucoup d'applications (voir la figure 2.7, obtenue pour 100 Hz). Un meilleur critère est lié aux échelles spatiales de variation des paramètres, comparée à la longueur d'onde.

La solution obtenue est semblable à l'optique géométrique, et permet de reconstituer non seulement la trajectoire de l'onde (pour une fréquence donnée) mais aussi les pertes énergétiques (TL) par intégration d'un faisceau de trajectoires (voir figure 2.7).

Cette famille de modèles, très utilisée en acoustique sous-marine, permet des simulations avec des fonds variables (fond dépendant de la distance à la source, modèles dits 'range dépendant') ou non, et une vitesse de propagation du son dans l'eau variables. Cependant, ces modèles se limitent aux 'hautes' fréquences, au sens où la profondeur doit être très supérieure à la longueur d'onde. Typiquement, ces méthodes sont utilisées pour des fréquences supérieures à 1 kHz en petits fonds (voir Andersson 2017 [4]).

Développer des méthodes de propagation par rayons n'est pas aussi simple que ce que la géométrie pourrait laisser supposer, mais, une fois le modèle construit, les temps de calculs sont relativement courts. La majorité des modèles disponibles travaillent en deux dimensions. Parmi les modèles basés sur le tracé par rayons ou par faisceaux, on peut citer le code en accès libre 'Bellhop', qui fonctionne sur Matlab et qui est très utilisé.

Comme exemple récent de l'utilisation de modèles de propagation par rayon dans le cadre de la bioacoustique, on peut mentionner les travaux de Gannier et al. 2015 [45] sur les collisions de cachalot en Méditerranée. Dans cette étude, la modélisation précise de la propagation du son émis par les gros navires marchands permet de voir qu'en conditions estivales, la thermocline empêchant une bonne propagation du son vers les abysses, le cachalot remontant de plongée n'entendrait le bruit du navire que quelques dizaines de secondes avant d'être en surface, ce qui lui laisse très peu de temps pour éviter une collision.

2.2.1.3 Modèles par modes acoustiques

Autre grande famille de modèles d'acoustique sous-marine très largement utilisée, la solution par modes (ou modes normaux) de l'équation de Helmholtz dérive des premiers travaux de Pekeris [111] sur le guide d'onde qui porte son nom. Ce traitement de l'équation permet de visualiser sa solution comme la somme de 'modes d'oscillations' de fréquences distinctes, et de présenter le guide d'onde océanique comme un milieu dispersif, car à cause des pertes à chaque interaction avec le fond, la vitesse horizontale du son dépend de la fréquence. Cette famille de solution à l'avantage d'être très physique, permettant une bonne compréhension des phénomènes. Bien que les applications aient beaucoup évolué depuis le guide de Pekeris original, ces modèles restent particulièrement adaptés à des situations où les conditions physiques sont homogènes et ne changent pas avec la distance à la source ('range independent'). Pour des géométries plus compliquées, le modèle est adapté en y introduisant des corrections, qui le rendent un peu moins rapide. Le code le plus classique utilisé en bioacoustique est 'Kraken', également adapté à Matlab.

Le guide technique pour réguler les effets des bruits de pilonnages publié par l'agence suédoise de protection de l'environnement [4] donne un exemple de calcul des pertes énergétiques grâce à cette famille de modèles.

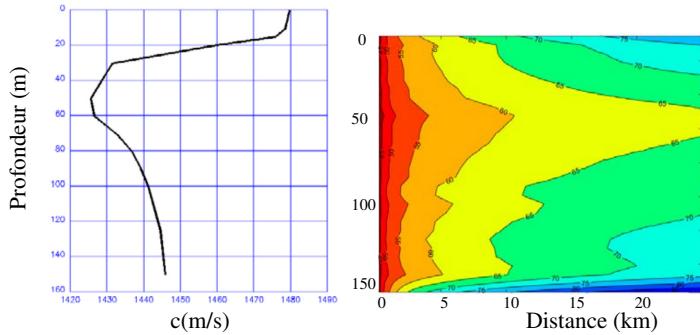


FIGURE 2.8 – Profil de vitesse du son dans la mer Baltique et pertes par transmission (TL) calculées grâce à un modèle de propagation par modes, dans un environnement indépendant de la distance. On note un canal de propagation à basse profondeur (forte insonification vers 50 mètres de fond). Tiré de Andersson 2017 [4].

2.2.1.4 Modèles de type équations paraboliques

Les solutions à l'équation de Helmholtz par équation parabolique surgissent dans les années soixante-dix dans le monde de la modélisation de la propagation sonore dans l'océan. C'est une manière rapide de résoudre l'équation de Helmholtz en transformant une équation dite de type elliptique en une équation dite de type parabolique, ce qui permet l'utilisation de méthodes de calcul classiques de type éléments ou différences finies avec une grande efficacité. En revanche, la résolution de type équation parabolique est dans le sens de la propagation uniquement et ne tient pas compte des effets retour (échos, diffractions, etc.). Les codes utilisant ces modèles se sont beaucoup développés, au point de devenir les plus répandus pour des problèmes où les paramètres physiques varient avec la distance à la source. Cependant, ce type de modèles n'est pas adapté à des géométries locales complexes ou fermées avec résonances, non plus qu'à des fréquences trop élevées, puisque la résolution fait appel à des méthodes aux éléments finis, très gourmands en temps de calcul pour des fréquences élevées. Le code le plus utilisé en bioacoustique basé sur ce genre de technique est RAM (sous différentes versions) développé entre autres par Michael Collins dès 1993 [27].

Le travail de Hastie et al. 2015 [56], qui évaluent l'impact d'une construction éolienne marine sur une population de phoques, est basé sur l'utilisation de ce type de méthodes (voir illustration sur la figure 2.9).

2.2.1.5 Autres

D'autres familles de modèles existent, bien que les modèles concernés ne soient pour l'instant pas dominants dans les applications en bioacoustique. On citera notamment les modèles travaillant dans le domaine temporel et non fréquentiel, qui permettent de suivre la propagation d'un front d'onde où d'une impulsion. Ces modèles, de types différences finies, éléments finis ou éléments spectraux, permettent de résoudre directement l'équation d'onde, sans passer par l'équation de Helmholtz, ce qui est intéressant pour des sources à géométrie complexe, des signaux impulsifs, à large bande, ou très modulés dans le temps. La modélisation permet souvent d'inclure la propagation du son dans les sols et incluent comme résultats les variables de déplacement ou vitesse particulière, données nécessaire à l'heure où se développent les capteurs permettant de les mesurer sur le terrain, et alors que de plus en plus d'études montrent leur impact sur de nombreux poissons non équipés

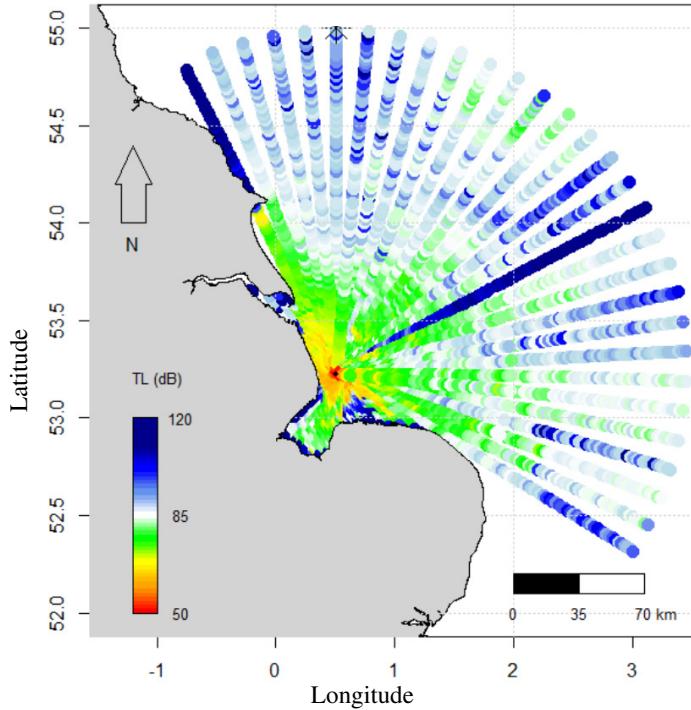


FIGURE 2.9 – Modélisation des pertes par transmission (TL) par un modèle utilisant les équations paraboliques. On notera la forte insonification côtière apparente sur cette simulation. Tirée de Hastie, 2015 [56]

de tympans. Les méthodes de ce type, cependant, sont très gourmandes en temps de calcul et ont donc été historiquement réservées à des sources basses fréquences telles que les ondes sismiques.

Un exemple d'utilisation de ce genre de méthode peut se trouver chez Hafla et al. 2018 [54], dans le cadre d'une étude sur le bruit produit par des usines marémotrices (voir figure 2.10).

2.2.2 Choix d'un modèle

On voit d'après ce rapide tour d'horizon que les solutions sont diversifiées. Les différents codes en accès libre que nous avons mentionnés sont mis à disposition des utilisateurs notamment via une librairie en ligne unique [97], maintenue par l'ONR (office de la recherche navale des Etats-Unis).

Les revues publiées par Etter (la plus récente en 2012 [40]) offrent un résumé (beaucoup plus détaillé que notre présentation) des logiciels disponibles et des avantages respectifs de chaque type de modèles.

Alors que la majorité des efforts pour reconstruire la position d'une source sonore sont basés sur des modèles par mode ou par équations paraboliques (voir le chapitre 1), nous ferons le choix d'un modèle moins classique en acoustique océanique, proche des méthodes par éléments finis, et issu de la géophysique et des modélisations sismiques. Ce modèle est décrit ci-après.

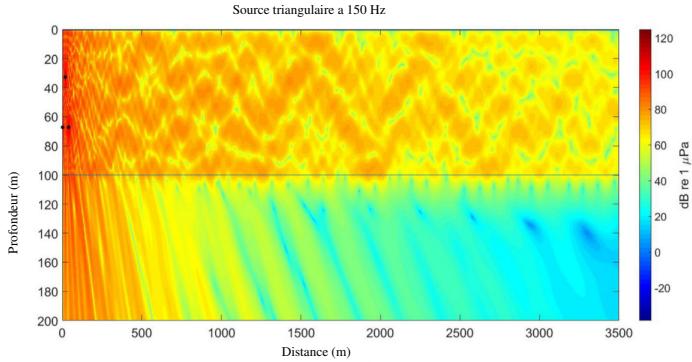


FIGURE 2.10 – Champ sonore (en dB ref $1\mu\text{Pa}$) produit par une source triangulaire sur un milieu à deux couches (l'eau et le sol). Modélisation dans le domaine temporel par une méthode aux éléments finis. Figure tirée de Hafla et al. 2018 [54].

2.3 SPECFEM

Nous utilisons dans notre travail un logiciel nommé SPECFEM qui présente un modèle de type éléments spectraux. Mathématiquement, les méthodes par éléments spectraux utilisent la formulation faible de l'équation d'onde, réalisée à l'aide de fonctions polynomiales par morceaux avec des polynômes de degrés élevés. Le champ acoustique est représenté par une interpolation à base de fonctions de Legendre de hauts degrés et les intégrales sont calculées par des méthodes de quadrature de Gauss dites méthodes Gauss–Lobatto–Legendre. Pour le détail des techniques mathématiques utilisées, on pourra se référer à l'article fondateur de Komatitsch et Vilotte, 1998 [63] ou celui de Komatitsch et Tromp, 1999 [62]. L'intérêt de ce genre de méthodes est qu'elles conduisent à des matrices de masse diagonales, qui peuvent être inversées simplement et sont adaptées à une parallélisation du calcul (voir notamment Tsuboi 2003 [121]). Cet élément est fondamental dans la mesure où de grands calculateurs parallèles sont désormais facilement accessibles qui rendent les méthodes basées sur des maillages (dont l'inconvénient majeur est le nombre de calculs mis en jeu) de plus en plus intéressantes. Les calculs peuvent aussi être fait par des cartes graphiques de type groupes de GPU, une technique de plus en plus développée étant donné son faible coût à l'heure de la multiplication de cartes graphiques peu chères et très performantes.

La méthode par éléments spectraux permet d'utiliser des maillages compliqués et irréguliers. La taille du maillage doit être de l'ordre de grandeur de λ , la plus petite longueur d'onde du signal modélisé. On voit donc que des fréquences plus hautes nécessitent un maillage plus fin, et par conséquent un temps de calcul beaucoup plus grand (celui-ci étant lié à la taille du maillage à la puissance quatre dans un maillage régulier à trois dimensions) ce qui explique que ces méthodes aient été surtout adaptées à des signaux basses fréquences tels que les tremblements de terre. L'équation d'onde est pleinement résolue aussi bien dans des milieux fluides que dans des milieux solides ou complexes (milieux poreux, milieux avec atténuation, etc. voir par exemple Morency et Tromp, 2008 [90]).

Les méthodes dites par éléments spectraux, essentiellement représentées par le logiciel SPECFEM, sont donc actuellement fréquemment utilisées pour les modélisations sismiques (voir Tromp et al. 2008 [144] pour une revue). SPECFEM est ainsi l'un des douze programmes utilisés pour l'UEABS (Unified European Application Benchmark Suite [148]), un ensemble de logiciels utilisés comme bancs d'essais pour les ressources informatiques européennes. L'utilisation de ces méthodes s'ouvre également à d'autres domaines, et on trouvera notamment dans la lettre publiée par Cristini

et Komatitsch en 2012 [29] une revue des applications aux problèmes de l’acoustique océanique.

Concrètement, si elle n’est pas simple, l’utilisation du logiciel SPECFEM est largement à la portée de n’importe quel scientifique moyennant un certain investissement en temps. Fourni gratuitement sur le site du CIG (Computational Infrastructure for Geodynamics, [131]), SPECFEM-3D est programmé en Fortran et installable facilement sur n’importe quel ordinateur. Son utilisation passe par des fichiers de paramètres qui lui seront soumis. La disponibilité et réactivité de ses concepteurs et utilisateurs permet de résoudre les problèmes éventuels lors de son utilisation, voire d’y apporter quelques modifications le cas échéant, puisqu’il s’agit d’un logiciel libre ouvert aux apports de la communauté. Nous avons mentionné que SPECFEM est particulièrement adapté à la parallélisation des calculs. Après avoir travaillé sur des ordinateurs personnels, nous avons utilisé les ressources informatiques du centre CINES de Montpellier pour nos simulations importantes (projet DARI A0020407165 dirigé par Dimitri Komatitsch).

Chapitre 3

Constitution d'un nouveau corpus pour l'étude de mysticètes

Dans le but de constituer un corpus de base alimentant nos travaux, nous avons choisi une zone du nord du Chili pour y installer un instrument autonome d'enregistrement large bande. Ce lieu est qualifié à plusieurs titres : d'une part il s'agit d'une zone connue pour son abondance de mammifères marins (voir partie 3.3.1), très étudiée par les biologistes de l'université de Valparaíso mais pour lequel nous ne disposons d'aucune base de donnée acoustique. Différents enjeux de caractérisation des sons émis par les mammifères marins sont donc présents sur la zone. D'autre part, la collaboration avec nos collègues de l'université de Valparaíso offre la perspective d'un double suivi visuel/acoustique sur la zone.

Nous avons donc conçu, construit et posé un dispositif fixe d'enregistrement sonore sur la côte chilienne, le premier dans toute la partie nord du Chili (les seules stations d'enregistrement fixes de cétacés ayant auparavant été posées en Patagonie par Susannah Buchan et al en 2010 [19]). Notre but dans la conception de ce dispositif était d'obtenir des sons basse fréquence de cétacés avec en parallèle une localisation visuelle des animaux par une équipe d'experts. Cependant, nous voulions aussi permettre d'autres objectifs scientifiques : dans ce but, c'est toute une équipe internationale qui s'est organisée autour du projet de façon à utiliser au mieux les données recueillies.

Ce chapitre a pour but de synthétiser le travail effectué autour de ce projet. Il permet aussi de rassembler les informations techniques associées, ainsi que toutes les dates clefs du projet. Les problèmes et aventures rencontrés y sont consignés, ainsi que quelques pistes sur les mesures à prendre pour éviter que ces soucis se répètent pour de prochains projets de terrain. Nous le terminons par un rapide bilan des données figurant dans notre corpus, dont toutes n'ont pas encore été exploitées.

La partie technique de ce chapitre est très largement inspirée de notre rapport de recherche écrit en 2017 [108].

3.1 Présentation de l'équipe

En arrivant au Chili, appuyés par l'université de Toulon, nous avons proposé l'idée de laisser un dispositif fixe d'enregistrement sur la côte chilienne. Cette idée a été reprise avec enthousiasme par notre collègue Susannah Buchan, de l'université de Concepción, qui nous a présentés à l'équipe de l'université de Valparaíso, dirigée par Maritza Sepúlveda, ainsi que l'ONG Eutropia, représentée notamment par Macarena Santos. Cette équipe de chercheurs travaille depuis des années sur la zone, sur le suivi des animaux, la gestion du tourisme, etc.

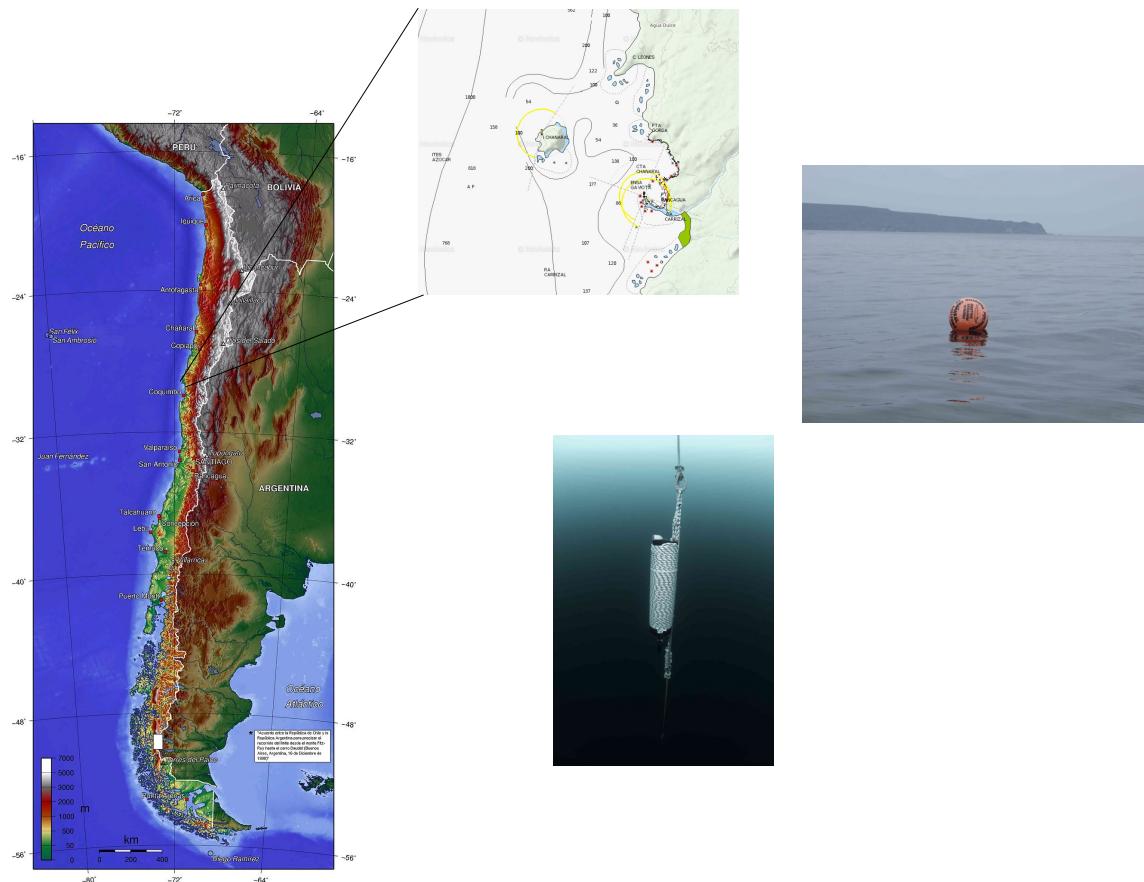


FIGURE 3.1 – L’appareil de mesure : situation au nord du Chili, dans la *caleta* Chañaral de Aceituno. Vue de la bouée de surface, et du caisson en situation (cliché F. Pérez)

Petite présentation des personnes et organismes ayant participé activement au projet.

3.1.1 Université de Toulon et LIS : préparation et suivi technique

L’appareil a été monté avec du matériel (hydrophone, enregistreuse, tube étanche, ..) et des fonds issus de l’université de Toulon et du LIS, via Hervé Glotin, directeur de l’équipe DYNI. Tout ce matériel a pu être acheminé au Chili, où il a été monté, mis en place et testé par les missionnés DYNI au Chili : Franck Malige, actuellement en congé de formation professionnelle et chercheur associé au LIS, et Julie Patris, en thèse avec Hervé Glotin, de l’Université de Toulon et Mark Asch, de l’Université de Picardie.

3.1.2 Université de Valparaíso et ONG Eutropia : suivi visuel des animaux

Maritza Sepúlveda, de l’université de Valparaíso et de l’ONG Eutropia, a dirigé une équipe issue de cette ONG et de diverses universités (U de Chile, etc.). L’université de Valparaíso a également participé aux frais logistiques des missions : transports, logement, lors des premières visites sur le

site et lors de la campagne de mesures. Macarena Santos, appartenant aux mêmes structures, a coordonné de l'intérieur l'équipe de volontaires qui a effectué les relevés de position des animaux visibles sur le site. Ce travail est partie intégrante de leur projet de suivi des animaux autour de la réserve (voir un premier livret publié en 2017 [127]) qui a été adapté de façon à pouvoir s'intégrer à notre étude acoustique : leur protocole de suivi des animaux a été modifié, en y ajoutant un relevé exhaustif des positions de tous les animaux présents sur zone toutes les heures environ.

3.1.3 Équipe technique sur place

La conception et la préparation de l'ancrage, sa réalisation technique, ont été réalisés en collaboration étroite avec Susannah Buchan, de l'Université de Concepción (programme COPAS Sur-Austral). Susannah a participé au financement de la ligne d'ancrage, ainsi que des voyages (fréquents) en bateau pour l'installation et la maintenance des instruments, et la logistique sur place. Enfin, elle a participé en tant qu'experte et plongeur aux nécessaires manipulations sur le dispositif, par 15 à 30 mètres de fond, pour les tests et le changement de batterie et de mémoire.

Sur place, César Villaroel, du club de plongée ExploraSub, a été en permanence à nos côtés, en fournissant le matériel et l'expertise technique pour les plongées, le bateau, un ou plusieurs plongeurs, et jusqu'à des possibilités de logement.

Enfin, beaucoup d'habitants du village nous ont aidés, entre apport logistique, appui concret (en sacs de ciment !), voyages de reconnaissance en bateau, conseils et aide matérielle et technique (merci Don Pato pour m'avoir appris le noeud des pêcheurs d'araignées de mer d'Aysen !).

3.2 Eléments techniques du dispositif d'enregistrement

Le dispositif d'enregistrement a été conçu et fabriqué par l'équipe DYNI : en amont, à Toulon, avec la commande d'un tube étanche à haute tolérance à la pression équipé de sorties presse-étoupe, et des modifications effectuées sur un enregistreur commercial (ajout d'une carte SD à grande capacité). L'hydrophone utilisé a lui aussi été fourni par le laboratoire LIS pour cette mission. Sur place au Chili, nous avons surtout rassemblé ces éléments et permis leur utilisation optimale, par des solutions de montage, de nombreux tests à différents niveaux et la rédaction d'un manuel de maintenance à usage de l'équipe locale. Ci-dessous, quelques détails techniques de l'appareil.

3.2.1 Hydrophone

L'hydrophone utilisé est fabriqué par Cetacean Research aux Etats Unis. Il s'agit du modèle C57, un hydrophone robuste à large bande et multidirectionnel en basse fréquence ($f < 10$ kHz), adapté à l'optique généraliste de notre étude.

D'après sa fiche de caractéristiques, le capteur est linéaire entre 20 Hz et 44 kHz (à 3 dB près) mais peut être utilisé de 9 Hz à 100 kHz avec perte de linéarité (20 dB). Il est donc utilisable aussi bien pour les grands cétacés (fréquences minimales de l'ordre de 15 Hz) que pour les tursiops (cris et sifflements jusqu'à 20 kHz, clics au-delà).

En haute fréquence, le capteur est sensible essentiellement sur le plan normal à son axe. Nous avons donc choisi ce modèle, en le plaçant avec son axe vertical et pointé vers le bas, de façon à capter les sons basses fréquences au mieux (en étant un peu protégé par le tube lui-même du bruit BF de surface) tout en recevant les sons haute fréquence des animaux (les dauphins, donc), nageant dans un plan proche du plan normal au tube, c'est à dire entre la surface et quelques dizaines de mètres de profondeur (l'hydrophone sera placé à une vingtaine de mètres de profondeur).

L'hydrophone est alimenté en 9 V par six piles 1,5 V haute capacité (type 'D') et le signal est récupéré via un filtre passe-bas constitué de deux condensateurs en parallèle selon le schéma ci-joint (figure 3.2). En effet, le signal de sortie de l'hydrophone a une porteuse continue qui doit être éliminée. L'hydrophone consomme peu (0,11 W) et les six piles permettent théoriquement une autonomie d'un mois.

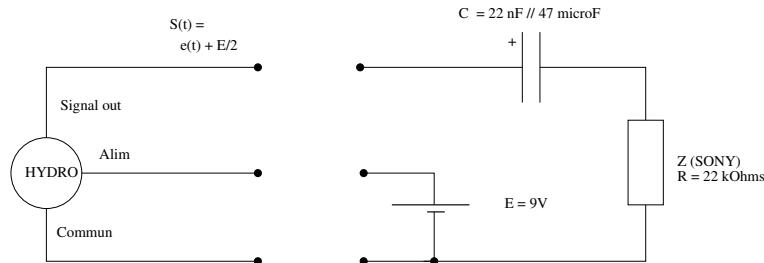


FIGURE 3.2 – Schéma électrique de la connection entre l'hydrophone et l'enregistreuse

L'hydrophone est protégé par une petite cage de plastique ad-hoc et fixé au corps du caisson par un tube de PVC, de la mousse et du châterton. Cette fixation doit permettre d'éviter les mouvements de l'hydrophone (générateurs de bruit) mais aussi la transmission des éventuelles vibrations du caisson au capteur.

3.2.2 Enregistrement

L'enregistrement se fait au moyen d'un appareil d'acquisition de données (DAQ, ou enregistreuse) courant, de type SONY PCM M10.

Le dispositif d'enregistrement a été conçu par Hervé Glotin, qui a réalisé une évaluation de qualité et autonomie des DAQ en septembre 2016, en vue d'une acquisition en BF à bas coût, mais de qualité, pour le suivi de baleines bleues, tout en assurant un suivi des dauphins. L'étude a été menée en concertation internationale, notamment en collaboration avec le Professeur Gianni Pavan, de l'université de Pavie, professeur invité régulier de l'université de Toulon. Un banc d'essai a été réalisé, sur les DAQ de plusieurs fabricants experts : SONY, TASCAM, ZOOM, Olympus,... Le choix s'est tourné vers le Sony M10 (350 euro), qui n'est plus en vente depuis 2 ans environ, mais qui offre le meilleur compromis entre consommation et qualité basse fréquence. Il nous a fallu lui augmenter la capacité de stockage, qui est supportée jusqu'à 16 Go sur microSD (voir documentation de l'appareil).

Un adaptateur permet d'utiliser une carte SD en lieu et place de la carte microSD prévue pour cet appareil. Une carte de 256 Go de capacité est utilisée, ce qui permet un enregistrement long. Une carte de 512 Go avait également été formatée par notre collaborateur Gianni Pavan (Pavie, Italie) mais un problème a été révélé aux tests : l'apparition d'un bruit manifestement de nature électronique, probablement dû à l'excès de transit d'information. En effet, ce bruit est d'autant plus important que la fréquence d'échantillonnage est élevée. Ce problème doit être revu pour une éventuelle réutilisation du matériel : en particulier, l'adaptateur microSD - SD comporte une longue nappe de connections (60 cm de longueur pour une vingtaine de fils parallèles) qui est inutile et gênante pour l'expérience. Ce genre de connecteur est rare et nous n'en n'avons pas trouvé au Chili. Nous avons trouvé un connecteur paraissant plus simple (sans nappe de raccord) mais le temps de livraison est trop important pour pouvoir espérer l'obtenir pour cette session.

Par ailleurs une autre limitation renforce le choix de la carte de 256 Go : l'enregistreuse ne réussit pas à passer d'un répertoire à l'autre, malgré l'option choisie (cross-memory recording). Cela limite donc l'enregistrement à 99 fichiers, de 2 Go chacun environ en WAV 48 kHz 16 bits,

pour une durée d'environ 13 jours d'enregistrements continus. En effet, l'enregistreuse ne permet pas une programmation et mise en veille : d'où le choix d'un enregistrement en continu, qui est rare pour ce type de suivi. La carte JASON de la plateforme scientifique de l'université de Toulon permettra dans les prochains protocoles des enregistrements avec mise en veille, et des sauvegardes sur des supports de 512 Go ou 2 To, ce qui conduira à des mois d'autonomie sur batterie Lipo. Ce système est finalisé et maintenant disponible.

L'enregistreuse est alimentée en 3V par un ensemble de 4*2 piles haute capacité (type D) à 1,5 V . Cet ensemble doit permettre un fonctionnement pendant plus de deux semaines en autonomie.

L'entrée utilisée est 'Line in' sur laquelle est envoyé le signal issu de l'hydrophone via les condensateurs de filtrage.

Lors des tests effectués, nous avons constaté un bruit constant lié à l'utilisation du 'Line in' de l'enregistreuse. En effet, ce bruit disparaît lors de l'utilisation des microphones intégrés de l'enregistreuse. Ce bruit ressemble à une horloge, il est pratiquement carré, avec une fondamentale à 214 Hz. Il est remarquablement constant, et apparaît même lorsque le SONY est seul (équipé uniquement d'un connecteur jack sur l'entrée Line in, ce qui déclenche le mode enregistrement extérieur et désactive les micros internes). Nous n'avons pas pu nous débarrasser de ce bruit, qui est peut-être dû à un défaut de l'enregistreuse utilisée. Il sera donc nécessaire, avant tout traitement, de filtrer les fréquences associées (214 Hz et harmoniques impaires).

3.2.3 Caisson

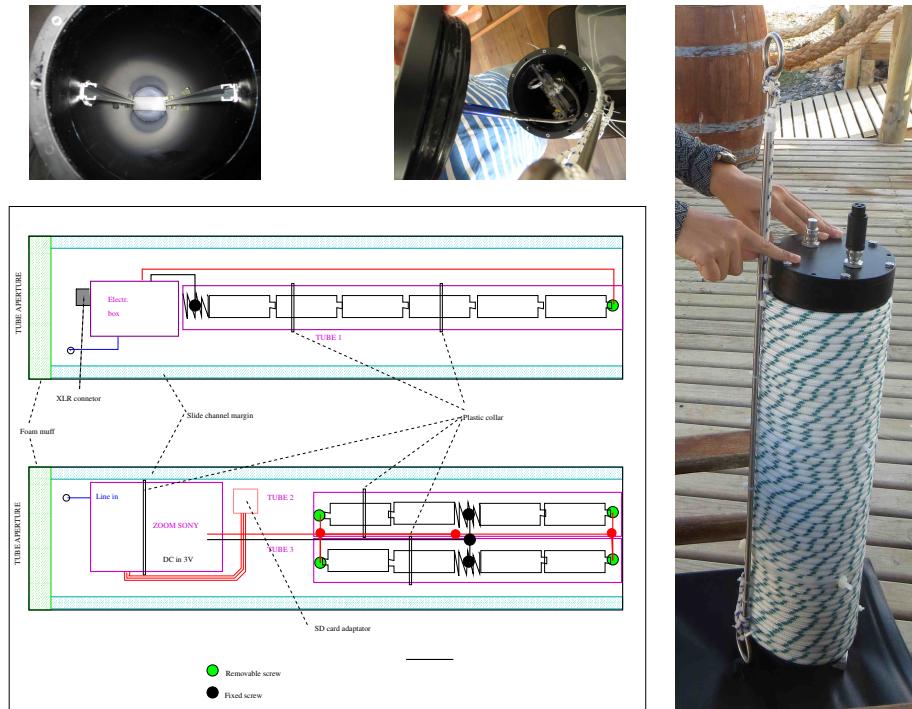


FIGURE 3.3 – Quelques vues du caisson : glissière et plaque de support insérée, vue extérieure et schéma de montage de la plaque.

Le caisson utilisé est un cylindre métallique conçu pour résister à des très hautes pressions,

et fabriqué par l'entreprise 'Osean' (basée à Toulon) pour l'université de Toulon. Il est équipé de deux écrous presse-étoupe pour permettre de laisser passer les câbles de deux capteurs extérieurs (ici, un seul, l'hydrophone).

Dans le caisson, nous avons collé deux glissières en aluminium. Dans celles-ci vient se loger une plaque de plexiglas qui servira de support pour l'ensemble du montage : alimentation (deux séries de piles), petite boîte électronique pour le filtre, enregistreuse, prise pour le câble, support de carte mémoire. Des manchons de mousse viennent assurer que la plaque reste bien fixe à l'intérieur du caisson.

Pour la fixation du caisson à la ligne de fond, nous avons enroulé une aussière autour du tube, qui prend également une corde plus fine. Celle-ci est fermement attachée à une tige en acier inoxydable munie de deux boucles. La tige a pour double fonction de protéger l'hydrophone de la ligne de fond, et de maintenir le caisson.

3.3 Choix du lieu et pose de la ligne d'ancrage

3.3.1 La caleta Chañaral de Aceituno

La zone autour de la réserve marine Pingüinos de Humboldt, au nord du Chili (proche de la latitude 30° sud) est un des endroits les plus favorables à l'étude des cétacés dans ce pays. C'est un endroit à la fois accessible (environ une journée de voyage depuis Santiago) et écarté des voies de transit majeures (une centaine de kilomètres de route en terre pour arriver). La réserve est faite d'une zone maritime autour de trois îles : Isla Dama, Isla Choros et Isla Chañaral. Ces deux dernières sont par ailleurs des réserves intégrales, de façon à protéger les populations d'oiseaux marins qui y nichent, et particulièrement les manchots de Humboldt, dont c'est pratiquement le seul lieu de reproduction. Le village près des îles Dama et Choros est actuellement le site d'observation de cétacés le plus fréquenté au Chili : le tourisme y a une place importante, avec probablement des effets sur les populations de cétacés. Le village en face de l'île Chañaral (*caleta Chañaral de Aceituno*) est un peu moins accessible, et de ce fait un peu moins fréquenté, même si il vit essentiellement du tourisme. Ces deux lieux sont, depuis une quarantaine d'années, des lieux de bases pour l'étude des cétacés chiliens, abritant en été notamment une biodiversité impressionnante. Cette richesse est due à des conditions océanologiques spécifiques : le courant froid de Humboldt affleure et rencontre en surface des courants plus chauds issus des côtes péruviennes. Dans ce contexte la production de krill (aliment de prédilection des grands rorquals) est très active, et le krill est à son tour consommé par de nombreuses espèces, alimentant plusieurs chaînes trophiques.

Pour ne parler que des cétacés, les animaux les plus fréquemment rencontrés sont listés ci-dessous :

- le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*). Il est vu quotidiennement dans le chenal entre les îles et la côte de novembre à avril. En général plusieurs animaux sont présents sur la zone à cette époque.
- la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*). Elle est vue plus rarement, en général en janvier. En 2017 cependant, plusieurs baleines bleues ont été aperçues de façon régulière depuis décembre jusqu'à mars.
- la baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*). Des animaux de passage sont régulièrement aperçus, plutôt en début de saison (de novembre à février).
- les grands dauphins (*Tursiops truncatus*). Un groupe d'une vingtaine d'animaux résidents restent en permanence près des îles de la réserve. Fréquemment, des groupes parfois beaucoup plus importants d'animaux de passage les rejoignent. Ces animaux sont visibles toute l'année sur la zone.
- le dauphin commun (*Delphinus delphis*), quoique plus discret, est également très souvent

vu, parfois en groupes d'une centaine d'individus.

- le dauphin obscur (*Lagenorhynchus obscurus*) est aussi vu régulièrement.
- le dauphin de Risso (*Grampus griseus*) y est commun.
- les globicéphales noirs (*Globicephala melas*) y sont vus en grands troupeaux, plusieurs fois par an.
- les cachalots (*Physeter macrocephalus*) ont été aperçus au large de l'île, souvent en hiver (juillet/août).
- les orques (*Orcinus orca*) sont observées de temps en temps, possiblement en prédatation lors des migrations des baleines à bosse avec leurs jeunes.

Sur cette dizaine d'espèces courantes, nous avons pu en observer six lors de nos quelques sorties durant cet été : il y a une richesse et vie vraiment impressionnantes dans ce lieu.

3.3.2 Lieu de la bouée

Après une réunion qui s'est tenue en août 2016, nous avions projeté d'installer notre appareil à l'intérieur du chenal entre l'île de Chañaral (la plus grande et de l'archipel) et la côte associée au village de Chañaral de Aceituno. La zone observée par les biologistes présents sur l'île couvre en effet tout le chenal, de la pointe dite des Leones au nord jusqu'à la presqu'île du village au sud. Le chenal remonte en profondeur vers le nord, qui est plus abrité, les vents dominants et la houle venant majoritairement du sud-ouest.



FIGURE 3.4 – Toute l'équipe de Explora Sub au retour du premier test réussi : la ligne de corps mort est posée, l'appareil est dans l'eau et enregistre son premier corpus !

Lors de la pose du corps mort de notre mouillage, cependant, nous avons constaté que les différentes cartes dont nous disposons, qui sont visiblement toutes issues de la même source, sont radicalement fausses. Ainsi, le point noté '54 mètres' sur les cartes, qui est de toutes façons situé

selon celles-ci dans une zone à moins de 100 mètres de profondeur, s'est révélé être à plus de 120 mètres de fond. Ce point est celui que nous avions choisi, pour être assez central, mais nous avons dû effectuer un sondage du lieu et changer notre position, à près d'un mille au nord est de la position prévue. Cette zone, marquée d'un point rouge sur la figure 3.5, se situe par une profondeur de 66 mètres environ, ce qui est accessible à notre matériel (nous avions une corde de longueur 100 mètres) - mais est loin des 36 mètres annoncés sur la carte.

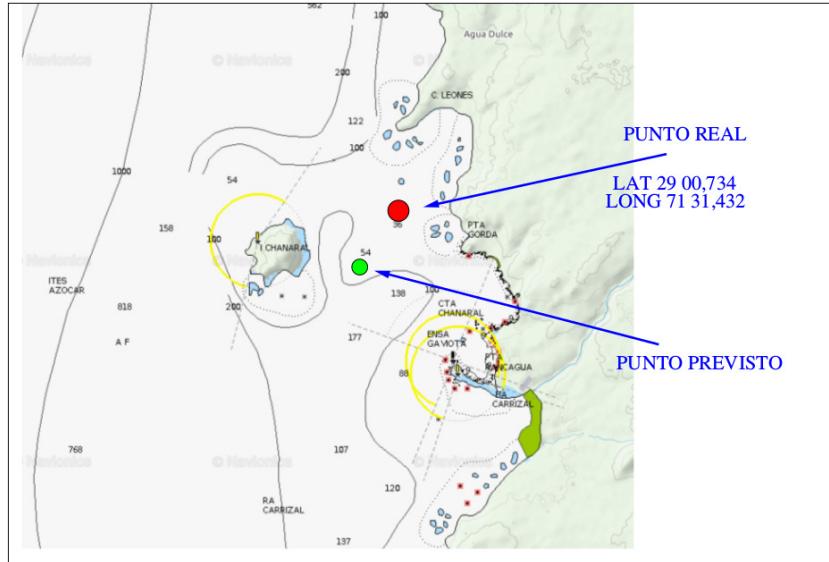


FIGURE 3.5 – Illustration du lieu d'installation de l'appareil. Le fond de carte est issu du logiciel 'Navionics' (étant cohérent avec les cartes d'état major et les cartes commerciales type Garmin du lieu). Le point initialement prévu est noté en vert, étant donné sa profondeur mesurée (plus de 120 mètres) nous avons dû y renoncer et poser le corps mort à un mille nautique de la position initiale, sur la zone désignée par le point rouge.

Nous avons pu constater que c'est une zone qui reste fréquentée par de nombreux animaux, puisque nous avons rencontré une baleine et/ou des dauphins à chaque fois que nous nous sommes rendu sur place. De plus, notre bouée était visible du point d'observation de l'île. La changement de position ne s'est donc pas révélé un problème a posteriori.

La position géographique de notre appareil est donc : 29° 00' 44" de latitude sud et 71° 31' 26" de longitude ouest.

3.3.3 Description de la ligne d'ancrage

Le mouillage de notre appareil a été conçu et fabriqué sur place, dans la *caleta*, après de nombreuses discussions avec les habitants, les pêcheurs, les opérateurs touristiques et notre équipe.

Le choix qui a finalement été fait peut être décrit de la façon suivante :

- **le corps mort.** C'est un pneu de dimensions 50 cm de diamètre sur 20 cm de hauteur, dans lequel a été coulé du ciment et des pierres, ainsi qu'une grille sommaire de fers à béton. Un fer à béton a également été tordu pour faire une poignée. La masse estimée du corps mort total est de 150 kg (à une trentaine de kg près). Nous n'avons pas pu le peser pour vérifier sa masse, mais nous avons constaté que quatre personnes pouvaient sans problème

le soulever, ce qui limite la masse à 200 kg probablement.

- **l'aussière.** La corde utilisée pour le mouillage faisait une centaine de mètres de longueur, pour deux centimètres de large, toronnée sur deux brins, flottante. A une distance de cinquante mètres du corps mort (donc de l'ordre de 15 mètres de profondeur), deux boucles sont faites sur la corde distantes d'environ deux mètres. Ces boucles serviront à poser l'appareil. A soixante mètres du corps mort (donc en moyenne à 5 mètres de profondeur) une petite bouée jaune de filet est assujettie à la corde, pour assurer sa tension vers le haut. Enfin, la bouée de surface est attachée en bout d'aussière, avec une marge importante étant donnée les variations potentielles de profondeur dues à la marée (de l'ordre d'un à deux mètres) et à la houle (de deux à quatre mètres en conditions normales).
- **les flotteurs.** Les deux flotteurs utilisés sont : une petite bouée en mousse pleine, jaune, utilisée en général comme flotteur de filet, et une bouée de 36 litres orange, très visible. Sur cette bouée de surface, nous avons noté le nom du projet, ainsi que les coordonnées de personnes ressources habitant le village. En effet, la bouée sera nécessairement vue par les pêcheurs et marins locaux : il est important que tous se sentent concernés et la 'protègent'. De plus, en raison de la marge que nous avons prise, le plus souvent quelques mètres de corde flottent autour de la bouée de surface : nous avons prévenu tous les habitants de ne pas trop s'approcher de la bouée de façon à ne pas prendre cette corde dans l'hélice. Si cet accident arrivait, les coordonnées écrites sur la bouée peuvent permettre de contacter une personne au courant de la manipulation.

Toute la ligne de mouillage ne comprend aucune partie métallique pour éviter les bruits possibles. Les noeuds sont assurés avec des colliers de serrage en plastique de façon à minimiser les frottements. Le caisson équipé a une flottabilité positive : il ajoute donc à la flottabilité de l'ensemble de la ligne.

Le protocole pour la mise à l'eau du corps mort, moment un peu délicat, a été décidé en accord avec l'équipage à bord. L'aussière prise dans les deux bouées a d'abord été mise à l'eau, puis écartée du bateau par la dérive. Nous avons alors attaché son extrémité libre au corps mort avec une boucle non coulissante (pour éviter les frottements sources de bruit et d'usure) protégée par un manchon de tuyau en plastique (pour éviter que l'anneau de fer ne coupe l'aussière). Le corps mort a été basculé par dessus bord et a coulé sans problème, entraînant l'aussière.

Lors de chaque maintenance, des plongeurs (deux ou trois) sont allés enlever ou fixer la tige métallique de l'appareil aux deux boucles de l'aussière principale, en maintenant la corde par des colliers de façon à éviter les coups et mouvements sur le caisson (voir l'image de la figure 3.6).

3.4 Déroulé des mesures

3.4.1 Choix des paramètres

En décembre 2016, lors d'une réunion, nous avons pu choisir les paramètres des relevés acoustiques en accord avec l'ensemble des scientifiques impliqués dans le projet. Pour des raisons pratiques, nous avons retenu une période de l'ordre de 15 jours entre deux manutentions. Le choix de la fréquence d'échantillonnage a été dicté par l'impératif de tenir deux semaines d'autonomie (tout en ayant environ 200 Go de stockage) mais d'essayer d'enregistrer aussi les moyennes fréquences pour pouvoir caractériser les sifflements de tursiops (projet de Maria-José Pérez spécialiste des dauphins résidents [112]).

Pour la première saison (été austral 2016/2017) nous avons donc choisi d'enregistrer à 48 kHz de fréquence d'échantillonnage avec une dynamique de 16 bits. Pour la seconde saison (printemps et été austral 2017/2018) nous avons baissé la fréquence d'échantillonnage à 24 kHz de façon à augmenter l'autonomie, les données déjà recueillies pour les dauphins paraissant suffisantes. Notre



FIGURE 3.6 – Les deux instructeurs de plongée César Villaroël et Rodrigo Sanchez installent l'appareil pour sa première mission test en décembre 2016. Cliché Francis Pérez.

enregistreur ne permet pas de fréquence d'échantillonnage plus basse.

3.4.2 Calendrier

Le calendrier de la partie acoustique s'est largement appuyé sur celui de la partie visuelle, avec une marge de quelques jours pour s'adapter aux disponibilités de notre équipe de plongeurs.

Calendrier des relevés visuels :

- saison 2016/2017, première série d'observations du mardi 16 au samedi 28 janvier 2017 inclus,
- saison 2016/2017, deuxième série d'observations du mercredi 15 au lundi 27 février 2017 inclus.
- saison 2017/2018, première série d'observations du lundi 27 novembre au samedi 16 décembre 2017 inclus.

Protocole des relevés visuels : les observations se font en continu, sept jours sur sept sauf en cas de vent supérieur à 3 Beaufort, de 9h du matin à 18h. Deux théodolites sont utilisés. Ceux-ci servent essentiellement à faire un suivi des cétacés et des bateaux de tourisme dans le cadre du projet de Maritza Sepúlveda [127]. Néanmoins, toutes les 30 minutes environ, un relevé général de tous les cétacés visibles sur la zone est effectué. Pour chaque animal, sont notés la position et l'espèce.

Calendrier des relevés acoustiques :

- première saison, première période d'enregistrements : du lundi 16 janvier 16h30 (début de l'enregistrement) au dimanche 29 janvier 12h (fin de l'enregistrement) 2017,
- première saison, deuxième période d'enregistrements : du mercredi 1er février 9h30 (début de l'enregistrement) au lundi 13 février 20h (fin de l'enregistrement) 2017,
- première saison, troisième période d'enregistrements : du mardi 14 février 9h30 (début de l'enregistrement) au lundi 27 février 12h (fin de l'enregistrement) 2017.
- seconde saison, première période d'enregistrements : du dimanche 29 octobre 14h (début de l'enregistrement) au mercredi 22 novembre 5h30 (fin de l'enregistrement) 2017,
- seconde saison, deuxième période d'enregistrements : du dimanche 26 novembre 21h (début de l'enregistrement) au samedi 9 décembre 1h (fin de l'enregistrement) 2017,
- seconde saison, troisième période d'enregistrements : du lundi 22 janvier 13h30 (début de l'enregistrement) au dimanche 11 février 20h30 (fin de l'enregistrement) 2018.

Lors de chaque changement, la température de l'eau au niveau du caisson, ainsi que la profondeur de l'hydrophone, ont été relevés par les plongeurs.

3.4.3 Quelques imprévus

Nous avons été informés fin février que la bouée de surface avait disparu. L'équipe présente à Chañaral de Aceituno, composée notamment de Susannah Buchan et César Villaroël a néanmoins pu récupérer le caisson et l'hydrophone, grâce à Mauricio Handler, cameraman sous-marin qui suivait le projet, qui accompagnait le bateau à quelques mètres de profondeur lors des travaux de recherche.

De la bouée, ne restait que la boucle d'accroche. La tige métallique assujettie au caisson a manifestement été violemment tirée vers le bas (la surlure de la corde sur le caisson a été sollicitée avec une force estimée à beaucoup plus que 1000 N) et la fixation de l'hydrophone a été endommagée. Cependant, l'appareil a continué de fonctionner, en produisant des données plus bruitées, les mouvements d'eau - courants, marées, vagues - provoquant des chocs et des frottements fréquents. Une rapide analyse des données montre un phénomène acoustique violent le 18 février 2017 à 22h (voir figure 3.7), marquant le début du bruit dans les données : il est donc probable que cette date corresponde au choc.

Il est difficile de savoir ce qui a provoqué l'accident. Cependant, au vu des fichiers sons enregistrés le 18 février à 22h, il semble qu'aucun bateau ne se trouvait à proximité du dispositif lors du choc. En conséquence, il semble probable que l'accident soit dû à une baleine ayant percuté la ligne de mouillage. Un son totalement saturé mais centré à 48 Hz juste après le choc laisse penser à un grand rorqual, type rorqual commun ou baleine bleue.

Cet accident est naturellement dommage, puisqu'il a altéré la qualité de la dernière série de données, mais il n'a probablement pas affecté la baleine l'ayant provoqué (autre qu'un énervement passager exprimé par le grognement) et démontre la robustesse générale de notre montage.

Un autre problème a affecté la série d'enregistrements d'octobre-novembre 2017 : la mousse qui assujettissait l'hydrophone s'est recroquevillée. Cela génère aussi des données plus bruitées. On suppose que ce problème est dû à la vétusté de la mousse, car le reste des paramètres était semblable aux autres missions de l'instrument. La mousse a été remplacé par du cordage, plus fiable, pour les deux missions restantes.

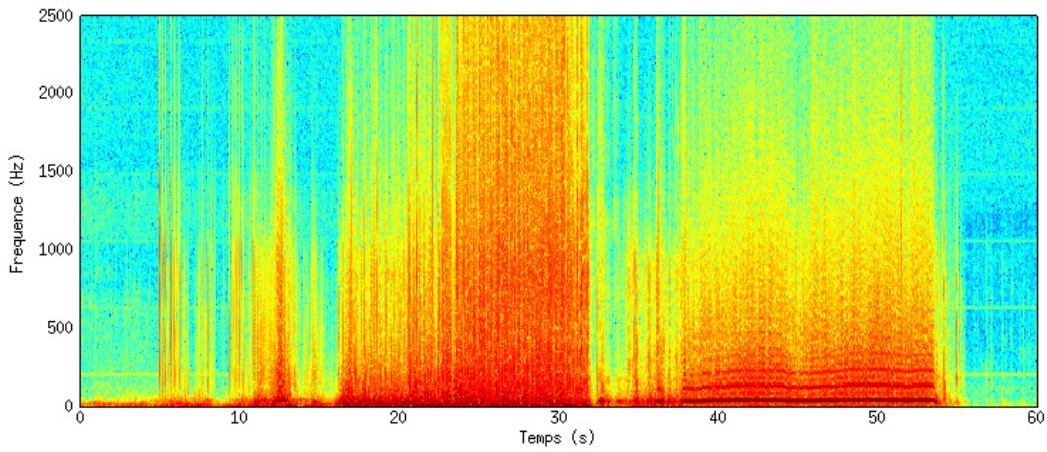


FIGURE 3.7 – Représentation temps/fréquence du phénomène acoustique violent ayant eu lieu le 18 février. On notera la différence entre les deux parties du son enregistré : la première correspond à un bruit 'blanc' (réparti sur toutes les fréquences) alors que la deuxième partie est tonale, quoique saturée, autour d'une cinquantaine de Hertz.

3.5 Corpus obtenu

3.5.1 Volume de données

Par cette mission nous avons pu obtenir un volume total de données de l'ordre de 900 heures utiles pour la première saison, et 1200 heures pour la seconde. Etant données les fréquences d'échantillonnage choisies, cela représente une quantité d'information d'un total de plus de 800 Go, pour 400 fichiers environ.

3.5.2 Analyse généraliste d'un sous-échantillon

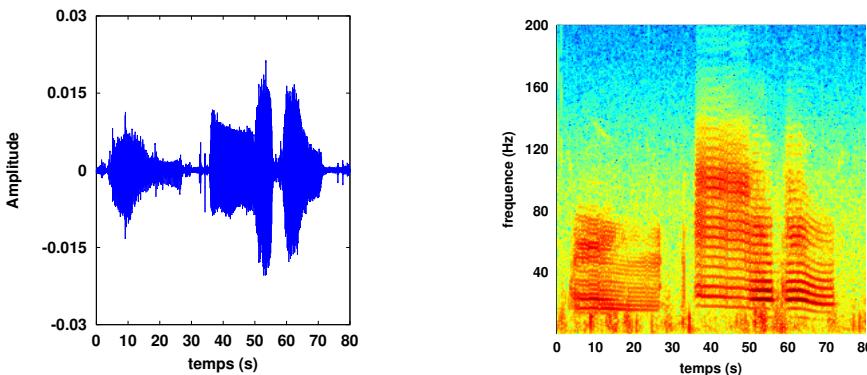


FIGURE 3.8 – Chant caractéristique de la baleine bleue du Pacifique sud-est en forme d'onde (à gauche) et en représentation temps-fréquence, avec une FFT de 2^{16} points, fenêtre Blackman et chevauchement de 75% (à droite).

Indépendamment d'analyses plus systématiques dédiées à l'un ou l'autre des signaux identifiés, nous avons mené une analyse généraliste sur des sous-échantillons de ces données, de façon à identifier le type d'information que notre corpus est susceptible de fournir. Nous identifions huit types de sons associés à quatre espèces, plus des sons anthropiques associés aux bateaux. De nombreux sons non-identifiés mais remarquables sont récurrents, ils ont également été relevés dans notre analyse généraliste dans l'espoir d'une identification ultérieure. En particulier, nous avons mené (et continuons de le faire) des missions de terrain pour enregistrer spécifiquement certaines espèces résidentes (le grand dauphin *Tursiops truncatus*, l'otarie à fourrure australe *Arctocephalus australis*) de façon à voir si de nouveaux sons pouvaient être identifiés et analysés sur nos données. La liste des sons stéréotypés que nous avons identifiés et affectés à une espèce, en collaboration avec des experts internationaux spécialistes de ces espèces, est décrite ci-dessous.

- Le chant caractéristique de la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*) du pacifique sud-est identifié et validé par Susannah Buchan (de l'université de Concepción) sur la base d'études faites dans le golfe de Corcovado [15]. Il est représenté dans la figure 3.8. Ce chant, très structuré et très riche, est l'objet de nos études présentées dans le chapitre 4 .

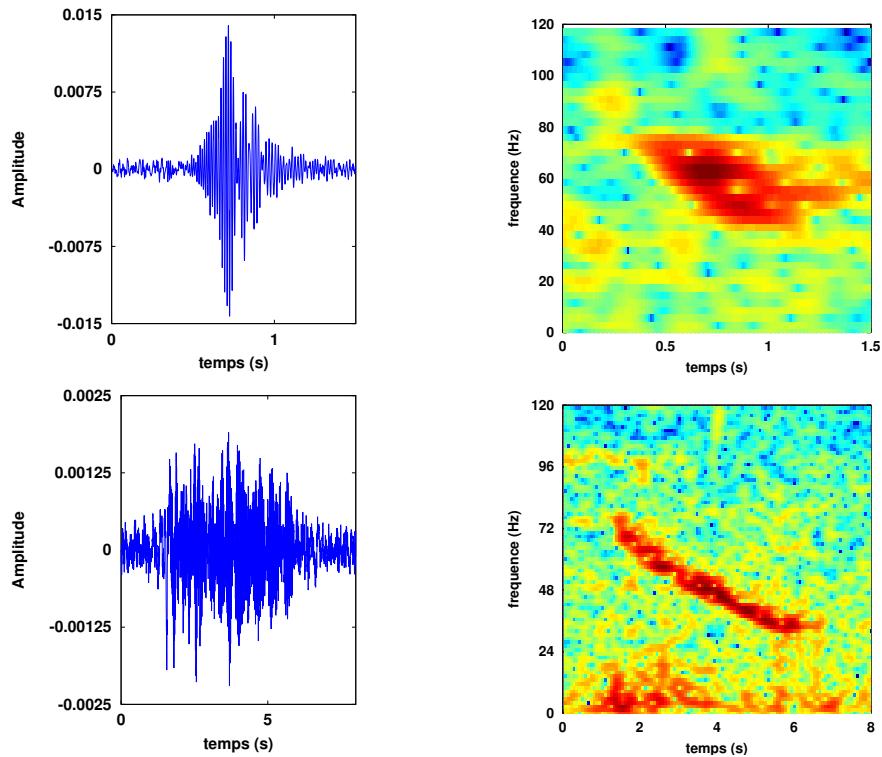


FIGURE 3.9 – Première ligne : downsweps, attribués aux rorquals communs, en forme d'onde et en temps-fréquence (avec une FFT de 2^{11} points, fenêtre Blackman et chevauchement de 90%). Deuxième ligne : D-calls, attribués aux baleines bleues, en forme d'onde et en temps-fréquence (avec une FFT de 2^{11} points, fenêtre Blackman et chevauchement de 90%).

- Les sons modulés en fréquence descendante, ou 'downsweep', attribués par les experts aux grands rorquals. On remarque deux types, probablement séparables mais proches, selon qu'il s'agit du rorqual commun (le son, d'une durée d'une demi seconde en moyenne, sera noté 'downsweep') ou de la baleine bleue (le son, d'une durée d'environ cinq secondes, est

noté 'D call'). Les références sur lesquelles sont basées ces identifications sont Watkins 1981 [154], Stafford et al. 1999 [135] et Oleson et al. 2007 [98]. Dans les enregistrements réalisés à Chañaral, les downsweeps sont beaucoup plus fréquents (il y a très peu de fichiers de 3h où ils ne sont pas présents). Les D-calls se rencontrent peu dans nos enregistrements mais sont présents en général sous la forme d'une série d'une dizaine de sons, émis à intervalles réguliers sur une durée de plus d'une minute, de façon similaire à ce qui est décrit dans Stafford et al. 1999 [135].

- Des vocalisations de grand dauphin (*Tursiops truncatus*), très diversifiées, composées de siflements, de clics d'écholocation, de trains de clics et de sons brefs à basse fréquence ont été identifiées grâce à des mesures in situ avec un hydrophone mobile. Ces vocalisations sont très cohérentes avec les vocalisations de grand dauphins décrites dans la littérature (voir Lilly 1962 [74], Tyack 1986 [146], King et Janik 2015 [61] et Eskelinen et al. 2016[39]). Toutefois, les séries de sons brefs à basse fréquence, qui ont une fréquence de pulsation d'environ 2 Hz (voir figure 3.10en bas à droite) et une fréquence centrale autour de 1 kHz, ne semblent pas très connues et peu de références sont disponibles sur ce sujet (voir néanmoins Schultz et al. 1995 [125] et Gridley et al. 2015 [53]). Ils sont au centre du rapport placé en annexe sur la localisation avec un hydrophone fantôme (voir annexe B). La richesse de production vocale du grand dauphin est remarquable, ainsi que la diversité de trains de clics qu'il est capable de produire, en terme de fréquences (voir les trois séries de la figure 3.10).

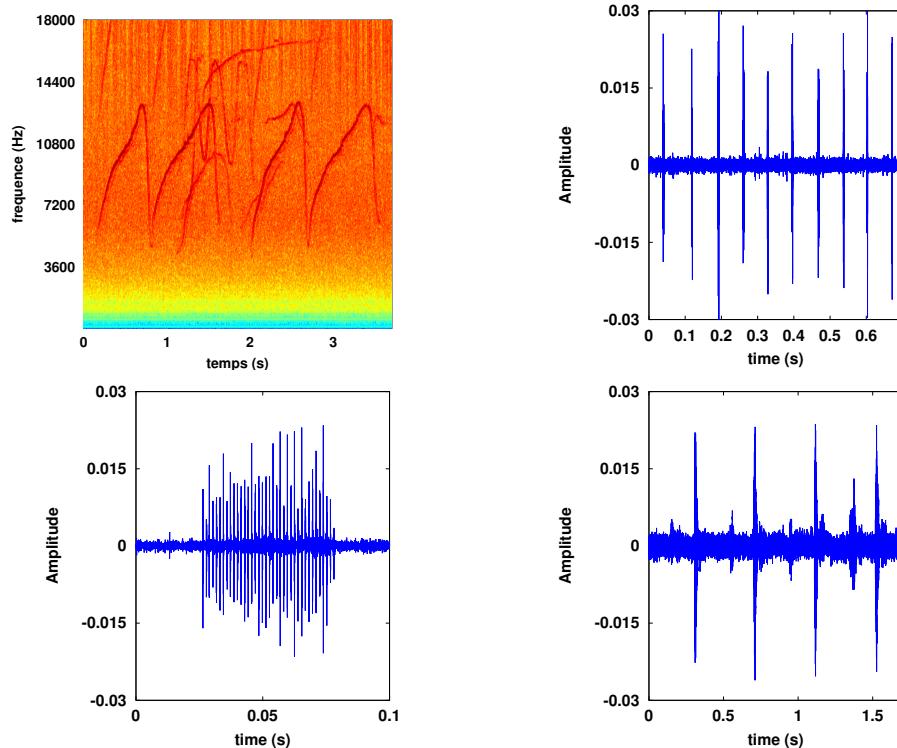


FIGURE 3.10 – Première ligne : à gauche, siflements caractéristiques de grands dauphins en représentation temps-fréquence, avec une FFT de 2^{10} points, une fenêtre Blackman et un chevauchement de 80% ; à droite, une série de clics d'écholocation représentés en forme d'onde. Deuxième ligne : à gauche, burst de clics représenté en forme d'onde ; à droite, sons brefs basse fréquence.

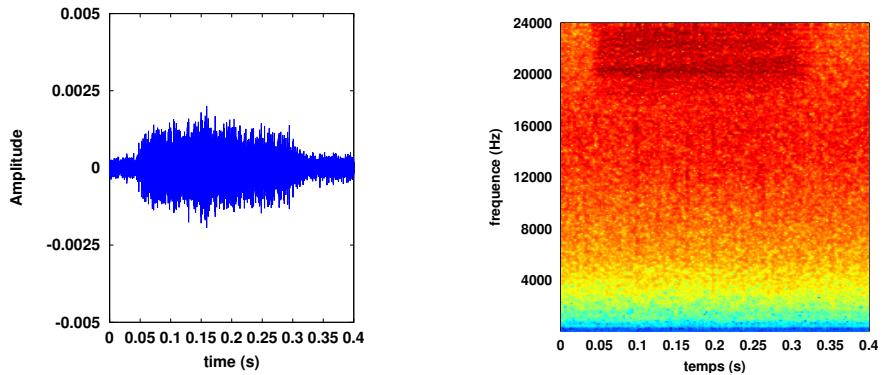


FIGURE 3.11 – Un burst de dauphins obscurs (en forme d’onde et en temps-fréquence avec une FFT de 2^9 points, fenêtre Blackman et chevauchement de 80%)

- Des bursts de clics de dauphins obscurs (*Lagenorhynchus obscurus*) ont été enregistrés en petit nombre. Ils ont été identifiés avec le concours d’Elena Schall (de l’institut Alfred Wegener de Bremerhaven), familière de ces espèces sur les côtes de Nouvelle Zélande. Cette espèce est régulièrement vue près de l’île Chañaral par les scientifiques, les pêcheurs et opérateurs touristiques. Les bursts de clics de cette espèce sont assez ressemblants à ceux des grands dauphins mais un peu plus haute fréquence et l’absence de sifflements et de clics d’écholocalisation concomitants est caractéristique des dauphins obscurs.

Le graphique 3.12 permet d’apprécier la fréquence d’apparition des plus communs parmi ces différents sons dans le sous-échantillon de données analysé.

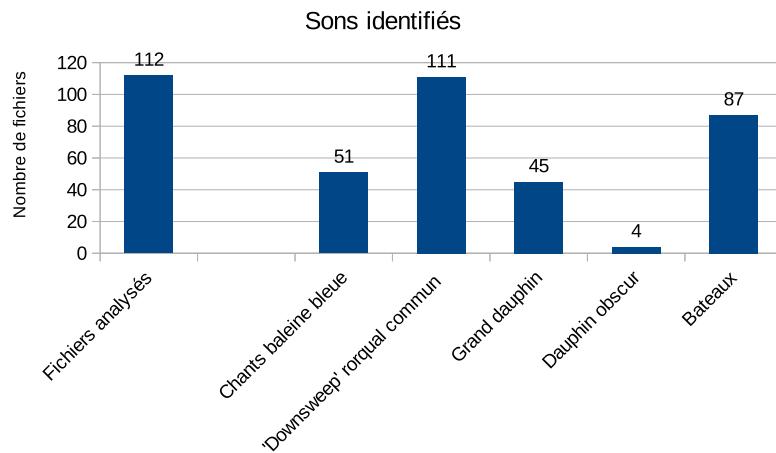


FIGURE 3.12 – Principaux sons identifiés dans le sous-échantillon des données analysé de façon généraliste (sans chercher un signal particulier), en nombre de fichiers incluant un tel son. Chaque fichier représente 3h d’enregistrement.

3.5.3 Un signal non biologique : les explosions sous-marines

La partie précédente montre l'importance des signaux biologiques relevés dans notre corpus. Cependant, celui-ci est également riche en signaux non-biologiques, et en particulier en signaux de type anthropique, révélés par notre analyse généraliste. Il s'agit en général des signatures des divers bateaux présents sur la zone. Ces données peuvent être intéressantes, notamment dans le cadre de l'étude de Sepúlveda et al. 2017 [127]. Il est cependant un type de signaux très particulier que nous ne nous attendions pas à découvrir dans nos données : des signaux brefs et intenses, de type explosion sous-marine. Nous présentons rapidement dans cette partie notre étude de ces signaux, par la synthèse d'un rapport de recherche transmis à la Sernapesca en 2017 (voir annexe A et une publication lors du congrès DCLDE [78]).

Parmi les signaux découverts lors de l'analyse généraliste d'un sous-échantillon des données présentée dans la partie 3.5.2 nous avons remarqué des impulsions extrêmement fortes, dont la plupart saturent le récepteur (un exemple est montré sur la figure 3.13). Ces impulsions reviennent de façon régulière pendant une dizaine de jours, toujours le matin entre 6h et 9h heure locale. Elles sont parfois groupées (8 le même jour le 17/01/2017) et parfois isolées. On totalise 28 détections réparties en 9 jours fin janvier - début février, ce qui correspond au plein été austral et à la saison où les baleines visitent la zone (voir tableau 3.1).

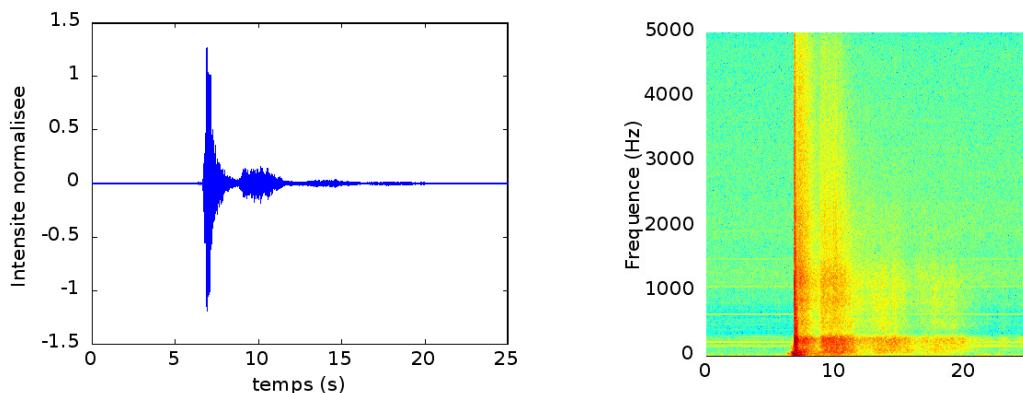


FIGURE 3.13 – Représentation temporelle (à gauche) et en temps-fréquence d'un signal de type explosion sous-marine relevé dans nos données.

Les signaux ont rapidement été identifiés à l'oreille comme des explosions, mais nous avons mené des études plus précises pour connaître leur origine. En effet, plusieurs sources pouvaient être imaginées : exercices militaires, pêche illégale, ou même des bruits produits à terre et transmis à l'eau par la roche. Pour notre analyse, nous nous sommes basés sur les travaux de Mitchell et al, 1976 [89]. Ceux-ci montrent que pour une explosion sous-marine, une bulle de gaz est formée qui présente des oscillations (la bulle se dilate, puis se rétracte successivement, formant des ondes mécaniques caractéristiques qui se propagent dans le milieu). Nous avons pu retrouver ces oscillations dans celles des explosions qui n'étaient pas saturées. Ces oscillations ne sont pas présentes pour des explosions en milieu solide, ce qui permet d'écartier cette hypothèse. De plus, l'équipe de surveillance présente sur l'île n'a perçu aucun bruit durant cette période de temps, ce qui confirme l'hypothèse d'explosions sous-marines.

L'étude de Prior 2010 [115] relie les durées entre les oscillations de bulles et deux paramètres principaux de l'explosion : d'une part la charge utilisée (c'est-à-dire la puissance de l'explosion, exprimée en équivalent TNT) et d'autre part la profondeur à laquelle a lieu l'explosion. Lorsqu'il

TABLE 3.1 – Dates des explosions repérées dans les données acoustiques.

Date	Heure	Saturé (oui / non)	Date	Heure	Saturé (oui / non)
17/01/2017	6 :08	non	26/01/2017	7 :56	oui
	6 :13	non		7 :57	oui
	6 :14	non		7 :09	oui
	6 :18	non		7 :10	non
	6 :41	non		7 :11	oui
	6 :43	non		8 :22	oui
	7 :47	oui		8 :23	non
	9 :21	oui		04/02/2017	8 :11
	8 :23	oui		05/02/2017	7 :45
	24/01/2017	7 :08		8 :08	oui
24/01/2017	7 :54	oui	13/02/2017	8 :06	non
	8 :55	non			
	7 :21	oui			
25/01/2017	7 :37	oui			
	7 :46	oui			
	8 :27	oui			
	8 :53	oui			

est possible de mesurer deux durées (c'est-à-dire lorsque trois oscillations sont identifiables et mesurables dans le temps) une formule empirique permet de lever l'indétermination entre ces deux paramètres. Cette formule ainsi que les calculs que nous avons effectués sont détaillés dans le rapport présenté en Annexe A. Les résultats des calculs sont présentés dans la table 3.14.

On constate que nos mesures sont cohérentes avec des résultats établis dans la littérature spécialisée. Ils pointent vers des charges relativement faibles (environ 0,3 kg d'équivalent TNT) et des profondeurs moyennes entre 15 et 20 mètres.

Lorsque nous croisons ces résultats avec les heures auxquelles ont été détectées les explosions, nous voyons que l'étude est hautement compatible avec de la pêche illégale. Des discussions informelles avec les institutions (IFOP, Sernapesca) et les acteurs (résidents, pêcheurs) locaux confirment que l'utilisation illégale de la dynamite par des pêcheurs a déjà été signalée, même si la plupart de nos interlocuteurs considèrent cette pratique comme obsolète et ont été surpris de nos conclusions. La dynamite est utilisée parfois pour tuer les poissons en espérant qu'ils flottent, et souvent également pour tuer, blesser ou écarter les otaries, qui viennent prélever des poissons dans les appâts ou les filets des pêcheurs. Ce rapport a été transmis à la Sernapesca, organe habilité à sanctionner les actes illégaux en mer et chargé de la gestion des réserves marines. Les actions suivantes ont été menées suite à notre rapport :

- une recherche, via AIS et les services de la Sernapesca, des embarcations de plus de 11 mètres présentes sur les lieux les jours d'explosions. Ces recherches n'ont pas abouti, ce qui conduit à penser que l'embarcation était relativement petite, ou bien que son transmetteur AIS a été sciemment coupée à l'heure d'accomplir une pêche manifestement illégale,
- une diffusion des résultats auprès de la population locale, pour sensibiliser les habitants au problème des nuisances acoustiques générées par les explosions. Des séances d'écoute des signaux ont été organisées, et nous avons souligné les dangers que représentent de telles pratiques non seulement pour ceux les utilisent mais aussi pour les cétacés de la zone (source de revenu pour de nombreux habitants),
- des projets ont été déposés pour équiper la Sernapesca de récepteurs capables de détecter

Heure	T_1 (ms)	T_2 (ms)	T_2/T_1	z_1 (m)	w (kg TNT)
6h08	87,6	67,6	0,772	19.2	0.39
6h13	79,2	60,0	0,757	23.4	0.35
6h14	84,9	65,7	0,774	17.8	0.27
6h18	88,5	68,3	0,772	19.6	0.36
6h41	81,0	61,3	0,757	24.6	0.41
6h43	89,5	69,4	0,775	18.7	0.35

TABLE I. Effect of migration on the bubble pulse periods. The ratios of bubble pulse periods are listed for all the charge depths. The values derived by Slifko' using deep charges are given for comparison.

Depth (m)	T_2/T_1	T_3/T_1	T_3/T_2
23.5	0.76 ± 0.01	0.63 ± 0.01	0.83 ± 0.01
49.0	0.75 ± 0.01	0.62 ± 0.01	0.83 ± 0.01
99.6	0.72 ± 0.01	0.58 ± 0.01	0.81 ± 0.01
194.5	0.70 ± 0.01	0.56 ± 0.01	0.81 ± 0.01
Slifko	0.72	0.58	0.81

FIGURE 3.14 – Valeur des périodes d’oscillation de bulle des explosions non saturées enregistrées le 17 janvier 2017. On donne les valeurs de profondeur (z) et puissance w qui en découlent. Pour comparaison, la table de droite est un extrait d’expériences menées par Chapman 1985 [25].

en temps réel des explosions, favorisant ainsi le contrôle de la zone par les bateaux sur place.

Aucune explosion n’a été enregistrée pour notre deuxième saison, sans que l’on puisse savoir si nos efforts avaient porté leurs fruits ou si simplement les dates d’enregistrement ne coïncidaient pas avec la pêche illégale cette année-là.

3.6 Conclusion

L’expérience de terrain a été conçue et menée dans l’objectif de tester nos méthodes d’analyse de chants et de localisation. Néanmoins, nous avons été surpris par la richesse des données obtenues, due notamment au fait que cette expérience correspondait à une première sur la côte chilienne au nord du 40^{ème} parallèle sud. Le premier résultat fondamental est que nous avons effectivement enregistré des sons de baleine bleue, ce qui était le but de l’expérience. Mais l’analyse très généraliste et exploratoire menée dès réception des données a soulevé également plusieurs questions scientifiques que nous avons creusées en tant qu’équipe restreinte (Franck Malige, Hervé Glotin, Susannah Buchan).

Chapitre 4

Caractérisation du signal d'intérêt : le chant de la baleine bleue du sud est du Pacifique

Nous avons vu au chapitre précédent le corpus de données que nous avons pu recueillir grâce à notre installation d'un hydrophone fixe dans une zone extrêmement productive au nord du Chili. Parmi les données auxquelles un tel enregistrement large bande donne accès, nous nous intéressons particulièrement à celles qui sont émises par les plus grands des mammifères marins présents dans la zone, les baleines bleues (*Balaenoptera musculus*). Un type de voisement en particulier fera l'objet de notre étude : des sons relativement longs, stéréotypés et répétés appelés 'chants'. En effet, les caractéristiques particulières de ces chants les rendent d'un grand intérêt aussi bien au point de vue comportemental (dans quel cadre et par quels animaux sont-ils émis ?) que du point de vue signal (ces signaux très stéréotypés et codés invitent à des études plus fouillées de leurs propriétés).

Après avoir rappelé les connaissances actuelles sur les chants des grands rorquals et spécifiquement des baleines bleues (partie 4.1), nous présentons quelques résultats nouveaux obtenus grâce à notre corpus de données originales. En particulier, nous détaillons l'identification d'une vocalisation caractéristique de la baleine bleue du sud-est du Pacifique (partie 4.2). Ce chant présente des propriétés très spécifiques puisque c'est un chant pulsé, très basse fréquence, constitué d'une seule phrase répétée pendant des heures. Une étude détaillée de ces caractéristiques et de leur importance pour la classification et la mesure est présentée dans la partie 4.3.

Après la partie de contextualisation, ce chapitre ainsi que le suivant sont présentés sous la forme d'une série d'articles, soumis ou acceptés, qui sont des jalons pour la compréhension de notre signal test. Pour chacun, nous proposons une synthèse en français, suivie de l'article dans sa dernière version.

4.1 Une vocalisation très spécifique : les chants des baleines bleues

Comme nous rappelions dans l'introduction de ce manuscrit, les cétacés sont des animaux vocaux, pour lequel le signal sonore joue un rôle probablement très important aussi bien dans le comportement social que pour les déplacements ou la recherche de nourriture et l'évitement de prédateurs. Les mysticètes ne font pas exception à cette règle. Ils émettent essentiellement des sons

basses fréquences (normalement inférieures à quelques kilohertz) assimilés à des voisements, par opposition aux claquements ou 'clics' émis par les odontocètes, qui ont notamment pour fonction l'écholocation de proies. En effet, les mysticètes, ou cétacés à fanons, sont caractérisés par des techniques de chasse qui n'incluent pas de poursuite nécessitant la localisation précise d'un individu. Au contraire, les proies sont petites et caractérisées par de grandes concentrations, masses relativement peu mobiles et faciles à repérer à faible distance.

4.1.1 Le chant chez les rorquals

La famille des rorquals (*Balaenopteridae sp.*) présente en particulier un répertoire vocal voisé qui peut être séparé en deux grands types d'émissions sonores (voir par exemple Širović et al. 2013 [160] pour le cas du rorqual commun). D'une part, on distingue des signaux basse fréquence (en général de l'ordre de 100 Hz), relativement courts (de une à cinq secondes), modulés en fréquence par une courbe décroissante. Ces signaux sont souvent regroupés sous le terme générique de 'downsweep' en anglais, ou balayage descendant, et ont été décrits pour divers membres du genre *Balaenoptera* qui comprend les rorquals 'vrais' (seule la baleine à bosse *Magaptera novaeangliae* en est exclue). Ces sons émis par diverses espèces sont remarquablement proches et difficiles à distinguer (Ou et al. 2015 [100]). Ce type de son, que nous avons identifié dans notre corpus (voir partie 3.5.2), n'est pas celui qui nous intéressera ici.

Le deuxième type de vocalisation des rorquals, et celui qui a été le plus étudié, se présente sous la forme de signaux hautement stéréotypés, répétés selon des rythmes et des agencements plus ou moins complexes et caractéristiques du groupe social auquel appartient l'individu. Étudiés depuis les années 70 (voir notamment l'article pionnier sur les chants de baleines à bosse de Payne en 1971 [110]), ces chants sont maintenant décrits en détail pour la plupart des espèces. Il semblerait qu'ils soient émis spécifiquement par les mâles (voir Winn et Winn, 1978 [156] pour les baleines à bosse, ou Croll et al. 2002 [30] pour les rorquals communs), ce qui implique qu'ils soient liés aux comportements reproducteurs. En ce qui concerne les lieux où les chants peuvent être entendus, on considère que la plupart des rorquals présentent une répartition variable avec les saisons, en général associée au comportement reproducteur. Le schéma général comprend une saison (plutôt l'été) dédiée spécifiquement à l'alimentation en eaux froides et une saison (plutôt l'hiver) dédiée à la reproduction, en eaux tempérées ou chaudes, possiblement dans des lieux un peu abrités contre les prédateurs (grands requins, orques) (voir Mackintosh 1996 [77]).

4.1.2 Variations locales des chants de baleines bleues

En ce qui concerne les baleines bleues, espèce qui nous intéresse plus spécifiquement ici, les deux types de vocalisation ont été décrits. La baleine bleue est cependant une espèce généralement pélagique et discrète, ce qui rend assez complexe l'étude de ses comportements. Par ailleurs, le nombre d'individus a été drastiquement diminué au cours du XXème siècle ce qui accentue les difficultés. De fait, on ne sait pas si les baleines bleues utilisent des zones privilégiées pour l'accouplement ou l'élevage des nouveau-nés et aucune mise bas n'a pour l'heure été observée (voir 'Handbook of the mammals of the world', Wilson 2014 [155]). Au moins une étude semble confirmer que les chants sont émis uniquement par les mâles (Oleson 2007 [98]), mais les chants étant entendus dans différents contextes il est difficile de les lier à une zone de reproduction spécifique.

Ces chants sont en général constitués de sons relativement longs (quelques secondes à quelques dizaines de secondes), très basse fréquence (pic d'énergie en général autour de 20 à 30 Hz, parfois un peu plus haut) et une très forte intensité. La puissance émise est en général mesurée entre 179 dB ref 1 μ Pa @1m (voir les définitions des niveaux sonores et leurs unités dans le chapitre 2) et 189 dB ref 1 μ Pa @1m respectivement par Samaran et al. 2010 [124] et Širović et al. 2007 [159]. Une

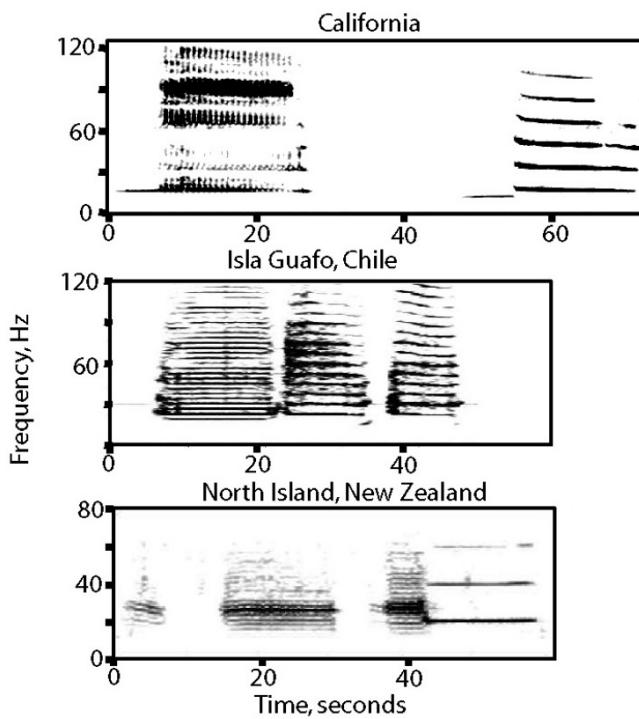


FIGURE 4.1 – Exemples de chants de baleines bleues dans l'océan Pacifique, tiré de Mc Donald et al. 2006 [84]. Dans chaque cas, une 'phrase', constituée de plusieurs 'unités' est représentée. Cette phrase est en général répétée à l'identique, à intervalles régulier, pendant des heures. En haut, un exemple du chant caractéristique du nord est du Pacifique, enregistré en juin 2001 en Californie. Au milieu, un chant enregistré dans le sud est du Pacifique (Chili) en 1971 par Cummings et Thompson [32]. En bas, un chant enregistré dans le sud ouest du Pacifique, en Nouvelle Zélande, en 1997.

'phrase' pouvant être constituée de plusieurs 'unités' est répétée à l'identique, selon des intervalles de l'ordre de la minute ou plus.

Dans une étude de référence, Mc Donald et al. 2006 [84] montrent que ces chants peuvent être classés en une dizaine de classes, caractéristiques pour chacune d'une population particulière. Trois exemples tirés de cet auteur sont présentés en figure 4.1. Quelques chants ont été rajoutés depuis (voir notamment Cerchio et al., 2010 [24]) sans en modifier le paysage général (voir par exemple dans l'hémisphère sud Širović et al. 2017 [158]). La carte célèbre publiée par McDonald et al. (et présentée sur la figure 4.2) montre une répartition spatiale de groupes de baleines bleues 'culturellement' définis. Les domaines de certains de ces groupes peuvent se chevaucher, et notamment lorsque l'on considère les déplacements saisonniers des animaux. Cependant, les groupes montrent une grande homogénéité acoustique, chaque groupe reproduisant de façon fidèle et très stéréotypée son propre chant caractéristique, ce qui permet de les différencier (voir récemment l'étude de Balcazar et al. 2017 au sud de l'Australie [9]). De fait, le groupe acoustique correspondant à la baleine bleue antarctique correspond actuellement à une sous-espèce reconnue, *Balaenoptera musculus intermedia*.

En ce qui concerne les côtes chiliennes, seul le sud du Chili, et notamment le golfe de Corcovado

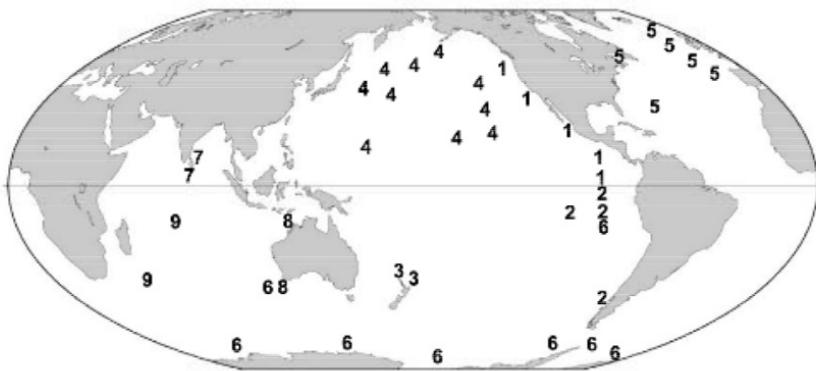


FIGURE 4.2 – Carte des différents chants de baleines bleues dans le monde, reproduite de McDonald et al. 2006 [84].

et les environs de l'archipel de Chiloé ont fait l'objet d'études d'acoustique passive. Un chant spécifique nouveau y a été récemment décrit par Buchan et al. 2014 [15], se superposant à la catégorie '2' du classement de McDonald et al. 2006 ([84]) et classé comme '2B' par Širović et al. 2017 [158]. Dans la partie nord de la côte, des baleines bleues sont visuellement repérées et étudiées chaque année mais aucune étude acoustique n'avait permis jusque là d'identifier leur appartenance en terme de groupe de chant.

4.2 Identification du chant de la baleine bleue 'chilienne'

Nous présentons ici un article soumis comme note à *Marine Mammals Science*.

4.2.1 Résumé

Les baleines bleues (*Balaenoptera musculus*) émettent essentiellement deux types de vocalisations, dont la plus étudiée, le 'chant' a une structure répétitive, très stéréotypée, et présente une variation géographique en une dizaine de 'clans' (voir Mc Donald et al. 2006 [84]). En 2014, un nouveau type de chant a été décrit pour la zone sud-est de l'océan Pacifique, c'est-à-dire essentiellement les côtes et îles chiliennes de la Patagonie (au sud du 40^{ème} sud).

Nos données ont permis de localiser ce chant dans la zone nord du Chili. La zone dite 'archipel de Humboldt', une aire marine d'une centaine de kilomètres de côté comprenant la réserve marine Isla Chañaral ainsi que d'autres îles voisines et la zone côtière, est une zone de résurgence du courant de Humboldt (voir Thiel et al. 2007 [138]). Située sur le court plateau continental (quelques dizaines de milles nautiques de large) bordant la fosse de Nazca (de l'ordre de 6000 mètres de profondeur à cette latitude) cette zone de résurgence est extrêmement riche en formes de vie, allant des phytoplanctons aux plus grands mammifères (voir Toro et al. 2016 [142], Sepúlveda et al. 2017 [127]). La baleine bleue fait partie des espèces régulièrement observées en été autour de la réserve (voir aussi partie 3.3.1). Cependant, aucune étude n'avait jusque là permis d'identifier la population à laquelle appartiennent les individus observés. En particulier deux populations sont présentes en Patagonie chilienne : la population antarctique et la population 'chilienne'. Dans les travaux de Galletti et al. en 2017 [149], aucune des photo-identifications effectuées dans la zone de l'archipel

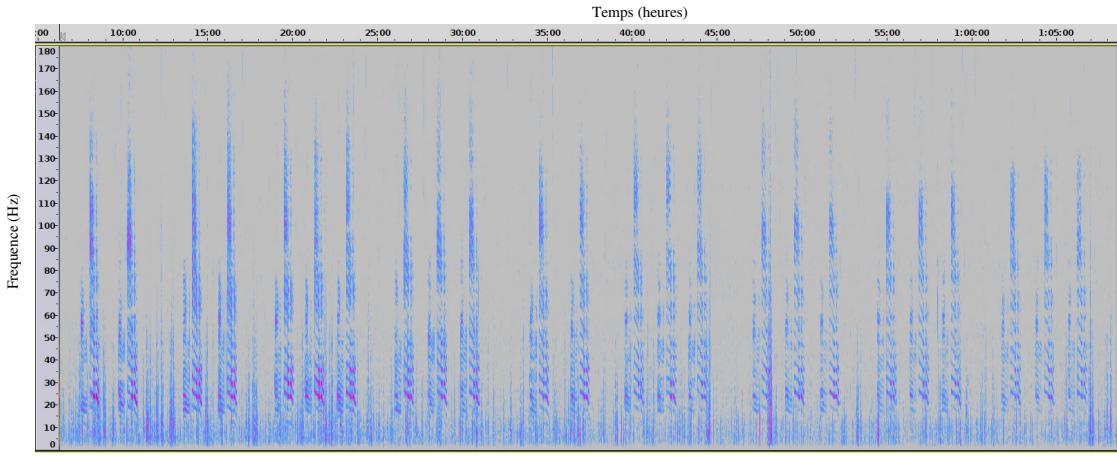


FIGURE 4.3 – Exemple de détection d'un chant de baleine bleue chilienne. On remarque la répétition de phrases (les détails d'une phrase sont illustrés figure 5.1). Extrait du 02/02/2017 visualisé par le logiciel libre Audacity.

de Humboldt en 2012 ne correspond aux catalogues de baleines 'chlénnes' établi vers l'archipel de Chiloé, en Patagonie, entre 2004 et 2012.

L'examen systématique de nos données (saison 2017) a montré d'une part que les chants 'chlénns' (ou SEP, pour South East Pacific) y sont quotidiens, et d'autre part qu'aucun chant 'antarctique' n'y a été découvert. Les résultats de l'analyse systématique des données par notre collègue Gisela Alosilla sont représentés sur la figure 4.4.

Ce résultat est intéressant parce que les données sur les déplacements des baleines bleues sont relativement rares (voir notre poster aux congrès Marine Mammals 2017 [14]). La population de baleines bleues associée aux chants 'SEP2' apparaît donc comme effectivement très liée aux zones marines chiliennes de latitude modérée. Son chant a également été entendu toute l'année vers l'archipel Juan Fernandez et, en hiver austral, proche des Galapagos, dessinant un possible schéma de migration de cette population.

Enfin, cette découverte renforce la nécessité de préservation de cette zone marine exceptionnelle que constitue l'archipel de Humboldt, puisqu'il abrite une espèce en danger d'extinction, et étroitement reliée à l'écosystème chilien.

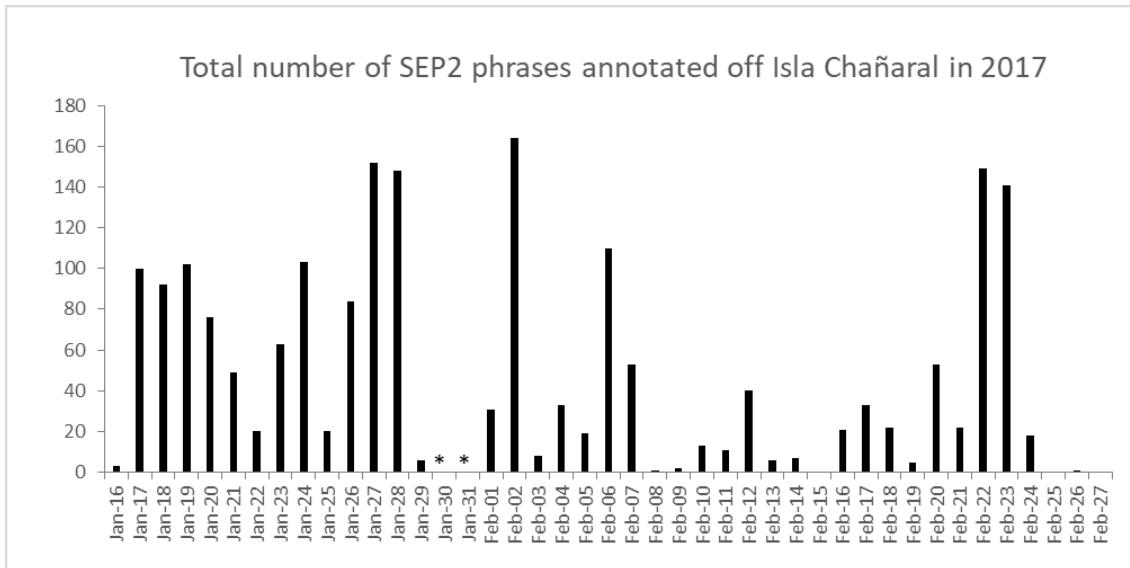


FIGURE 4.4 – Nombre total d’unités de chant SEP2 détectées lors de la première saison, par jour d’enregistrement. Détection visuelle sur spectrogramme par une experte. Les 30 et 31 janvier le dispositif était en maintenance. Les 16 et 29 janvier, les 1^{er}, 13, 14 et 27 février correspondent aux jours de mise en place de l’instrument et l’enregistrement est donc partiel.

4.2.2 Contribution des différents auteurs

Cet article a pour premier objectif de faire connaître à la communauté scientifique la découverte d’un chant spécifique de baleine bleue dans un lieu où il n’avait pas encore été identifié. Il est naturellement lié à l’obtention de notre corpus de données, corpus obtenu grâce aux efforts regroupés de tous les co-auteurs (exceptées Giselle Alosilla et Naysa Balcazar-Cabrera qui nous ont rejoint plus tard). Un travail soigné d’analyse manuelle a été menée par Giselle Alosilla sous la supervision et la direction de Naysa Balcazar-Cabrera. La base de données chiffrée a donc été mise au point par ces deux autrices. Un travail de correction, vérification et méta-analyse a suivi, mené essentiellement par Julie Patris. La rédaction est essentiellement le fait de Susannah Buchan, Julie Patris et Franck Malige, avec relecture et corrections de la part de Hervé Glotin et Naysa Balcazar.

La contribution des auteurs peut donc être résumée de la façon suivante :

- Julie Patris : mise en place du corpus de données, méta-analyse, rédaction
- Susannah Buchan : mise en place du corpus de données, coordination de l’équipe, rédaction
- Giselle Alosilla : analyse des données
- Naysa Balcazar-Cabrera : analyse des données, relecture
- Franck Malige : mise en place du corpus de données, rédaction
- Hervé Glotin : mise en place du corpus de données, relecture

4.2.3 Article

Southeast Pacific blue whale song recorded off Isla Chañaral, Northern Chile

Authors: Julie Patris⁽¹⁾, Susannah J. Buchan^{*(3,4,5)}, Giselle Alosilla⁽²⁾, Naysa Balcazar-Cabrera⁽⁴⁾, Franck Malige⁽¹⁾, Hervé Glotin⁽¹⁾

1) AMU, Université de Toulon, CNRS, LIS, Marseille, DYNI team, France

2) Instituto de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile

3) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas, Coquimbo, Chile

4) Center for Oceanographic Research COPAS Sur-Austral, University of Concepción, Concepción, Chile

5) Woods Hole Oceanographic Institution, Biology Department, Woods Hole, Massachusetts

*** Correspondance**

Email : sjbuchan@gmail.com

*** KEYWORDS : blue whale, migration, songs, Southeast Pacific**

*** Text :**

Determining the distribution and seasonal movements of baleen whales is fundamental to develop conservation strategies and marine spatial planning that ensure their continued protection (e.g. Redfern et al. 2017). Passive Acoustic Monitoring (PAM) is a useful and widely used method for monitoring cetaceans (e.g. Mellinger et al. 2007, Van Parijs et al. 2009). Furthermore, the loud, repetitive, low-frequency songs of baleen whales make these animals particularly good candidates for acoustically determining their occurrence and in turn distribution (e.g., Stafford et al. 1999 a,b, Cerchio et al. 2001, Širović et al 2009, Buchan et al. 2015). Endangered blue whales (*Balaenoptera musculus*) produce distinct song types recorded in different oceanic regions with largely distinct spatial and temporal distributions (e.g., McDonald et al. 2006 and references therein, Stafford et al. 2011, Samaran et al. 2013, Buchan et al. 2014, 2015, Balcazar et al. 2017). Song in blue whales is assumed to serve some reproductive function as it is known to be produced only by males (Oleson et al. 2007a), and is produced throughout their migratory range (Stafford et al. 1999a, 2001). Blue whale song remains relatively stable over time although there is some intra-annual variation in song production (Oleson et al. 2007b) and a decrease in the frequency of tonal song components has been reported over decadal timescales (McDonald et al. 2009, Gavrilov et al. 2012). Therefore, PAM offers a very useful method to monitor the distribution of blue whale acoustic groups worldwide.

The predominant song type of Southeast Pacific blue whales known as the Southeast Pacific 2, (SEP2) (Buchan et al. 2014) has been recorded in Chilean Patagonia (Buchan et al. 2014, 2015), off Juan Fernandez (Truong et al. 2016), and in the eastern Tropical Pacific (Stafford et al. 1999b, Buchan et al. 2015). This acoustic presence supports a migratory range for this group between Chilean Patagonia and the eastern Tropical Pacific. This migratory range is also supported by genetics (Torres-Florez et al. 2014), photo-identification (Torres-Florez et al. 2015) and studies using satellite tags (Hucke-Gaete 2018). Placed within the migratory corridor of south Pacific blue whales, Chañaral Island is part of the Humboldt Archipelago, a series of coastal islands within the productive Humboldt Current System (HCS, Thiel et al. 2007). The waters surrounding Isla Chañaral, which lie 3.5 nautical miles from the mainland, is a known summer feeding ground primarily for fin whales (*Balaenoptera physalus*) (Pérez-Álvarez et al. 2006, Toro et al. 2016, Sepúlveda et al. 2017, 2018), but blue whales, humpback whales (*Megaptera novaeangliae*), sei whales (*Balaenoptera borealis*) and minke whales (*Balaenoptera bonaerensis*) have also been

sighted (Capella et al. 1999, Sepúlveda pers. comm.).

The full distribution of SEP2 throughout the Southeast Pacific is still relatively unknown given the limited coverage of PAM in this region. Although SEP2 has been reported off Southern Chile, its presence off Northern Chile is unknown, although blue whales are sighted during summer off Isla Chañaral in Northern Chile (Buchan et al. unpublished). In effect, the links between the blue whales reported off Isla Chañaral and Isla Chiloe (Southern Chile) are unclear: Galletti et al. (2017) found that none of whales photo-identified off Isla Chañaral in 2012 matched with the photo catalogue established off Isla Chiloe between 2004 and 2012. Blue whales equipped with satellite tags in off Chiloe Island did travel north to central Chile, but none as far north as Isla Chañaral. In this study, we report the analysis of new PAM data from Northern Chile to examine the presence of SEP2 song in this zone.

Passive acoustic data were collected within the Isla Chañaral Channel, between the Isla Chañaral and the mainland, at 29°00'44" south and 71°31'26" west (Figure 1) during three periods of two weeks in January and February 2017 (see Patris et al. 2017 for details). The recording package 'BOMBYX II' was deployed between 15 and 20 meters below the surface on a mooring where maximum water column depth was 70 meters.

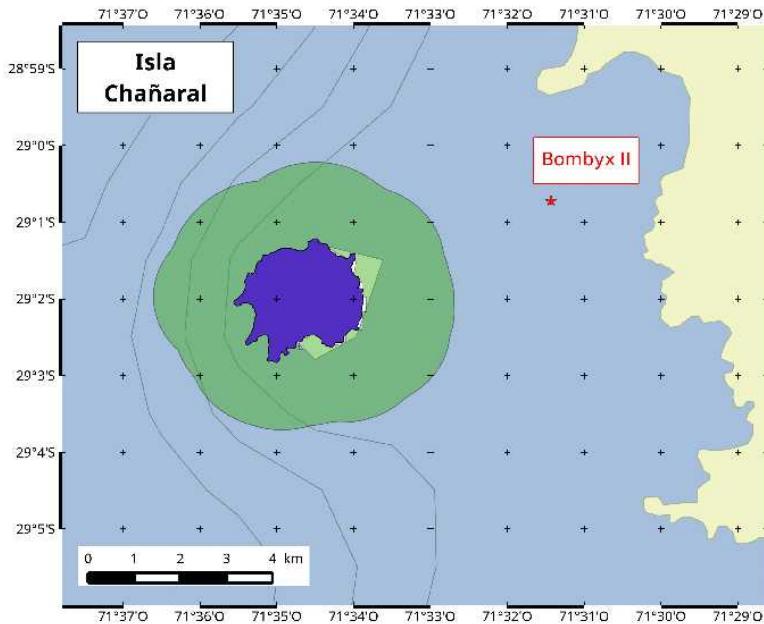


Figure 1 : Map of the deployment zone of BOMBYX II device (left). The green zone around the Island is a marine protected area (reserva marina Isla Chañaral). General location in South America (right).

This package was mounted by the University of Toulon and includes a Cetacean Research C57 hydrophone (very high sensibility, flat response down to 20 Hz, omnidirectional at frequencies less than 10 kHz), alimented by 9V and low-pass filtered ($C=47\mu F$, frequency cut 0.15 Hz) and a commercial SONY PCM-M10 recording device (gain 6, $R_{in} = 22$ kOhm) equipped with a 256 GB

memory card, set up in a specialized tube made by Osean able to resist high pressure. Recording was done at a sample rate of 48 kHz so as to record a vast diversity of cetaceans, ranging from large whales to dolphins, and at 16-bits, allowing for high sensibility without saturating the memory.

Data were analyzed manually by an experienced analyst for acoustic data recording made between the 16th of January and the 27th of February 2017. No data were recorded during the 30 and 31st of January and during the night between the 13 and 14th of february because of instrument redeployment. The SEP2 song phrases were identified based on their spectral description by Buchan et al. (2014). The SEP2 song, is made up of generally a four-unit phrase (A, B, C, D, see Fig. 3) lasting on average 60 s, that is repeated in long series lasting for hours. All of these units have a peak frequency around 25 Hz. Unit A has an average duration of 22 s, unit B of 13 s, unit C of 5 s and lastly unit D an average duration of 13 s. Usually, all units are not visible due to low signal to noise ratio (SNR) and units C and D contain most of the signal's energy. In this study SEP2 song phrases were annotated whenever at least units C and D were visible (Fig. 2). The SEP2 songs of Southeast Pacific blue whales were annotated manually i.e. a box was drawn around the C and D

units of the SEP2 song phrase, on the spectrogram visible in Raven Pro 1.5 (Bioacoustics Research Program, 2012). The following window parameters were used: 8192 FFT, 50% overlap, Hann window, with a Raven window set to view 60 Hz over 200 s (see Fig. 2). Herein, we refer to all phrases with at least C and D units as SEP2 song phrases. All annotated song phrases were compiled in a Raven Pro selection table.

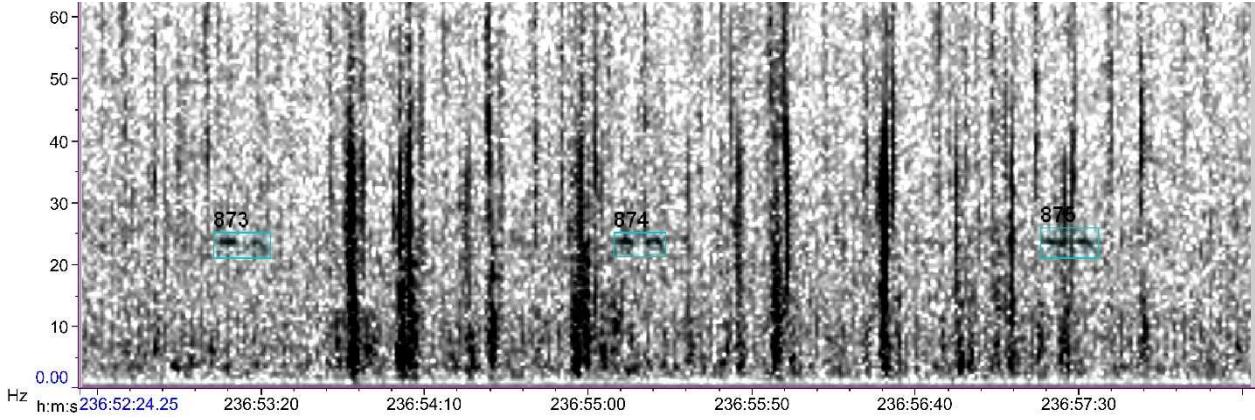


Figure 2 : Time-frequency of three phrases from a SEP2 song. Phrases annotated (boxed) have units C and D visible. (Raven Pro, 8192 points FFT, 50% overlap, Hann window).

A non-systematic double check of the data by another analyst showed that few phrases (with only unit B visible) were not counted by the first analyst (missed detections). Units C and D were not visible due to noise or propagation effects that mask low-frequencies. Another source of error came from the fact that units A and the pair C-D are sometimes confoundible (having similar characteristics in duration and peak frequency). Thus in some cases, unit A and the pair C-D of the same phrase were counted as two distinct occurrence of a phrase (false positive). As the second analysis was not systematic on all data, it served only to evaluate the importance of errors during the counting of the first analyst. Thanks to this double check, we estimate the error in counting SEP2 occurrences to be less than 3 %.

Blue whales' SEP2 song type was present in the data and is very similar to the description made in Buchan et al. 2014 (see figure 3). During the annotation process and former revisions of the data set, other vocalizations were found: blue whale's downsweeps, fin whales' (*Balaenoptera physalus*) vocalizations, bottlenose dolphins' (*Tursiops truncatus*) echolocation clicks, whistles and low-frequency vocalizations and dusky dolphin (*Lagenorhynchus obscurus*) burst of pulses. Data set can be obtained asking the authors.

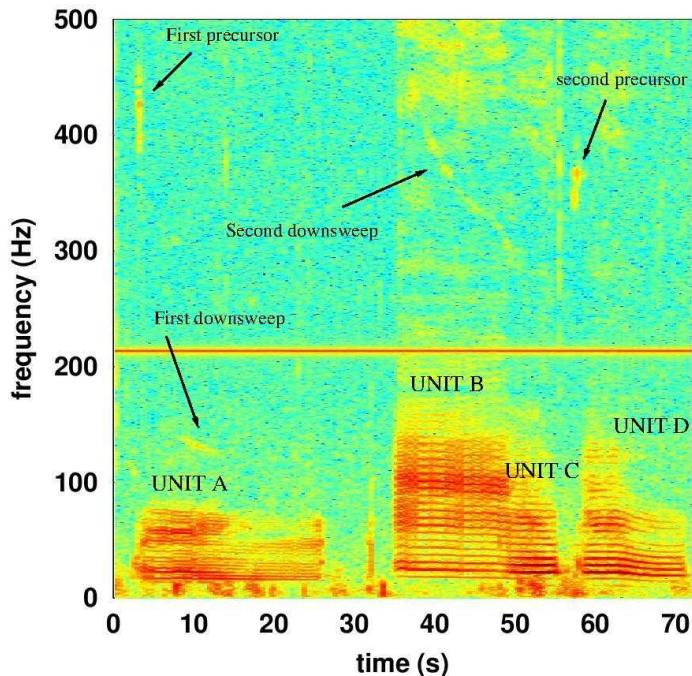


Figure 3 : Time frequency representation of a SEP2 song recorded off Isla Chañaral, the 2nd of february 2017 (Fast Fourier transform, Blackman window of 65536 points, overlapping 75%) using Octave software (Eaton et al. 2009). The line at 213 Hz is a constant electronic noise coming from the coupling between the hydrophone and the recording device. Units A,B,C,D are clearly visible as well as precursors and downsweeps belonging to the song.

A total of 913 h of acoustic recordings were analyzed, over which 1,981 SEP2 song phrases were identified, annotated and counted by the first analyst (Fig. 4). The SEP2 song phrases annotated were similar to those described previously (Buchan et al. 2010, 2014, 2015). As presented in these studies, we also noted the presence of two short high frequency precursors before units A (around 430 Hz) and D (around 350 Hz) (see Fig. 3). Two faint downsweeps are present in few high SNR phrases : in unit A (duration of five seconds from 150 Hz to 120 Hz) and in unit B (duration of twelve seconds from 450 Hz to 300 Hz) (see Fig. 3). No mechanism of sound production have been proposed to explain this superposition of two sounds, called two-voiced (Brown, 2008) and not frequent in other blue whale's song types (McDonald et al. 2006).

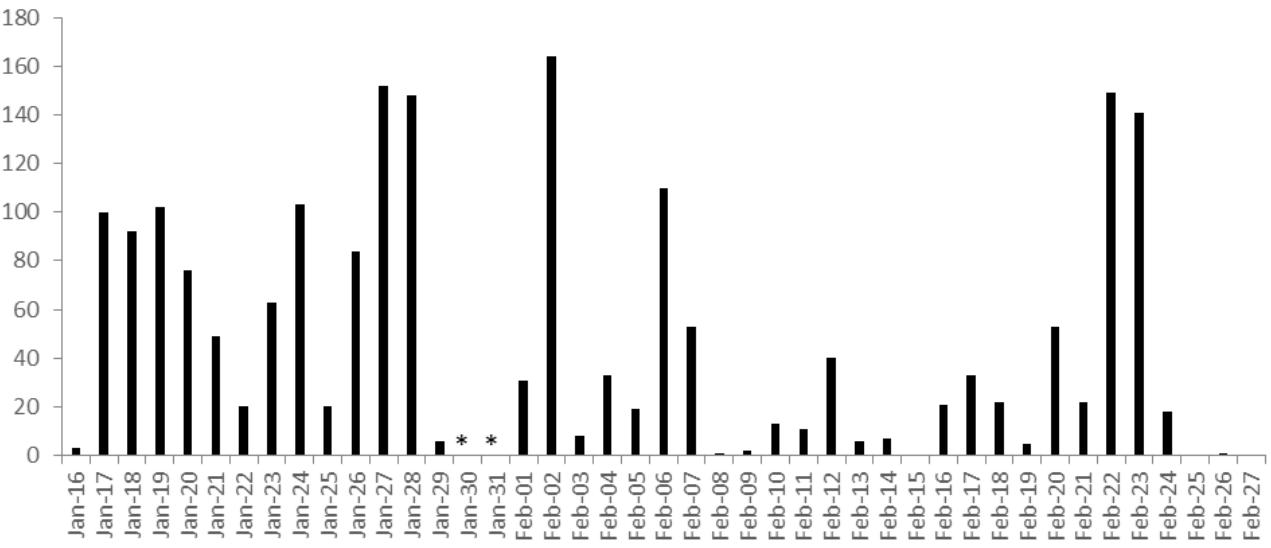


Figure 4 : Number of SEP2 phrases counted in the first season of recording, off Isla Chañaral. The device was off duty during the 30 and 31 of january (asterisks) and the night between the 13 and 14th of february.

There was no noticeable trend in the total number of SEP2 song phrases counted over the study period although, overall more phrases were counted in January (64 phrases/day in average) compared to February (36 phrases/day) (See Fig. 4). No significative difference was found between day and night in the number of phrases. Although this is a short period study, these results show low but consistent acoustic presence of Chilean blue whales throughout the months of January and February off Isla Chañaral.

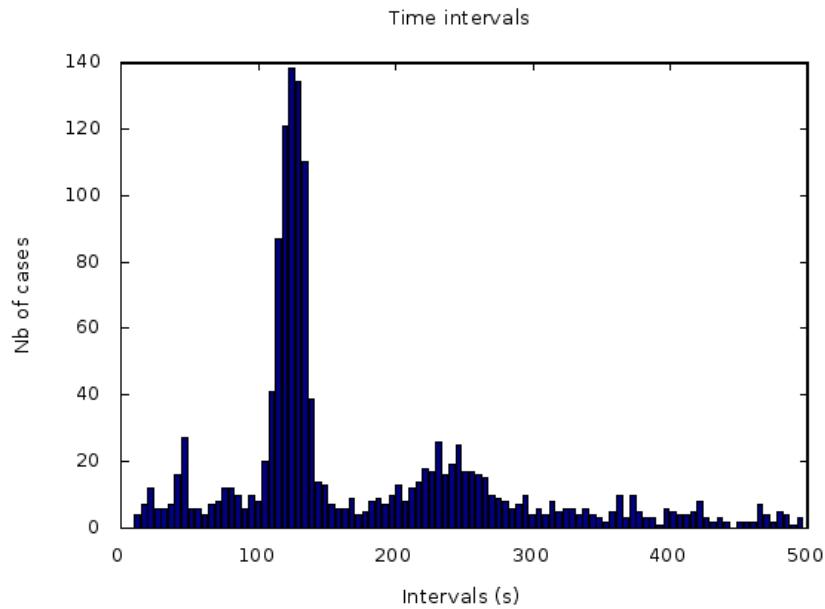


Figure 5 : Histogram of the time intervals between two occurrences of SEP2 phrases based on the Raven Pro selection table.

From the Raven Pro selection tables, we were also able to extract the time interval between SEP2 phrases. Duration between two beginnings of consecutive phrases were systematically measured and plotted in fig 5. The peaks at 2 and 4 min are characteristic of SEP2 individual song and are a hint that song bouts appear to be produced by single singers rather than multiple overlapping

singers. There is only one instance of song phrase overlap, indicating the presence of two singers, on the 28th of January, during the night. Acoustical data are consistent with sightings since only few animals have been seen at the same time off Isla Chañaral. A single blue whale performing circular diving and fluking, consistent with foraging behavior (Buchan and Quiñones, 2016), was observed by S. Buchan on the 15th, 16th, 17th and 23rd of February 2017 within the Chañaral Channel and to the South of Isla Chañaral. Sightings of two blue whales together were reported in January 2017 (and were observed by J. Patris, S. Buchan and F. Malige on the 16th of January) but the presence of several singers has not been assessed in these cases.

The number of phrases per day reported remains low compared to acoustic studies from Chilean Patagonia, where over one thousand SEP2 phrases were automatically detected per day between the months of March and May 2012–2013, which is thought to be the time of maximum abundance of animals in this region (Hucke-Gaete et al. 2003, Buchan et al. 2015, Galletti-Vernazzani et al. 2017). Since there is not yet year-round data off Isla Chañaral, it is impossible to compare seasonal trends in acoustic presence of Chilean blue whales at both sites. However, sighting data off Isla Chañaral (Sepulveda et al. 2017) and in Chilean Patagonia (Hucke-Gaete et al. 2013, Galletti-Vernazzani et al. 2017) still suggests much higher abundance in Chilean Patagonia, which is considered the primary feeding ground for Chilean blue whales. During visual inspection of the data set, no Antarctic blue whale song type (Ljungblad et al. 1998, Matsuoka et al. 2000) has been detected, although it has been recorded in the Chilean Patagonia (Buchan et al. 2018). No SEP1 blue whale's song type (Cummings and Thompson, 1971) has been detected in this data set. SEP1 has been recorded in Chilean Patagonia, off Juan Fernandez Archipelago and East Tropical Pacific (Cummings and Thompson, 1971, Truong et al. 2016, Stafford et al. 1999b) but is the least common of the two Southeast Pacific song types (Buchan et al. 2015, Saddler et al. 2017).

This is the first report of Southeast Pacific blue whale song off Northern Chile and the entire Humboldt Current System (HCS). Given the high levels of productivity of the HCS, and considering that Southeast Pacific blue whales are known to migrate along between wintering grounds near Galapagos and summer feeding grounds in Chilean Patagonia (Hucke-Gaete et al. 2003, 2010, 2018, Buchan et al. 2015, Torres-Florez et al. 2015, Buchan and Quinones 2016), it would make sense that some animals would take advantage of the available prey in the HCS. In particular, the dense patches of Humboldt Current krill (*Euphausia mucronata*) known to be exploited by fin whales off Isla Chañaral (Toro et al. 2016) would also offer foraging opportunities for blue whales that are on their way to or from their primary feeding ground in Chilean Patagonia.

Acknowledgments

The authors thank the research program BRILAM STIC AmSud 17-STIC-01. S.J.B. acknowledges support from the Center for Oceanographic Research COPAS Sur-Austral, CONICYT PIA PFB31, Biology Department of Woods Hole Oceanographic Institution, the Office of Naval Research Global (Award Nos. N62909-16-2214 and N00014-17-2606), and a grant to the Centro de Estudios Avanzados en Zonas Aridas (CEAZA) "Programa Regional CONICYT R16A10003". J.P and F.M. thank SABIOD MI CNRS, EADM MaDICS CNRS, and ANR-18-CE40-0014 SMILES for supporting this research. Finally, the authors thank very much Cesar Villaroel and all the divers of Explorasub diving center (Chile), Eutropia NGO (Chile) and the Agrupación turística Chañaral de Aceituno (Chile).

Litterature cited

Balcazar, N. E., H. Klinck, S. L. Nieuwirk, D. K. Mellinger, K. Klinck, R. P. Dziak and T. L. Rogers. 2017. Using calls as an indicator for Antarctic blue whale occurrence and distribution across the southwest Pacific and Southeast Indian Oceans. *Marine Mammal Science* 33:172–186.

Bioacoustic Research Program. (2012) Raven Pro: Interactive Sound Analisys Software (version 1.5) [Computer Software]. Ithaca, NY: The Cornell Lab of Ornithology. Available from: <http://www.birds.cornell.edu/raven>.

Brown, J. C. (2008). "Mathematics of pulsed vocalizations with application to killer whale biphonation," *J. Acoust. Soc. Am.* 123(5), 28752883.

Buchan, S.J., Rendell L.E. and Hucke-Gaete R., « Preliminary recordings of blue whale (*Balaenoptera musculus*) vocalizations in the Gulf of Corcovado, northern Patagonia, Chile », *Marine Mammal Science*, 26(2): 451–459 (2010) DOI: 10.1111/j.1748-7692.2009.00338.x

Buchan, S. J., R. Hucke-Gaete, L. E. Rendell and K. M. Stafford. (2014). A new song recorded from blue whales in the Corcovado Gulf, Southern Chile, and an acoustic link to the Eastern Tropical Pacific. *Endangered Species Research* 23:241–252.

Buchan, S. J., R. Hucke-Gaete, L. E. Rendell and K. M. Stafford (2015). Seasonal occurrence of Southeast Pacific blue whale songs in southern Chile and the eastern tropical Pacific. *Marine Mammal Science* 31:440–458.NOTES 227

Buchan, S. J., and R. A. Quiñones (2016). First insights into the oceanographic characteristics of a blue whale feeding ground in northern Patagonia, Chile. *Marine Ecology Progress Series* 554:183–199.

Buchan S.J., Stafford K., Hucke-Gaete R., Clark C.W., Balcazar-Cabrera N., Gutierrez L., Patris J., Malige F., Neira S., Sepulveda M., Santos-Carvallo M., Olavarria C. (2017), A review of blue and fin whale acoustically-inferred seasonal movements in the eastern South Pacific, Poster in the Society for Marine Mammalogy's 22nd Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals.

Buchan S.J., Hucke-Gaete R., Stafford K.M., Clark C.W. (2018). « Occasional acoustic presence of Antarctic blue whales on a feeding ground in southern Chile ». *Mar Mammal Sci.* 34(1):220–228.

Capella J., Vilina Y., Gibbons J. (1999). Observación de cetáceos en la isla Chañaral y nuevo registros para el área de la reserva nacional Pinguino de Humboldt, norte de Chile, observación of cetaceans at Isla Chañaral and new records at the Humboldt Penguin national reserve, northern Chile. *Estud. Oceanol.* 18: 57-64.

Cerchio S. Jacobsen J.K. and Norris T.F, (2001) Temporal and geographical variation in songs of humpback whales, *Megaptera novaeangliae*: synchronous change in Hawaiian and Mexican breeding assemblages. *Animal behaviour*, 2001, 62, 313–329 doi:10.1006/anbe.2001.1747

Cummings, W. C., and P. O. Thompson. (1971). Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*. *Journal of the Acoustical Society of America* 50:1193–1198.

Eaton J.W., Bateman D., and Hauberg S., *GNU Octave version 3.0.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations* (CreateSpace Independent Publishing Platform, 2009), <http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter>, 11ISBN 1441413006.

Galletti-Vernazzani, B., Carlson C.A., Cabrera E. and Brownell Jr R.L. (2012). Chilean blue whales off Isla Grande de Chiloe, 2004-2010: distribution, site-fidelity and behavior. *Journal of Cetacean Research and Management* 12:353–360.

Galletti-Vernazzani, B., Jackson J.A., Cabrera E., Carlson C.A. and Brownell Jr R.L. (2017). Estimates of abundance and trend of Chilean blue whales off Isla de Chiloé, Chile. PLOS ONE 12(1):e0168646.

Gavrilov, A. N., McCauley R.D. and Gedamke J. (2012). Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of Antarctic blue whales. Journal of the Acoustical Society of North America 131:4476–4480.

Hucke-Gaete, R., L. P. Osman, C. A. Moreno, K. P. Findlay and D. K. Ljungblad. (2003). Discovery of a blue whale feeding and nursing ground in southern Chile. Proceedings of the Royal Society London B (Supplement) 271:S170–S174.

Hucke-Gaete, R. (2004). Distribución, preferencia de hábitat y dinámica espacial de la ballena azul en Chile: 1997-2004 [Distribution, habitat preference and spatial dynamics of the blue whale in Chile: 1997–2004]. Ph.D. thesis, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

Hucke-Gaete R., Haro D., Torres-Florez J., Montecinos Y., Viddi F., Bedriñana-Romano L., Nery M. and Ruiz J. (2013). A historical feeding ground for humpback whales in the eastern South Pacific revisited: The case of Northern Patagonia, Chile. Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems. 23. 10.1002/aqc.2343.

Hucke-Gaete R., Bedriñana-Romano L., Viddi F.A., Ruiz J.E., Torres-Florez JP. and Zerbini A.N. « From Chilean Patagonia to Galapagos, Ecuador: novel insights on blue whale migratory pathways along the Eastern South Pacific» PeerJ 6:e4695, DOI 10.7717/peerj.4695 (2018)

Ljungblad, D. K., Clark C.W. and Shimada. H. (1998). A comparison of sounds attributed to pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) recorded south of the Madagascar Plateau and those attributed to ‘true’ blue whales (*Balaenoptera musculus*) recorded off Antarctica. Report of the International Whaling Commission 48:439–442.

Matsuoka, K., Murase, H., Nishiwaki, S., Fukuchi, T. and Shimada, H. 2000. Development of a retrievable sonobuoy system for whale sounds recording in polar region. Paper SC/52/O7 presented to the IWC Scientific Committee, (2000), in Adelaide, Australia (unpublished).

McDonald, M. A., Mesnick S.L. and Hildebrand J.A. (2006). Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: Using song to identify populations. Journal of Cetacean Research Management 8:55–56.

McDonald, M. A., Hildebrand J.A. and Mesnick S. (2009). Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs. Endangered Species Research 9:13–21.

Mellinger DK, Stafford KM, Moore SE, Dziak RP, Matsumoto H. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. Oceanography. 20(4):36–45.

Oleson, E. M., Calambokidis J., Burgess W.C., McDonald M.A., LeDuc C.A. and Hildebrand J.A. (2007a). Behavioural context of call production by eastern North Pacific blue whales. Marine Ecology Progress Series 330:269–284.

Oleson, E. M., Wiggins S.M. and Hildebrand J.A. (2007b). Temporal separation of blue whale call types on a southern California feeding ground. Animal Behaviour 74:881–894. Piñones, A., and A. V. Fedorov. 2016. Projected changes of Antarctic krill habitat by the end of the 21st century. Geophysical Research Letters 43:8580–8589.228 Marine Mammal science, Vol. 34, No. 1, 2018

Patris J., Malige F., and Glotin H.. (2017) Construction et mise en place d'un système fixe d'enregistrement à large bande pour les cétacés "bombyx 2" isla de chañaral, été austral 2017. Technical Report 2017-03, LSIS CNRS.

Perez-Alvarez M., Thomas F., Uribe F., Sepúlveda M., Flores M. and Moraga R. (2006). Fin Whales (*Balaenoptera physalus*) Feeding on *Euphausia mucronata* in Nearshore Waters off North-Central Chile. *Aquatic Mammals.* 32. 109-113. 10.1578/AM.32.1.2006.109

Redfern JV, Hatch LT, Caldow C, DeAngelis ML, Gedamke J, Hastings S, Henderson L, McKenna MF, Moore TJ, Porter MB. (2017). Assessing the risk of chronic shipping noise to baleen whales off Southern California, USA. *Endanger Species Res.* 32:53–167.

Saddler M.R., Bocconcetti A., Hickmott L.S., Chiang G., Landea-Briones R., Bahamonde P.A., Howes G., Segre P.S. and Sayigh L.S. (2017) Characterizing Chilean blue whale vocalizations with DTAGs: a test of using tag accelerometers for caller identification, *Journal of Experimental Biology* (2017) 220, 4119-4129 doi:10.1242/jeb.151498.

Samaran F., Stafford K.M., Branch T.A., Gedamke J., Royer J.R., Dziak R.P. and Guinet C. (2013). Seasonal and geographic variation of the southern blue whale subspecies in the Indian Ocean. *PLOS ONE* 8(8):1–10.

Sepúlveda M., Santos M. and Pavez G. (2017). Whale-watching en la Reserva Marina Isla Chañaral: Manejo y planificación para una actividad sustentable. Primera Edición 2017, ISBN: 978-956-368-225-0

Sepúlveda M., Pérez-Álvarez M.J., Santos-Carvallo M., et al. (2018) From whaling to whale watching: Identifying fin whale critical foraging habitats off the Chilean coast. *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst.* 2018,1–9. <https://doi.org/10.1002/aqc.2899>

Širović A., Hildebrand J. A., Wiggins S.M. and Thiele D. (2009). Blue and fin whale acoustic presence around Antarctica during 2003 and 2004. *Marine Mammal Science* 25:125–136.

Stafford, K. M., Nieuirkirk S.L. and Fox C.G. (1999a). An acoustic link between blue whales in the eastern tropical Pacific and the northeast Pacific. *Marine Mammal Science* 15:1258–1268.

Stafford, K. M., Nieuirkirk S.L. and Fox C.G. (1999b). Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical Pacific. *Journal of the Acoustical Society of America* 106:3687–3698.

Stafford, K. M., Nieuirkirk S.L. and Fox C.G. (2001). Geographical and seasonal variation of blue whale calls of the North Pacific. *Journal of Cetacean Research Management* 3:65–76.

Stafford, K. M., E. Chapp, D. R. Bohnenstiel and M. Tolstoy. (2011). Seasonal detection of three types of “pygmy” blue whale calls in the Indian Ocean. *Marine Mammal Science* 27:828–840.

Thiel M., Macaya E., Acuna E., Arntz W., Bastias H., Brokordt K., Camus P., Carlos Castilla J., Castro L., Cortes M., Dumont C., Escribano R., Fernandez M., Gajardo J.A., Gaymer C., Gomez I., Gonzalez A.E., González H.E, Haye P. and Vega A. (2007). The Humboldt Current System of Northern and Central Chile. *Oceanography and marine biology.* 45. 195-345.. 10.1201/9781420050943.ch6.

Toro F., Vilina Y.A., Capella J. and Gibbons J. (2016) Novel Coastal Feeding Area for Eastern South Pacific Fin Whales (*Balaenoptera physalus*) in Mid-Latitude Humboldt Current Waters off Chile, *Aquatic Mammals* 2016, 42(1), 47-55, DOI 10.1578/AM.42.1.2016.47

Torres-Florez, J. P., Hucke Gaete R., LeDuc R., et al. (2014). Blue whale population structure along the eastern South Pacific Ocean: Evidence of more than one population. *Molecular Ecology* 23(24):5998–6010.

Torrez-Flores, J.P. Olson P.A., Bedriñana-Romano L., Rosenbaum H.C.R., Ruiz J., LeDuc R. and Hucke Gaete R., et al. First documented migratory destination for eastern South Pacific blue whale *Marine Mammal Science*, 31(4): 1580–1586 (2015) DOI:10.1111/mms.12239

Truong G., Širović A., Tripovich J., Rogers T. (2016). Seasonal patterns in Chilean blue whale call detections between 2003 and 2015. SC/66b/SH/25, International Whaling Commission.

Van Parijs S.M., Clark C.W., Sousa-Lima R.S., Parks S.E., Rankin S., Risch D., Van Opzeeland I.C. (2009). Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales. *Mar Ecol Prog Ser*. 395:21–36.

4.3 Etude détaillée d'un chant pulsé

Dans cette partie nous présentons un article accepté par le journal JASA (Journal of the Acoustical Society of America) le 30/08/2019 [109].

4.3.1 Résumé

4.3.1.1 Un son pulsé

La découverte du chant de la baleine bleue chilienne, dit SEP2, nous a conduits à examiner de près les propriétés de ce type d'émission. En particulier, le chant SEP2 présente plusieurs parties dites 'pulsées' : à l'oreille, on entend un son basse fréquence qui semble modulé en amplitude, ce qui correspond également à l'aspect sur la représentation temporelle (fig 4.5, en haut). En représentation fréquentielle, ces sons sont caractérisés par un spectre de raies à l'espacement constant (fig 4.5 en bas).

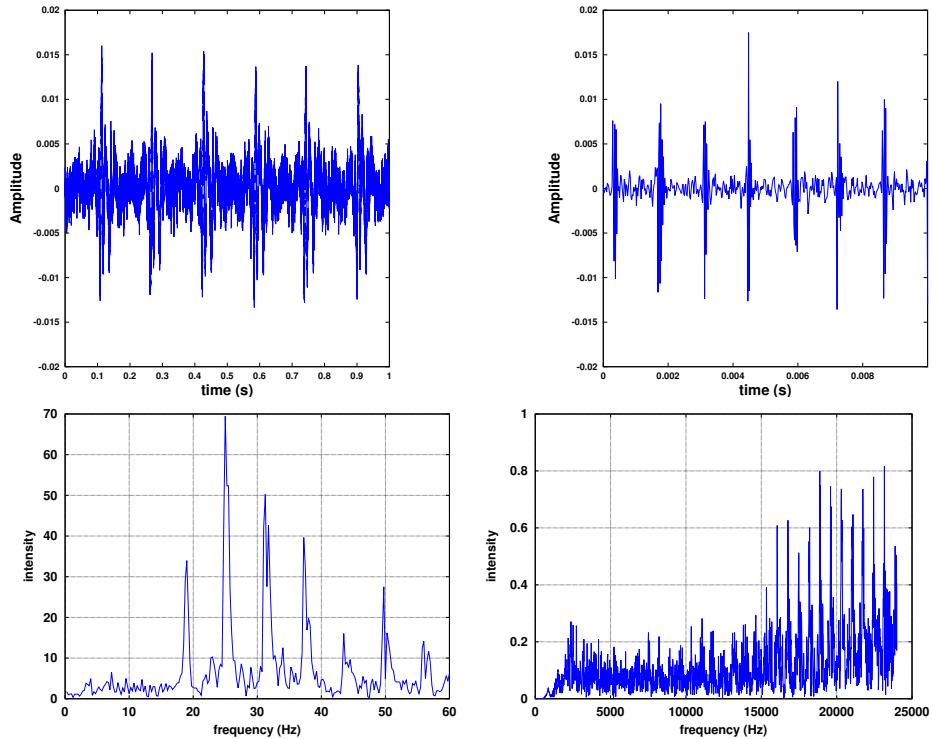


FIGURE 4.5 – Aspect temporel et fréquentiel de deux sons pulsés produits par des cétacés (extraits issus de nos données, enregistrées à Chañaral de Aceituno en 2017 avec une fréquence d'échantillonnage de $f_e = 48$ kHz). A gauche, un extrait du chant SEP2 de la baleine bleue chilienne. A droite, des trains de clics (buzz) de grand dauphin (*Tursiops truncatus*). En haut : représentation temporelle. En bas : représentation fréquentielle.

Les sons pulsés sont très répandus parmi les cétacés, et en particulier parmi les chants de baleines bleues (voir Mc Donald et al. 2006 [84]). Pourtant, on manque actuellement de critère pour les caractériser. Bien souvent, c'est une "fréquence pic" qui est invoquée pour caractériser

le chant (voir Buchan et al. 2014 [15]), or cette fréquence est peu stable puisque la distribution en fréquence de ce type de signaux est multimodale : en général, l'énergie est répartie de façon relativement équitable entre plusieurs raies, et il est donc peu fiable de caractériser le son par le "pic". C'est donc la fréquence de pulsation, qui apparaît dans le spectre comme l'écart entre les raies, qui est la caractéristique la plus importante de ce type de signaux (elle est d'ailleurs mentionnée et caractérisée par une publication de référence sur les sons produits par les cétacés, Watkins 1968 [153]).

Nous proposons de classer les chants pulsés en deux catégories, de façon à améliorer la précision des mesures de la fréquence de pulsation, mais aussi pour donner quelques indices de la manière dont le son est produit.

En effet, l'étude de la production des sons chez les grands mammifères marins est difficile, puisqu'il est impossible d'examiner des animaux vivants. Parmi les œuvres pionnières, Aroyan et al., 2000 [6] proposent des modèles à la fois physiques et physiologiques ainsi que Au et al., 2000 [8]. C'est actuellement un champ de recherche actif, avec notamment des modèles mécaniques tentant de reproduire des sons (Adam et al. 2013 [2]), et des organes identifiés par Reidenberg (2017) [117] comme une paire de larges rabats de chair soutenus par les cartilages corniculés, les rabats en U, possiblement des équivalents des cordes vocales présentes chez beaucoup de mammifères terrestres. Les sons pulsés peuvent-ils s'insérer dans le paysage qui commence à se dessiner des mécanismes de la production du son ?

4.3.1.2 Deux catégories de sons pulsés

Nous proposons d'abord de classer les sons pulsés en deux catégories selon leurs caractéristiques spectrales. En effet, le type de signal sera considéré différent selon que les valeurs des différentes fréquences du peigne (les fréquences pics, notées f_i) soient ou non des multiples entiers de la fréquence de pulsation, qui est aussi l'écart entre les pics (notée f_{pulse} ou Δf). A titre d'illustration, le tableau 4.1 recense les valeurs de Δf , des f_i et du quotient $\frac{f_i}{\Delta f}$ pour les deux exemples de sons pulsés présentés dans la figure 4.5.

TABLE 4.1 – Mesure de quelques fréquences du spectre de raie pour les deux signaux présentés sur la figure 4.5. L'erreur de quantification des mesures de fréquence pour la baleine bleue est de 0,25 Hz, et de 15 Hz pour le signal du dauphin. L'écart type obtenu en calculant la fréquence de pulsation $f_{\text{pulse}} = \Delta f$ sur toutes les raies est de 0,2 Hz pour la baleine et 6 Hz pour le dauphin. L'incertitude résultante sur les quotients est de 0,1 pour le signal de baleine et 0,05 pour le dauphin. On constate que les mesures sont compatibles avec des quotients entiers dans le cas de la baleine bleue, mais non dans celui du grand dauphin.

Fréquences (Hertz)	$f_1 \pm \delta f_1$	$f_2 \pm \delta f_2$	$f_3 \pm \delta f_3$	$f_4 \pm \delta f_4$	$\Delta f \pm \delta \Delta f$
SEP2 (baleine bleue)	$19,0 \pm 0,25$	$25,2 \pm 0,25$	$31,3 \pm 0,25$	$37,6 \pm 0,25$	$6,26 \pm 0,2$
Train de clics (gd dauphin)	18900 ± 15	19610 ± 15	20330 ± 15	21040 ± 15	712 ± 6

Quotients	$\frac{f_1}{\Delta f}$	$\frac{f_2}{\Delta f}$	$\frac{f_3}{\Delta f}$	$\frac{f_4}{\Delta f}$
SEP2 (baleine bleue)	$3,04 \pm 0,1$	$4,03 \pm 0,1$	$5,00 \pm 0,1$	$6,01 \pm 0,1$
Train de clics (grand dauphin)	$26,55 \pm 0,05$	$27,54 \pm 0,05$	$28,55 \pm 0,05$	$29,55 \pm 0,05$

Dans le cas où les f_i sont effectivement des multiples entiers de la fréquence de pulsation, on peut considérer le spectre comme une série de Fourier dont les premières harmoniques sont atténuerées. On a donc affaire à un signal périodique. Dans ce cas, la fréquence de pulsation est

assimilable à la fréquence fondamentale du spectre de raies : la seule particularité du signal pulsé par rapport à un signal harmonique classique est la disparition des premières harmoniques.

En revanche, lorsque les f_i ne sont pas des multiples entiers de la fréquence de pulsation, ce modèle harmonique ne peut être appliqué. On parle alors plus volontiers de phénomène de battements, avec un signal qui n'est pas périodique. Dans ce cas, la fréquence de pulsation ne peut pas être assimilée à une fréquence fondamentale.

Cette classification des signaux pulsés selon que la fréquence de pulsation soit ou non assimilable à la fréquence fondamentale est importante notamment pour la mesure de celle-ci. Nous montrons en effet, via deux modèles mathématiques, que dans le cas où le signal n'est pas harmonique, la mesure de la fréquence de pulsation ne peut pas se faire par une méthode classique d'auto-corrélation.

4.3.1.3 Modèles de sons pulsés et biais de mesure de f_{pulse}

Les modèles mathématiques que nous proposons ne prétendent pas recouvrir toutes les possibilités d'obtenir un signal pulsé mais de représenter simplement deux cas envisageables (une représentation des modèles est fournie sur la figure 4.6). Le premier modèle, ou modèle A, ne s'applique qu'aux signaux pulsés harmoniques, donc pour lesquels la fréquence de pulsation s'assimile à la fréquence fondamentale. Dans ce cas, on représente simplement le signal comme une ondelette p (la pulsation) convoluée par un peigne de Dirac noté $\text{III}_{T_{\text{pulse}}}$, de période $T_{\text{pulse}} = \frac{1}{f_{\text{pulse}}}$:

$$s_A(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} p(t - nT_{\text{pulse}}) = [p * \text{III}_{T_{\text{pulse}}}](t). \quad (4.1)$$

On notera qu'on a décrit ici un signal infini. Pour modéliser un signal fini, plus réaliste, il conviendra de multiplier ce signal par une fenêtre, c'est-à-dire un signal de durée équivalente à celle du signal à modéliser, et nul au-delà.

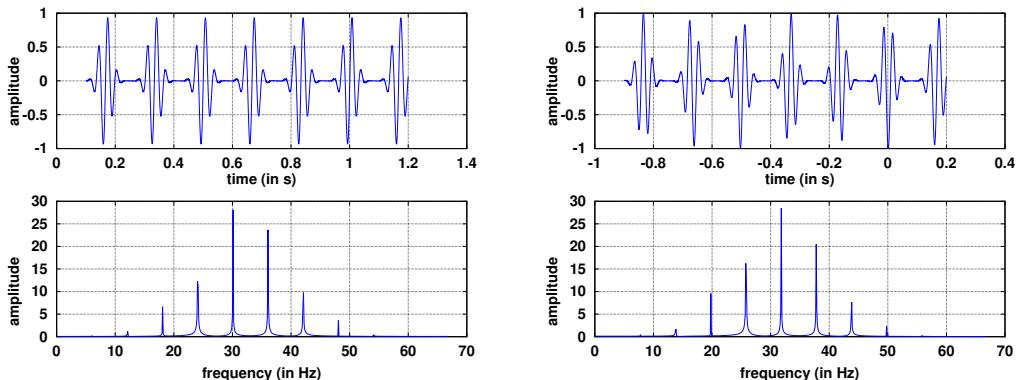


FIGURE 4.6 – Représentation des deux modèles que nous proposons. On constate que le modèle A (à gauche) présente des pics de fréquences pour des valeurs multiples de leur écart (6 Hz ici), ce qui n'est pas le cas pour le modèle B (à droite) qui montre un peigne lié à la fréquence du signal périodique avant modulation, $f_0 = 31,7$ Hz.

Pour ce modèle A, on montre qu'un calcul de la fonction d'auto-corrélation

$$C_s(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t)s^*(t + \tau)dt$$

permet d'obtenir la fréquence de pulsation, ou fréquence fondamentale, comme étant l'inverse du premier pic de $C_{s_A}(\tau)$.

Le deuxième modèle, noté modèle B , peut s'appliquer aux deux types de signaux définis plus haut. Il consiste en une fonction périodique de fréquence f_0 , modulée en amplitude par une autre fonction périodique, mais dont la fréquence f_{pulse} n'a pas a priori de rapport avec la première. Pour coller à l'aspect général d'un son pulsé, cette deuxième fonction périodique sera écrite comme la répétition à la fréquence f_{pulse} d'une enveloppe à support fini (et plus petit que T_{pulse}). Ce deuxième modèle s'écrit :

$$s_B(t) = g_{T_0}(t) \times \sum_{n \in \mathbb{Z}} e(t - nT_{pulse}) = g_{T_0}(t) \times [e * \text{III}_{T_{pulse}}](t). \quad (4.2)$$

Dans ce cas, on montre que le pic de la fonction d'auto-corrélation n'est pas obtenu pour la fréquence f_{pulse} . L'estimateur 'fonction d'auto-corrélation' est biaisé dans ce cas, et il est nécessaire d'en construire un autre pour pouvoir mesurer la fréquence f_{pulse} (par exemple en prenant l'enveloppe du signal avant de calculer l'auto-corrélation).

4.3.1.4 Application au chant de baleine bleue du sud-est du Pacifique

On voit que l'analyse du chant, et en particulier la mesure de la fréquence de pulsation, dépendent de la catégorie de chant pulsé : selon que la fréquence de pulsation peut être considérée comme la fréquence fondamentale du signal ou non, les méthodes de mesure seront différentes. Cet outil de classification établi, nous l'appliquons en détail aux signaux de baleines bleues que nous avons recueillies. Pour 100 exemples de chant SEP2 de fort signal sur bruit, nous récupérons un extrait de 4 secondes pour les quatre unités pulsées du chant. Sur ces extraits, nous mesurons une fréquence pic en calculant le maximum de la transformée de Fourier rapide sur une bande adaptée, puis la fréquence de pulsation par une auto-corrélation après détection d'enveloppe (méthode non biaisée quelque soit le type de signal). Les résultats sont montrés sur la figure 4.7 : on voit qu'ils sont tous hautement compatibles avec des valeurs entières. En particuliers, les unités C et D , qui sont les plus intenses et les plus stables en fréquence, voient leurs résultats très fortement piqués vers une valeur entière. Nous pouvons donc en conclure que ces signaux pulsés peuvent être interprétés comme des signaux harmoniques dont l'écart entre les raies correspond à la fréquence fondamentale, même si celle-ci n'est pas exprimée dans le spectre.

Comme nous le disions dans la première partie de l'étude, cette propriété a deux conséquences. D'une part, la fonction d'auto-corrélation sommée est un estimateur non biaisé de la fréquence de pulsation dans ce cas. Nous avons étudié dans ce cas trois façons d'estimer la fréquence de pulsation pour l'unité C , la plus intense. On obtient les résultats suivant :

- calcul de la fréquence de pulsation par la différence entre deux pics de la transformée de Fourier rapide : on obtient une incertitude essentiellement due à l'erreur de quantification de 0,25 Hz (due à la durée limitée à 4s du signal) $f_{pulse_1} = 5,9 \pm 0,25$ Hz
- calcul de la fréquence de pulsation par détection d'enveloppe suivie d'une auto-corrélation (méthode non biaisée pour tous les signaux) : on obtient une incertitude évaluée par l'écart type des 100 mesures $f_{pulse_2} = 5,88 \pm 0,08$ Hz
- calcul de la fréquence de pulsation par une auto-corrélation sommée (méthode applicable uniquement pour ce type de signal, pour lequel la fréquence de pulsation correspond à la fréquence fondamentale) : l'incertitude est là aussi évaluée par l'écart type sur les 100 signaux et on a $f_{pulse_3} = 5,88 \pm 0,02$ Hz

On constate donc d'une part que les méthodes qui utilisent la fonction d'auto-corrélation pour déterminer la fréquence de pulsation permettent de gagner un facteur trois en précision. Mais, de plus, la méthode de simple auto-corrélation (qui suppose que l'on ait classé le signal correctement)

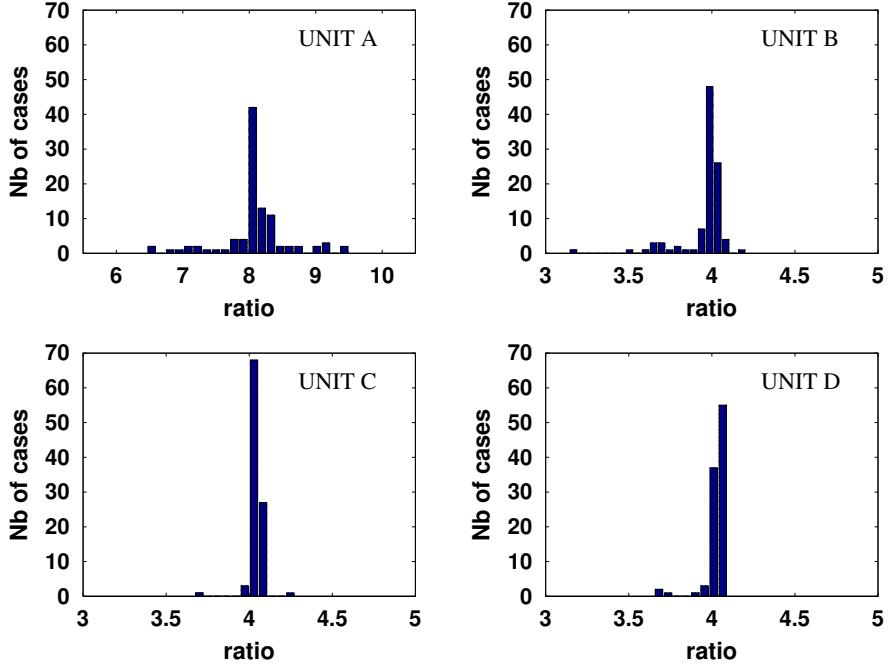


FIGURE 4.7 – Pour 100 exemples de chants SEP2 de baleines bleues issus de nos données, nous calculons le quotient fréquence pic sur fréquence de pulsation pour les quatre unités pulsées du chant. On constate que les résultats sont tout à fait compatibles avec un signal périodique, pour lequel la fréquence de pulsation est aussi la fondamentale.

permet de gagner de nouveau un facteur quatre en précision. On a donc montré sur notre exemple l'intérêt de classifier le signal dans le but d'améliorer la précision des mesures.

Par ailleurs, la classification du signal en son harmonique est intéressant dans la mesure où cela ouvre la porte à une interprétation du signal dans le cadre de la théorie dite source + filtre. En effet, ce type de signal est compatible avec un signal issu d'une seule source “active” mais modifié par un filtre. C'est un modèle extrêmement utile dans les études du son produit par les humains pour lequel la production du son est représentée par l'ensemble soufflerie (poumons) - organe vibrant (cordes vocales) - filtre résonateur (parties aériennes du système respiratoire). Dans le cas de la baleine, on peut imaginer que les plis vocaux vibrent à la fréquence fondamentale mais que le résonateur constitué par le corps de celle-ci joue le rôle d'un passe-haut n'amplifiant que les fréquences supérieures à une vingtaine de Hertz.

Il est par ailleurs intéressant de noter que, si le cas semble être comparable pour les chants spécifiques des populations Néo-Zélandaises de baleines bleues (voir Miller et al. 2014 [88]) il est sans doute distinct dans le cas des chants du sud-est de l'océan indien (étudiés par Gavrilov et al., 2011 [47] et Stafford et al. 2011 [134]). En effet, dans ce cas, il s'agit également de sons pulsés mais dont la structure est différente, puisque la fréquence de pulsation ne peut être assimilée à une fréquence fondamentale.

4.3.2 Contribution des différents auteurs

Cette publication vise une analyse assez détaillée du chant de baleine bleue que nous avons enregistré. Il est une conséquence directe de la richesse de notre corpus de données sur lequel il s'appuie entièrement pour sa partie appliquée. L'idée de la classification selon le critère de tonalité du chant est due à Julie Patris, les modèles mathématiques sont proposés par Franck Malige. L'analyse des données a été menée par Franck Malige et Julie Patris. Les calculs ont été travaillés entre Julie Patris et Franck Malige. La rédaction a été commune entre Julie Patris, Franck Malige et Susannah Buchan. Mark Asch et Hervé Glotin ont apporté une relecture détaillée avec le point de vue du traitement du signal et du mathématicien. Enfin, trois relecteurs anonymes ont beaucoup apporté à la lisibilité et l'intelligibilité de l'ensemble.

La contribution des auteurs peut donc être résumée de la façon suivante :

- Julie Patris : idée principale, calculs, analyse des données, rédaction
- Franck Malige : modèles mathématiques, calculs, analyse des données, rédaction
- Hervé Glotin et Mark Asch : vérification des calculs, relecture
- Susannah Buchan : rédaction

4.3.3 Article

A standardized method of classifying pulsed sounds and its application to pulse rate measurement of blue whale southeast Pacific song units

Julie Patris,^{1,a)} Franck Malige,¹ Hervé Glotin,¹ Mark Asch,² and Susannah J. Buchan^{3,b)}

¹Université de Toulon, l'Université d'Aix-Marseille, Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire d'Informatique et Systèmes, DYNamique de l'Information Team, Campus de La garde, 83130, France

²Université de Picardie Jules Verne, Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire Amiénois de Mathématique Fondamentale et Appliquée, Chem Thil, 80025 Amiens Cedex 1, France

³Center for Oceanographic Research in the Eastern South Pacific Sur-Austral, Edificio Departamento de Oceanografía Piso 2 Barrio Universitario s/n, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

(Received 21 January 2019; revised 29 August 2019; accepted 30 August 2019; published online 2 October 2019)

Pulsed sounds are an interesting example of complex biological sounds, frequent in cetaceans' vocalizations. A two-group classification of these sounds is proposed: tonal or non-tonal. Through two simple mathematical models, it is shown that this classification can lead to better techniques for measuring the pulse rate. This classification is thus useful for improving measurement accuracy, but can also help in formulating hypotheses regarding mechanisms of sound production. This method of classification is applied to south Pacific blue whale vocalizations and it is found that the pulse rate corresponds to the fundamental frequency (not expressed in the spectrum) of the song. Thus, the hypothesis that the sound is produced by only one organ and then filtered by the body of the giant is reinforced. © 2019 Acoustical Society of America. <https://doi.org/10.1121/1.5126710>

[WWA]

Pages: 2145–2154

I. INTRODUCTION

A. Pulsed sounds in blue whale song types

Among the numerous varieties of animal sounds, pulsed sounds are particularly complex and interesting and are common in marine mammals (Au *et al.*, 2000; Richardson *et al.*, 1995). A pulsed sound is the repetition of similar “pulses” or short signals, with a constant pulse rate, and aurally these sounds are often perceived by humans as amplitude modulated sounds. Among cetaceans, such a repetition of similar “pulses” has been studied in odontocete vocalizations (Murray *et al.*, 1998; Miralles *et al.*, 2012) and is also described in mysticete songs (Cummings and Thompson, 1971). By way of an example, two biological pulsed sounds from marine mammals—blue whale (*Balaenoptera musculus*) and bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*)—are represented in the time domain in Fig. 1.

As with most baleen whales, blue whales produce high energy, low frequency, and long duration vocalizations (Cummings and Thompson, 1971) that are highly structured in time, with endless repetition of remarkably self similar phrases. Since only males have been reported to produce these sounds (Oleson *et al.*, 2007), they are thought to play a role in reproduction, as happens in humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) (Glockner, 1983). Several very distinct song types have been registered for blue whales worldwide, each characteristic of a population, and most of these song types include units that are aurally characterized

as pulsed (McDonald *et al.*, 2006). Because of the very interesting phenomenon of frequency decrease in blue whales' songs (McDonald *et al.*, 2009), it is particularly critical to have good descriptors of the song, and the pulse rate might be a useful metric. However, though the pulse rate is generally part of the description of the song (Watkins, 1968, Cummings and Thompson, 1971; Miller *et al.*, 2014), no recent efforts have been made towards studying its properties and the best methods to measure it.

In this paper we aim to show that it can be useful to classify pulsed sounds in two different classes: a tonal (or periodic) signal, or a non-tonal (aperiodic) one: first, because the technique for measuring the pulse rate is different whether the signal is tonal or not; and second, because it can help in understanding the sound production mechanisms.

B. Sound production in cetaceans

Sound production in large marine mammals is a difficult subject since live animals cannot be examined. Though physical and anatomical analyses have been proposed (Aroyan *et al.*, 2000), sound production in mysticetes is still poorly known compared to odontocetes (Au *et al.*, 2000) and is an active area of research (Mercado III *et al.*, 2010; Reidenberg, 2017). Some studies try to reproduce sound production using theoretical models or sound production machines (Adam *et al.*, 2013). According to these studies and anatomical analyses, sound could be produced by vibrating U-shaped vocal folds and a complex system of resonators (lungs, laryngeal sac, trachea, and other tissues) that modify the sound as a passive filter.

^{a)}Electronic mail: julie.patris@univ-amu.fr

^{b)}Also at: Centro de Estudios Avanzados en Zonas Aridas, Avenida Ossandón 877, Coquimbo, Región de Coquimbo, Chile.

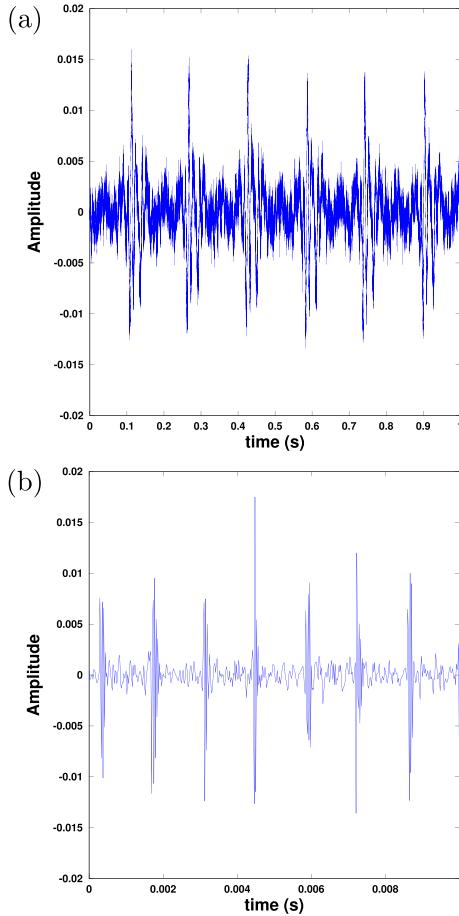


FIG. 1. (Color online) Waveform of two biological pulsed sounds, both recorded off Chañaral de Aceituno Island, Chile, in 2017 with an autonomous recorder at $f_s = 48$ kHz (see Sec. III B for details on data acquisition). The amplitude on the y axis is in relative pressure. (a) Extract of unit B of the southeast Pacific song type 2 of a blue whale (*Balaenoptera musculus*). (b) Extract of a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) buzzed sound. The signals have been identified by experts, given the ecological context of the location, and through comparison with other recordings made locally.

Regarding pulsed sounds, they can be produced through the action of two organs as in killer whales (*Orcinus orca*) (Brown, 2008). In this case the sound produced is called “two-voiced sound”: one high frequency sound is modulated in amplitude by the action of another organ at a much lower frequency.

Another way to produce pulsed sound is to use one organ which regularly produces similar pulses. Reidenberg (2017) proposed such an organ for the production of pulses in mysticetes’ sounds: “a pair of broad tissue flaps supported by the corniculate cartilages.” Dziak *et al.* (2017), in a recent study of north Pacific blue whales’ songs, also shows the growing interest in finding clues in signal processing and signal modeling for sound production.

C. Classification of pulsed sound for analysis

The goal of this paper is to propose a simple classification of pulsed sound, along with two mathematical models (Sec. II). We show the interest of such methods for obtaining a better description of the sound, to achieve more accurate

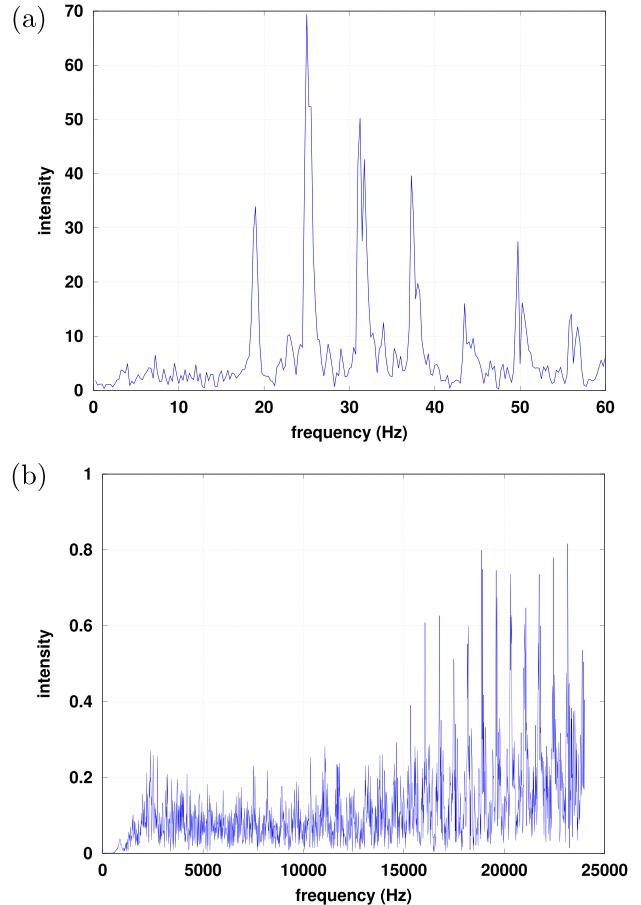


FIG. 2. (Color online) Spectra (by means of a FFT) of the two biological pulsed sounds presented in Fig. 1. (a) Unit B of the southeast Pacific song type 2 of a blue whale (*Balaenoptera musculus*), signal length is 4 s. (b) Buzzed sound of a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*), signal length is 0.07 s.

measurements of marine mammals’ vocalizations, but also as a clue to sound production mechanisms (Sec. II). While most of the efforts of describing pulsed sounds have been dedicated to odontocetes (Murray *et al.*, 1998; Rankin *et al.*, 2007; Simard *et al.*, 2008; Brown, 2008), we propose to analyze pulsed sounds emitted by blue whales in Chilean coastal seas (Buchan *et al.*, 2014) as an example of the application of our method (Sec. III). In this case, we show that our analysis gives a better precision in the songs’ description and tends to confirm the source-filter hypothesis for sound production.

II. A METHOD FOR THE ANALYSIS OF CETACEANS’ PULSED SOUNDS

A. Tonal sound versus non-tonal sound

The Fourier transform of a pulsed sound shows peaks (or lines) of frequencies, with a constant separation between frequencies (see Fig. 2). As can be verified in our models below, and is also shown in Watkins’ original paper (Watkins, 1968), this band interval corresponds, in the time domain, to the repetition rate of pulses, or pulse rate, called f_{pulse} in our study. These bands are often called side-bands in the literature. In order to better understand and characterize

TABLE I. First peak frequencies and average pulse rate, in Hz, of the two examples shown in Fig. 2 as measured from the spectra. Uncertainties (measured by the standard deviation, σ) are 0.25 Hz for blue whale and 15 Hz for bottlenose dolphin frequency measurements. Standard deviations for Δf have been computed by measuring all peaks and not only the first four.

	f_1	f_2	f_3	f_4	Δf	$\sigma(\Delta f)$
Whale	19.0	25.2	31.3	37.6	6.26	0.25
Dolphin	18900	19610	20330	21040	712	6

the pulsed sound, we will examine the relation between this side-band separation (or pulse rate) and the abscissa of the peaks.

Let us call $\{f_i\}$ the abscissa of the peaks in the spectrum and $\Delta f = f_{\text{pulse}}$ the constant band interval and visualize them in our examples. Table I gives the peak frequencies $\{f_i\}$ and the averaged band interval or pulse rate $\Delta f = f_{\text{pulse}}$ for the two examples of pulsed sound presented in Fig. 2. Frequency uncertainty due to signal length limitation is 0.25 Hz for the blue whale's signal and 15 Hz for the dolphin's.

We propose the following criterion for a classification of pulsed sounds in two groups: if there exists $(k_i) \in \mathbb{N}$ such that for all i ,

$$f_i = k_i \Delta f \quad (1)$$

then the sound will be called tonal (although the fundamental frequency may not be visible or expressed in the spectrum). That is, the peak frequencies $\{f_i\}$ are all integer multiples of the pulse rate Δf . In this case the signal is periodic of period $T_{\text{pulse}} = 1/f_{\text{pulse}}$, and f_{pulse} is the fundamental frequency of the sound. Else, the pulsed sound will be called non-tonal. If we examine again our two examples of the blue whale song and the dolphin buzz, we see that the former can be classified as a tonal signal, whereas the latter cannot (see Table II).

Based on this classification, Sec. II B will examine how the pulse rate can be measured in each case, with the help of two mathematical models.

B. Mathematical models for the measurement of pulsed sound parameters

In this section we present two mathematical models of pulsed sounds. The first one, model A, can only apply to a signal where the peak frequencies $\{f_i\}$ are integer multiples of the band interval or pulse rate Δf (tonal signals). The second one, model B, is more general and can be applied to either of the two possibilities described in Sec. II A. In both

TABLE II. Ratio between frequencies f_i of Table I and pulse rate of the two examples shown in Fig. 2. A ratio close to an integer is compatible with a tonal sound. A non-integer ratio excludes the possibility of having a tonal sound.

	$\frac{f_1}{\Delta f}$	$\frac{f_2}{\Delta f}$	$\frac{f_3}{\Delta f}$	$\frac{f_4}{\Delta f}$
Whale	3.04 ± 0.1	4.03 ± 0.1	5.00 ± 0.1	6.01 ± 0.1
Dolphin	26.55 ± 0.24	27.54 ± 0.24	28.55 ± 0.24	29.55 ± 0.24

models, we consider the pulsed sound as infinite in time, which means we are not addressing the effects of the global duration of the sound. Eventually, if needed, a window w corresponding to the global duration of the signal will be used in the computation of theoretical formulas. For each model we present and compute the Fourier transform and autocorrelation function of the signal. These two operators are often used in signal processing to analyze the signals and to measure parameters such as peak frequency and pulse rate.

1. Model A

Let us first consider a pulsed sound as the repetition of distinct and similar pulses, separated by a duration T_{pulse} . This is the point of view developed by Dziak *et al.* (2017) to model unit B of the northeast Pacific blue whale song type. Then the easiest way to mathematically represent such a function of time is the convolution of a specific wavelet p (the pulse) by a Dirac comb $\text{III}_{T_{\text{pulse}}}$, characterized by the time T_{pulse} between each impulse. We note $f_{\text{pulse}} = 1/T_{\text{pulse}}$.

Thus, the signal shown in Fig. 3 can be written as

$$s_A(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} p(t - nT_{\text{pulse}}) = [p * \text{III}_{T_{\text{pulse}}}] (t), \quad (2)$$

where $*$ is the convolution symbol, $[g * h](t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u)h(t-u)du$, $\text{III}_{T_{\text{pulse}}}(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta_{nT_{\text{pulse}}}(t)$ is the Dirac comb distribution of period T_{pulse} , and $\delta_{t_0}(t)$ is the Dirac distribution centered at t_0 . A good reference on these techniques is Appel (2008). We note that s_A is then a periodic function, of period T_{pulse} . There is no phase difference between the pulses (see Fig. 3). A more complete model could include an additive noise term, $\nu(t)$, usually assumed to be of zero mean and known (estimated) variance.

The Fourier transform of the function $s_A(t)$ is defined by $S_A(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_A(t)e^{-2\pi f t} dt$ and gives

$$S_A(f) = P(f) \times \text{III}_{f_{\text{pulse}}}(f), \quad (3)$$

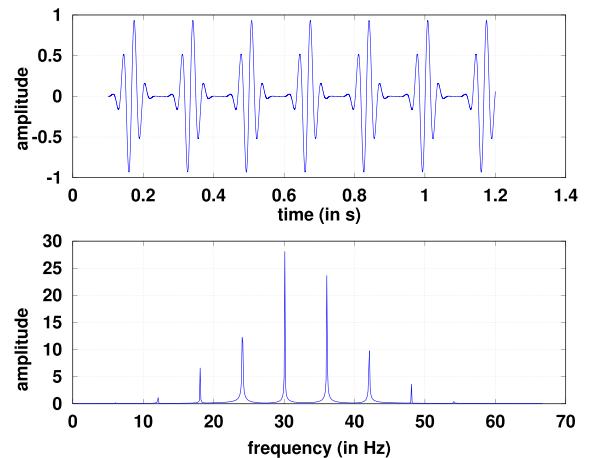


FIG. 3. (Color online) Model A in waveform (top) and its FFT (bottom). In model A, we choose the pulse as the product of a sine function of frequency $f_0 = 31.7 \text{ Hz}$ with a Gaussian of standard deviation ($\sigma = 0.02 \text{ s}$). We also choose $f_{\text{pulse}} = 6 \text{ Hz}$. In the FFT we can see that the peaks are multiples of $f_{\text{pulse}} = 6 \text{ Hz}$.

where $P(f)$ is the Fourier transform of the wavelet. In Fig. 3, $p(t)$ is a Gaussian multiplied by a sine of frequency $f_0 = 31.7$ Hz and its Fourier transform $P(f)$ is therefore a Gaussian centered on f_0 . We observe that the Fourier transform of the signal is the spectrum of the pulse P multiplied by a Dirac comb. Thus, the spectrum of s_A is a set of frequency bands at integer multiples of f_{pulse} (Fig. 3, bottom). The frequency band with higher energy (30 Hz) does not correspond to $f_0 = 31.7$ Hz (even if the wavelet energy was maximal at this frequency) because of the multiplication by the Dirac comb.

It is important to underline that in practice, the signals analyzed are finite of duration T_{signal} . In this case, we can write $s_{A,\text{finite}}(t) = s_A(t) \times w(t)$ where w is a window of duration T_{signal} . A classical window is the rectangular window, built on an indicator function $w(t) = \mathbb{1}_{[-T_{\text{signal}}/2; T_{\text{signal}}/2]}(t)$, but any kind of window can be used, as in [Dziak et al. \(2017\)](#). In this case, the Fourier transform is

$$S_{A,\text{finite}}(f) = [(P \times \text{III}_{f_{\text{pulse}}}) * W](f), \quad (4)$$

where W is the Fourier transform of w . In the case of a rectangular window, the Fourier transform is $W(f) = T_{\text{signal}} \times \text{sinc}(\pi T_{\text{signal}} f)$, a cardinal sine giving a width to the peaks in Fig. 3, linked to the value of T_{signal} .

The autocorrelation function of a signal s is $C_s(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} s(t)s^*(t+\tau)dt$, where s^* is the complex conjugate of s . In the case of a finite signal $s_{A,\text{finite}}$ and a rectangular window $w(t) = \mathbb{1}_{[-T_{\text{signal}}/2; T_{\text{signal}}/2]}(t)$, the autocorrelation function is

$$C_{s_{A,\text{finite}}}(\tau) \simeq \Lambda\left(\frac{\tau}{T_{\text{signal}}}\right) \times \left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} |P(nf_{\text{pulse}})|^2 e^{2i\pi n f_{\text{pulse}} \tau} \right), \quad (5)$$

where $\Lambda(t)$ is the triangular function ($\Lambda(t) = 1+t$ on $[-1; 0]$, $\Lambda(t) = 1-t$ on $[0, 1]$ and zero outside of $[-1; 1]$). The proof is very similar to the proof given in the [Appendix](#) for model B and will not be detailed here. An important remark is that the first maximum of the modulus of the autocorrelation function (other than $\tau = 0$) is obtained for $\tau = T_{\text{pulse}}$, the period of the signal. Thus, for this model of pulsed sound, the autocorrelation, or the summed autocorrelation ([Wise et al., 1976](#)), is a good, unbiased tool to measure the pulse rate.

2. Model B

We will now examine the case when the pulsed sound can be described as a tonal sound modulated in amplitude by a periodic function. This kind of pulsed sound has been described by [Watkins \(1968\)](#) or [Brown \(2008\)](#). A straightforward way to represent this signal is to multiply a tonal function g_{T_0} (characterized by a fundamental frequency f_0) by a signal that could be an envelope e convolved with a Dirac comb (of period T_{pulse}). We assume that $f_{\text{pulse}} \ll f_0$ so that the tonal function g_{T_0} is modulated in amplitude by a function with a much smaller frequency.

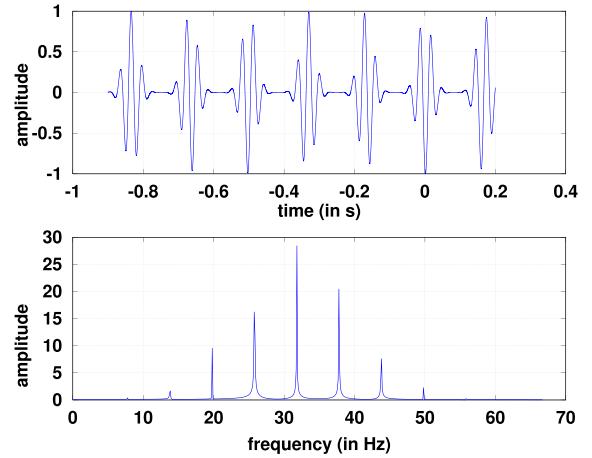


FIG. 4. (Color online) Model B in waveform (top) and its FFT (bottom). In this model, we choose the tonal function g_{T_0} as a pure sine function of period T_0 and the envelope e as a Gaussian with standard deviation $\sigma = 0.02$ s. As in Fig. 3, we choose $f_0 = 31.7$ Hz and $f_{\text{pulse}} = 6$ Hz. In the FFT we can see that the frequency peaks are not centered at multiples of f_{pulse} .

We write

$$\begin{aligned} s_B(t) &= g_{T_0}(t) \times \sum_{n \in \mathbb{Z}} e(t - nT_{\text{pulse}}) \\ &= g_{T_0}(t) \times [e * \text{III}_{T_{\text{pulse}}}] (t). \end{aligned} \quad (6)$$

In this case, the signal is not a periodic function. If we examine each of the “pulses,” they do not have the same phase (see Fig. 4). This is due to the multiplication of two tonal functions with different periods.

Let us compute the Fourier transform of such a signal. We obtain

$$S_B(f) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} E(nf_{\text{pulse}}) G_{f_0}(f - nf_{\text{pulse}}), \quad (7)$$

where E and G_{f_0} are the Fourier transforms of e and g_{T_0} , respectively. The proof is given in the [Appendix](#). In this formula, as g_{T_0} is a tonal sound, only multiples of f_0 are found in its spectrum and thus $S_B(f)$ is different from zero only if $f - nf_{\text{pulse}}$ is a multiple of f_0 , that is only if $f = nf_{\text{pulse}} + mf_0$, which is usually not a multiple of f_{pulse} . In this case, sidebands appear in the spectrum at distances nf_{pulse} of mf_0 . In addition, if the tonal signal $g_{T_0}(t)$ has its energy concentrated at the frequency f_0 , and if the Fourier transform of the envelope $E(f)$ is sufficiently regular, we see that the pulsed signal s_B has a maximum of energy also at f_0 (see Fig. 4).

As g_{T_0} is a tonal signal with fundamental f_0 , we can write its Fourier series as $g_{T_0}(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n e^{2i\pi n f_0 t}$. Then the autocorrelation function of the finite signal associated to model B is

$$\begin{aligned} C_{s_{B,\text{finite}}}(\tau) &\simeq \Lambda(\tau/T_{\text{signal}}) \left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} |a_n|^2 e^{2i\pi n f_0 \tau} \right) \\ &\times \left(\sum_{m \in \mathbb{Z}} |E(mf_{\text{pulse}})|^2 e^{2i\pi m f_{\text{pulse}} \tau} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

The proof is given in the [Appendix](#). Contrary to the model A, the non-zero maximum of this function is not obtained for $\tau = T_{\text{pulse}}$ (see remark in the [Appendix](#)). Thus, the

maximum of the autocorrelation function is a biased estimator of the pulse rate in this case.

C. Conclusions on the method

1. Consequences on measurement techniques

As can be seen in Sec. II B, if the pulsed sound is tonal, the autocorrelation function is a good tool to measure the pulse rate f_{pulse} . This can be of importance because the autocorrelation function method can be much more precise than other methods, as is shown in an example in Sec. III E.

Thus, our recommendation for a precise measurement of pulsed sound characteristics would be to:

- (1) compute the fast Fourier transform (FFT) of the whole pulsed signal (the FFT resolution in frequency is $1/T_{\text{signal}}$, so it is important to have as long a signal as possible);
- (2) measure the frequencies, $\{f_i\}$, corresponding to peaks in the FFT;
- (3) compute their interval $\Delta f = f_{\text{pulse}}$ or find an approximation of $\Delta f = f_{\text{pulse}}$ by getting the envelope of the signal (the envelope can be obtained by squaring the signal and low-pass filtering it) and then compute the maximum of the autocorrelation function of the envelope;
- (4) check whether the signal is tonal or not by examining the quotients $f_i/\Delta f$;
- (5) if the signal is tonal, get a better approximation of $\Delta f = f_{\text{pulse}}$ by finding the first maximum of the modulus of the summed autocorrelation function.

2. Consequences on sound production

If the sound is tonal (as in model A for example), then it is compatible with the action of only one source of sound production, altered by a passive filter (source-filter theory) (Fant, 1960). This is the same case as formants in human

voice production (Flanagan, 1965; Howard and Angus, 2006), but the sound will appear “pulsed” or “amplitude modulated” when the first harmonics are filtered out. This has been shown to be the case in some musical instruments (e.g., timpani or trombone) or some birds [e.g., *Parus atricapillus* (Nowicki and Capranica, 1986)]. Tonal pulsed sounds are also compatible with the regular repetition of very short separated pulses produced by one organ as proposed by Dziak *et al.* (2017) or by Reidenberg (2017).

If the sound is not tonal (as in model B for instance), then it is a combination of sounds with two different frequencies (f_0 and f_{pulse}) that are not linked. In this case, it is not compatible with the source-filter theory. One possibility is that two independent organs are used to produce the sound: one produces a signal, and the other acts as an amplitude modulation of the first signal. As shown in Sec. II A, the dolphin’s buzz seems not to be a tonal signal, and our analysis is thus consistent with the mechanism proposed by Au *et al.* (2000) (p. 114) to explain rapid trains of clicks involving the concomitant action of two generators.

III. APPLICATION TO BLUE WHALE SONG UNITS

A. The southeast Pacific blue whale song type

In this paper we are interested in a southeast Pacific blue whale song called SEP2, first recorded in 1996 (Stafford *et al.*, 1999) and first described in detail in 2014 (Buchan *et al.*, 2014). A representation of the repeated phrase is given in Fig. 5. This phrase, composed of several units, is usually repeated every two minutes in a sequence lasting from some minutes to a few hours.

These units have been described as pulsed (Buchan *et al.*, 2014). Their spectra show a set of peaks that are regularly spaced but where the fundamental frequency does not appear. This aspect is not due to a propagation effect, since all recordings of this song type show the same aspect

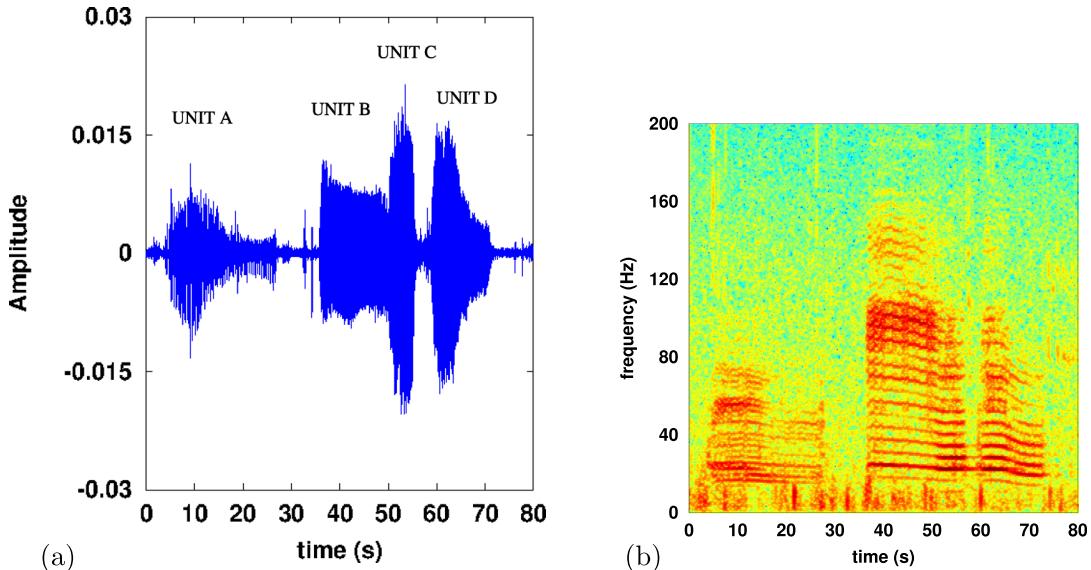


FIG. 5. (Color online) Phrase of the southeast Pacific blue whale song, SEP2, recorded off Isla Chañaral, Chile, February 2, 2017, sample frequency $f_s = 48$ kHz. (a) Waveform of relative intensity. (b) Time-frequency representation (FFT 2^{12} points, overlap of 90%, Hanning window). Low frequency bars are background noise.

independently of the place and technology of the recording device (Stafford *et al.*, 1999; Buchan *et al.*, 2014). Alternatively, pulses are also visible if we zoom in on the waveform, as in Fig. 1, top. However, the amplitude modulation visible on the waveform is not rectangular as in separated pulses, but rather like a sinusoidal modulation.

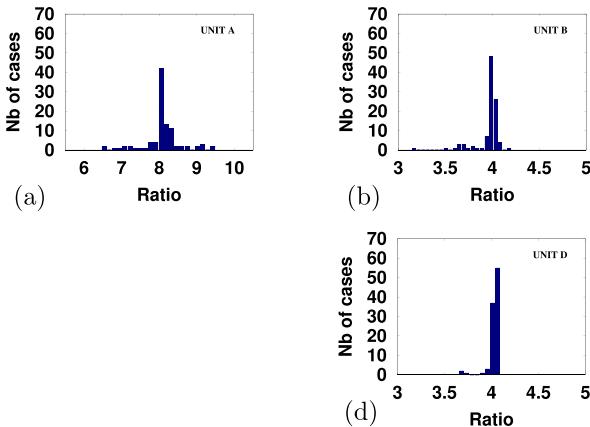
B. Data collection

Data were collected close to the Isla Chañaral marine reserve in northern Chile, between the Isla Chañaral and the mainland, at $29^{\circ}00'44''$ south and $71^{\circ}31'26''$ west during the austral summer of 2016/2017, between 16 January 2017 and 27 February 2017. The hydrophone and recording package BOMBYX II was deployed at 15–20 m below the surface on a mooring where water column depth was 70 m. Data were collected during three periods of two weeks in January and February (Patris *et al.*, 2017). The recording device BOMBYX II was mounted by the University of Toulon and includes a Cetacean Research C57 hydrophone and a commercial SONY PCM-M10 recording device. The hydrophone has very high sensitivity, a flat response down to 20 Hz and is omni directional at low frequencies (less than 10 kHz). The hydrophone is alimented by 9 V and high-pass filtered ($C = 47 \mu\text{F}$, frequency cut 0.15 Hz) to remove the continuous component. The SONY PCM-M10 recorder (gain 6, $R_{in} = 22 \text{ kOhm}$) is equipped with a 256 GB memory card, and set up in a specialized tube made by Osean able to resist high pressure (Patris *et al.*, 2017). Recording was done at a sample rate of 48 kHz so as to record a vast diversity of cetaceans, ranging from large whales to dolphins (namely bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*), and at 16-bits, allowing for high sensitivity without saturating the memory.

C. Analysis

A systematic analysis showed that blue whales' songs were present almost all days of recording (Balcazar and Alosilla, 2018). Long series of up to 70 phrases of high signal to noise ratio (SNR) were recorded, especially on Feb, 2nd 2017.

We selected 100 high SNR phrases from this data set. These phrases were selected visually on waveforms or spectrograms when all four units are clearly seen (Fig. 5). The phrases were selected on six different days of our recording to reduce the probability to have only one individual producing the songs. On these phrases, we decided to apply our criterion to



characterize the nature of these blue whales' "pulsed" sounds. To this end, we measured the peak frequency set $\{f_i\}$ and pulse rate $\Delta f = f_{pulse}$. For the selected high SNR signals, we analyzed the four units A, B, C, and D of the signals (see Fig. 5) that have different frequency characteristics but are all pulsed. These units are described in detail in [Buchan *et al.* \(2014\)](#).

1. Peak frequency

For all selected units, we performed an FFT on the first 4 s of the unit by a routine in OCTAVE ([Eaton *et al.*, 2009](#)). We measured one of the peak frequencies, which is the one that on average shows the highest SNR. This f_i is measured as the frequency corresponding to the maximum value (in modulus) of the FFT between 23 and 25 Hz for unit A and between 22 and 26 Hz for units B, C, and D. As we performed an FFT on $T_{signal} = 4$ s of the signal, there is a quantification of the measure of the frequency which is equal to $1/T_{signal} = 0.25$ Hz and thus the uncertainty on this measure is on the order of 1%. Due to the fact that the precision in frequency is inverse to the duration of the signal, it is important to use as long a signal as possible. Nevertheless, for consistency, we chose to extract 4 s of each song unit. Indeed, unit A, B, C, and D all last longer than, or exactly 4 s in each recording.

2. Pulse frequency

The estimation of f_{pulse} by a difference of two frequencies $\{f_i\}$ obtained by the FFT would lead to a poor precision, on the order of 8%. Thus, to measure the pulse rate f_{pulse} of the signal with a better precision, we first performed an envelope detection. To this effect we squared the signal and then low pass filtered it using a fifth order Butterworth filter with frequency cut-off at 10 Hz. Other methods of reconstructing the envelope of the signal can be used ([Glotin, 2001](#)) giving similar results. Then a summed autocorrelation ([Wise *et al.*, 1976](#)) on the first 4 s of the signal was performed to measure the pulse rate. The relative uncertainty on this measure is around 1.5% (see Sec. III E).

D. Results

The results of the measures of the ratio between f_i and f_{pulse} for the four units of the SEP2 phrase are shown in Fig. 6.

As we can see, the dispersion of the ratio value f_i/f_{pulse} around a fixed integer number is small, especially for units C

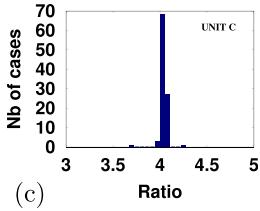


FIG. 6. (Color online) For 100 high SNR SEP2 phrases in 2017, histograms of the ratio between the peak frequency, measured by an FFT, and the pulse rate, measured by envelope detection and summed autocorrelation for units A, B, C, and D [(a), (b), (c) and (d), respectively].

TABLE III. Mean fundamental frequencies f_0 (shown to be the same as the pulse frequency) with standard deviation of the four units of the SEP2 song for the 100 phrases recorded in 2017.

Unit	A	B	C	D
f_{pulse} (Hz)	2.98 ± 0.19	6.52 ± 0.17	5.88 ± 0.08	5.89 ± 0.11

and D, which usually have a better signal to noise ratio. This dispersion can be explained by errors in measurements (see Sec. III C), presence of additional low-frequency noise (see Fig. 5) or variability in the frequency (especially for unit B). For unit A, the ratio is near 8, and for the other units near 4. Thus, our measures are compatible with the hypothesis of a tonal signal for the four units of the SEP2 song phrases. The values of the very low fundamental frequencies f_0 (which coincides with the pulse rate f_{pulse}) are given in Table III for 2017. This fundamental frequency is very stable between two phrases.

E. Discussion

1. Measurements of pulse rate

As seen in Sec. II C, in the case of a tonal pulsed sound, the measurement of f_{pulse} can be done without bias by at least three different methods: FFT of the signal and measure of the gap between two frequency peaks as in Sec. II A, summed autocorrelation of the envelope of the signal (see Sec. III C), summed autocorrelation of the signal (Wise *et al.*, 1976). In Fig. 7, we present three histograms of the values of f_{pulse} (for unit C) measured by these three methods on our set of 100 signals.

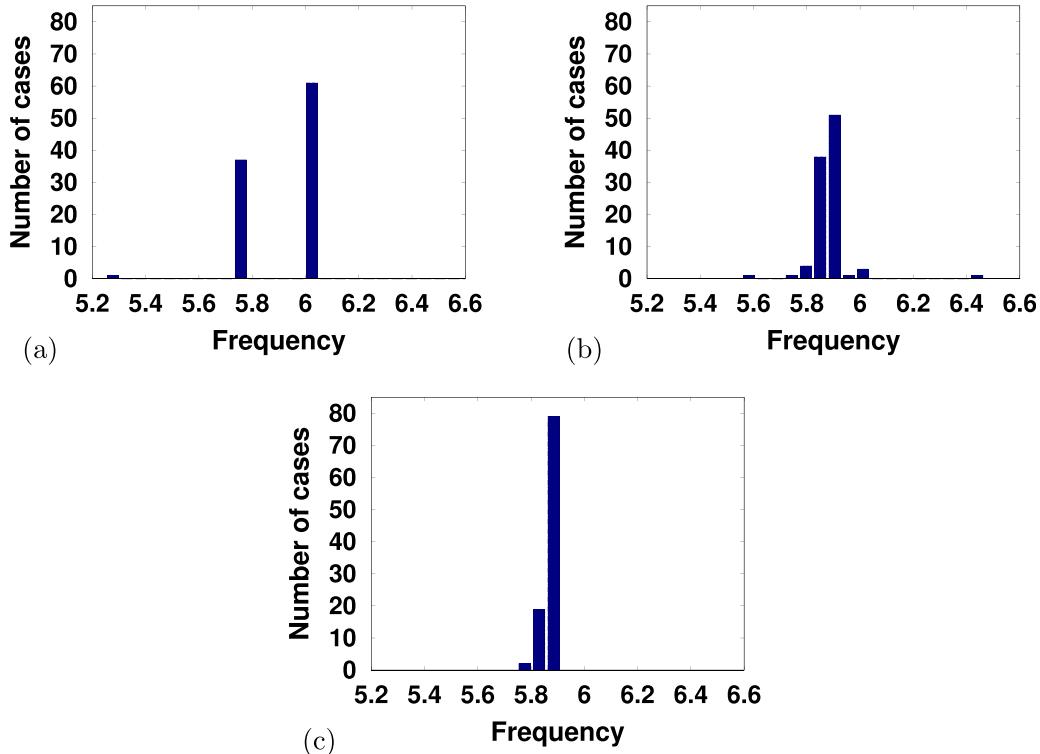


FIG. 7. (Color online) Histograms of the estimation of pulse rate f_{pulse} for unit C of 100 high SNR blue whale phrases. Three different methods of estimation were employed. (a) Estimation by difference of frequency peaks f_i in the FFT. (b) Estimation by summed autocorrelation of the envelope of the signal. (c) Estimation by summed autocorrelation of the signal.

In the case of the measure of the difference between two peaks of the FFT, the result has a quantification value of 0.25 Hz. This value is clearly seen in Fig. 7 and this method is inefficient for measuring f_{pulse} in this configuration (short duration of the signal compared to the pulse period T_{pulse}). The mean value and standard deviation of the measure is in this case $f_{\text{pulse}} = 5.9 \pm 0.2$ Hz. However, the statistical distribution of the values is far from being a normal distribution [see Fig. 7(a)], so the standard deviation is clearly not a tool that is adapted to this result.

In the case of the autocorrelation of the envelope of the signal, we obtain $f_{\text{pulse}} = 5.88 \pm 0.08$ Hz [see Fig. 7(b)]. In the case of the summed autocorrelation, we obtain $f_{\text{pulse}} = 5.88 \pm 0.02$ Hz [see Fig. 7(c)]. The best precision is thus obtained by summed autocorrelation of the signal, however, this measurement technique can only be used for a tonal signal. Thus, we see the importance of first assessing the tonal nature of the signal before measuring the pulse rate.

2. Sound production

Since we have shown that SEP2 units are tonal, they are compatible with a sound produced by only one organ. The whale song is either produced by a source-filter mechanism [that could be U-folds and the body of the animal as described in Reidenberg (2017)], or by the regular repetition of pulse production by an organ (Dziak *et al.*, 2017). In each case the fundamental frequency of vibrations is given by the pulse rate and is around 3 or 6 Hz for SEP2 units.

This could also be the case for another type of blue whale song, units B and C of the SW Pacific song type recorded off

New Zealand. Indeed, in [Miller et al. \(2014\)](#), a joint yearly decrease at almost the same relative rate of peak and pulse frequencies tends to show that these frequencies are linked, probably by an integer ratio, f_{peak} being around ten times f_{pulse} .

However, pulsed units of blue whale song types worldwide seem to not always be tonal sounds as are SEP2 units. For example, the first unit of the pygmy blue whale song type from south and west Australia (SE Indian song type) has side bands indicating its pulsed nature ([Gavrilov et al., 2011](#); [Stafford et al., 2011](#)). Spectrograms presented in these studies show that during a song occurrence the peak frequency increases (upsweep) while the pulse rate decreases (the gap between frequency side-bands narrows) ([Watkins, 1968](#)). Thus, these two frequencies are not linked by an integer ratio, and their production is probably not explained by a source-filter mechanism.

IV. CONCLUSION

In this paper we presented mathematical models to better characterize and thus understand a pulsed sound. Though we compared them to only one example, the SEP2 blue whale phrase, they could be compared to numerous other biological pulsed sounds. The four units of the SEP2 song type are found to be tonal in spite of their pulsed nature. Thus, the fundamental frequency (or pulse rate) is the best tool to characterize it. Some studies, like the study of frequency decline in baleen whales ([McDonald et al., 2009](#)), compare several song types worldwide. It would be useful to have a single, common criterion to characterize a sound, and the fundamental frequency may be a good option.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank very much Cesar Villaroel and all the divers of Explorasub diving 327 center (Chile), Agrupación turística Chañaral de Aceituno (Chile), and the research program BRILAM STIC AmSud 17-STIC-01. We are grateful to colleagues at DCLDE 2018 and SOLAMAC 2018 conferences for useful comments on the preliminary version of this work. S.J.B. acknowledges support from the Center for Oceanographic Research COPAS Sur-Austral, CONICYT PIA PFB31, Biology Department of Woods Hole Oceanographic Institution, the Office of Naval Research Global (Award Nos. N62909-16-2214 and N00014-17-2606), and a grant to the Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) “Programa Regional CONICYT R16A10003.” We thank SABIOD MI CNRS, EADM MaDICS CNRS, and ANR-18-CE40-0014 SMILES for supporting this research. We thank Clothilde Melot for reading Sec. II and the proofs presented in the [Appendix](#). In this work we used only free and open-source softwares: LATEX, AUDACITY, and OCTAVE. Finally, a lot of thanks to the anonymous reviewers, whose detailed remarks and careful reviews have greatly improved the manuscript.

APPENDIX: COMPUTATION OF THEORETICAL FORMULAS AND PROOFS

In this appendix we present proofs of the results stated in Sec. [II B](#).

1. Fourier transform of the model B

Statement: If $s_B(t) = g_{T_0}(t) \times [e * \text{III}_{T_{\text{pulse}}}] (t)$, then $S_B(f) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} E(nf_{\text{pulse}}) G_{f_0}(f - nf_{\text{pulse}})$ is its Fourier transform.

Proof:

$$\begin{aligned} S_B(f) &= [G_{f_0} * (E \times \text{III}_{f_{\text{pulse}}})](f) \\ &= \left[\sum_{n \in \mathbb{Z}} E(nf_{\text{pulse}}) \delta(f - nf_{\text{pulse}}) * G_{f_0} \right] (f) \\ &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} E(nf_{\text{pulse}}) G_{f_0}(f - nf_{\text{pulse}}). \end{aligned}$$

2. Autocorrelation function of the model B

The signal $s_{B,\text{finite}} = g_{T_0}(t) \times [e * \text{III}_{T_{\text{pulse}}}] (t) \times w(t)$ is of the form

$$s_{B,\text{finite}} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n e^{2i\pi n f_0 t} \times \left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} e(t - nT_{\text{pulse}}) \right) \times w(t)$$

considering that g_{T_0} is a tonal sound with fundamental equal to f_0 and thus can be expressed as $\sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n e^{2i\pi n f_0 t}$.

Statement: Let a finite pulsed sound

$$s_{B,\text{finite}}(t) = \left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} e(t - nT_{\text{pulse}}) \right) \times \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n e^{2i\pi n f_0 t} \times w(t),$$

where $w(t) = \mathbb{1}_{[-T_{\text{signal}}/2; T_{\text{signal}}/2]}(t)$ which satisfies the two hypotheses:

- the duration of the signal T_{signal} is high compared to T_{pulse} ;
- the frequency bandwidth of e is within the interval $[-f_0/2; f_0/2]$.

Then its autocorrelation function is approximately

$$\begin{aligned} C_{s_{B,\text{finite}}}(\tau) &\simeq \Lambda\left(\frac{\tau}{T_{\text{signal}}}\right) \left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} |a_n|^2 e^{2i\pi n f_0 \tau} \right) \\ &\quad \times \left(\sum_{m \in \mathbb{Z}} |E(mf_{\text{pulse}})|^2 e^{2i\pi m f_{\text{pulse}} \tau} \right), \end{aligned}$$

where $\Lambda(t)$ is the triangular function ($\Lambda(t) = 1 + t$ on $[-1; 0]$ and $\Lambda(t) = 1 - t$ on $[0, 1]$ and zero outside of $[-1; 1]$).

Proof: The Fourier transform of $s_{B,\text{finite}}$ is (see previous paragraph)

$$\begin{aligned} S_{B,\text{finite}}(f) &= \sum_{m \in \mathbb{Z}} E(mf_{\text{pulse}}) G_{f_0}(f - mf_{\text{pulse}}) * W(f) \\ &= T_{\text{signal}} \left[\sum_{m \in \mathbb{Z}} E(mf_{\text{pulse}}) \times \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n \delta(f - mf_{\text{pulse}} \right. \\ &\quad \left. - nf_0) * \sin_c(\pi T_{\text{signal}} f) \right] (f) \\ &= T_{\text{signal}} \sum_{n,m \in \mathbb{Z}} a_n E(mf_{\text{pulse}}) \\ &\quad \times \sin_c(\pi T_{\text{signal}} (f - mf_{\text{pulse}} - nf_0)). \end{aligned} \tag{A1}$$

The Pancherel formula [Appel (2008), p. 263] applied to $s_{B,\text{finite}}(t)$ and $s_{B,\text{finite}}^*(t + \tau)$ gives that the autocorrelation function $C_{S_{B,\text{finite}}}(\tau)$ is the inverse Fourier transform of the squared spectral density $|FT(s_{B,\text{finite}})|^2(f)$ of the signal. Thus,

$$C_{S_{B,\text{finite}}}(\tau) = FT^{-1} \left(\left| \sum_{n,m \in \mathbb{Z}} a_n E(mf_{\text{pulse}}) \times T_{\text{signal}} \text{sinc}(\pi T_{\text{signal}}(f - mf_{\text{pulse}} - nf_0)) \right|^2 \right).$$

The two facts that the duration of the signal T_{signal} is high compared to T_{pulse} and that the bandwidth of E is within the interval $[-f_0/2; f_0/2]$ imply that for a particular f all but one term of this sum are very close to zero. Thus, we can say that

$$\begin{aligned} C_{S_{B,\text{finite}}}(\tau) &\simeq FT^{-1} \left(\sum_{n,m \in \mathbb{Z}} |a_n|^2 |E(mf_{\text{pulse}})|^2 \times |T_{\text{signal}} \text{sinc}(\pi T_{\text{signal}}(f - mf_{\text{pulse}} - nf_0))|^2 \right) \\ &\simeq \sum_{n,m \in \mathbb{Z}} |a_n|^2 |E(mf_{\text{pulse}})|^2 \times FT^{-1} \left(|T_{\text{signal}} \text{sinc}(\pi T_{\text{signal}}(f - mf_{\text{pulse}} - nf_0))|^2 \right) \\ &\simeq \sum_{n,m \in \mathbb{Z}} |a_n|^2 |E(mf_{\text{pulse}})|^2 \times e^{2i\pi(nf_0 + mf_{\text{pulse}})\tau} \Lambda(\tau/T_{\text{signal}}) \\ &\simeq \Lambda(\tau/T_{\text{signal}}) \left(\sum_{m \in \mathbb{Z}} |a_n|^2 e^{2i\pi nf_0 \tau} \right) \times \left(\sum_{m \in \mathbb{Z}} |E(mf_{\text{pulse}})|^2 e^{2i\pi nmf_{\text{pulse}}\tau} \right). \end{aligned}$$

Remarks. The maximum of $\sum_{m \in \mathbb{Z}} |a_n|^2 e^{2i\pi nf_0 \tau}$ is obtained when τ is an integer multiple of T_0 and the maximum of $\sum_{m \in \mathbb{Z}} |E(mf_{\text{pulse}})|^2 e^{2i\pi nmf_{\text{pulse}}\tau}$ is obtained when τ is an integer multiple of T_{pulse} . Thus, in the case of a tonal signal where $T_{\text{pulse}} = k T_0$, we will have a maximum of $C_{S_{A,\text{finite}}}$ for $\tau = T_{\text{pulse}}$. In the case of a non-tonal signal (f_0/f_{pulse} is not an integer), we will have a maximum of $C_{S_{B,\text{finite}}}$ at the multiple of T_0 which is the nearest value to T_{pulse} . In this case the determination of T_{pulse} by autocorrelation has a bias.

A more detailed version of these proofs can be obtained by asking the authors.

- Adam, O., Cazau, D., Gandilhon, N., Fabre, B., Laitman, J., and Reidenberg, J. (2013). "New acoustic model for humpback whale sound production," *Appl. Acoust.* **74**, 1182–1190.
- Appel, W. (2008). *Mathématiques pour la Physique et les Physiciens* (H & K Editions, Paris).
- Aroyan, J. L., McDonald, M. A., Webb, S. C., Hildebrand, J. A., Clark, D., Laitman, J. T., and Reidenberg, J. S. (2000). *Acoustic Models of Sound Production and Propagation* (Springer-Verlag, Berlin), Chap. 10, pp. 409–469.
- Au, W., Popper, A., and Fay, R. (2000). *Hearing by Whales and Dolphins* (Springer, Berlin).
- Balcazar, N., and Alosilla, G. (2018). (private communication).
- Brown, J. C. (2008). "Mathematics of pulsed vocalizations with application to killer whale biphonation," *J. Acoust. Soc. Am.* **123**(5), 2875–2883.
- Buchan, S., Hucke-Gaete, R., Rendell, L., and Stafford, K. (2014). "A new song recorded from blue whales in the Corcovado Gulf, southern Chile, and an acoustic link to the eastern tropical Pacific," *Endang. Spec. Res.* **23**, 241–252.
- Cummings, W., and Thompson, P. (1971). "Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*," *J. Acoust. Soc. Am.* **50**, 1193–1198.
- Dziak, B., Haxel, J., Lau, T.-K., Heimlich, S., Caplan-Auerbach, J., Mellinger, D., Matsumoto, H., and Mate, B. (2017). "A pulsed-air model of blue whale b call vocalizations," *Sci. Rep.* **7**, 9122.
- Eaton, J. W., 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, <http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter> (Last viewed 17 September 2019).
- Fant, G. (1960). *Acoustic Theory of Speech Production*. (Mouton, The Hague).
- Flanagan, J. (1965). *Speech Analysis Synthesis and Perception* (Springer, Berlin).
- Gavrilov, A., McCauley, R., Salgado-Kent, C., Tripovitch, J., and Wester, C. B. (2011). "Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time," *J. Acoust. Soc. Am.* **130**(6), 3651–3660.
- Glockner, D. A. (1983). "Determining the sex of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in their natural environment," in *Communication and Behavior of Whales. AAAS Selected Symposium 76*, edited by R. Payne (Westview Press, Boulder, CO), pp. 447–464.
- Glotin, H. (2001). "Dominant speaker detection based on voicing for adaptive audio-visual ASR robust to speech noise," in *ISCA Tutorial and Research Workshop (ITRW) on Adaptation Methods for Speech Recognition*.
- Howard, D. M., and Angus, J. A. S. (2006). *Acoustics and Psychoacoustics* (Elsevier, Amsterdam).
- McDonald, M., Hildebrand, J., and Mesnick (2009). "Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs," *Endang. Spec. Res.* **9**, 13–21.
- McDonald, M., Mesnik, S., and Hildebrand, J. (2006). "Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: Using song to identify populations," *J. Cetacean Res. Manage.* **8**(1) 55–65.
- Mercado, E. III, Schneider, J. N., Pack, A. A., and Herman, L. M. (2010). "Sound production by singing humpback whales," *J. Acoust. Soc. Am.* **127**(4), 2678–2691.
- Miller, B. S., Collins, K., Barlow, J., Calderan, S., Leaper, R., McDonald, M., Ensor, P., Olson, P., Olavarria, C., and Double, M. (2014). "Blue whale vocalizations recorded around New Zealand: 1964–2013," *J. Acoust. Soc. Am.* **135**(3), 1616–1623.
- Miralles, R., Lara, G., Antonio, E., and Rodriguez, A. (2012). "The pulsed to tonal strength parameter and its importance in characterizing and classifying beluga whale sounds," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**(3), 2173–2179.
- Murray, S. O., Mercado, E. III, and Roitblat, H. L. (1998). "Characterizing the graded structure of false killer whale (*Pseudorca crassidens*) vocalizations," *J. Acoust. Soc. Am.* **104**(3), 1679–1688.
- Nowicki, S., and Capranica, R. R. (1986). "Bilateral syringeal interaction in the production of an oscine bird sound," *Science* **231**, 1297–1299.
- Oleson, E. M., Calambokidis, J., Burgess, W. C., McDonald, M. A., LeDuc, C. A., and Hildebrand, J. A. (2007). "Behavioral context of call production by eastern north Pacific blue whales," *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **330**, 269–284.
- Patris, J., Malige, F., and Glotin, H. (2017). "Construction et mise en place d'un système fixe d'enregistrement à large bande pour les cétacés "Bombay 2" Isla de Chañaral, été austral 2017," Technical Report 2017-03.

- Rankin, S., Oswald, J., Barlow, J., and Lammers, M. (2007). "Patterned burst-pulse vocalizations of the northern right whale dolphin, *Lissodelphis borealis*," *J. Acoust. Soc. Am.* **121**(2), 1213–1218.
- Reidenberg, J. (2017). "Terrestrial, semiaquatic, and fully aquatic mammal sound production mechanisms," *Acoust. Today* **13**(2), 35–43.
- Richardson, W. J., Charles R., Greene, J., Malme, C. I., Thomson, D. H., Moore, S. E., and Wiirsig, B. (1995). *Marine Mammals and Noise* (Academic Press, New York).
- Simard, P., Mann, D. A., and Gowans, S. (2008). "Burst-pulse sounds recorded from white-beaked dolphins (*Lagenorhynchus albirostris*)," *Aquat. Mamm.* **34**(4) 464–470.
- Stafford, K., Chapp, E., and Bohnenstiel, D. (2011). "Seasonal detection of three types of 'pygmy' blue whale calls in the Indian Ocean," *Marine Mamm. Sci.* **27**(4), 828–840.
- Stafford, K. M., Niekirk, S. L., and Fox, C. G. (1999). "Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical Pacific," *J. Acoust. Soc. Am.* **106**(6), 3687–3698.
- Watkins, W. (1968). *The Harmonic Interval Fact or Artifact in Spectral Analysis of Pulse Train* (Pergamon Press, Oxford), Vol. 2.
- Wise, J., Caprio, J., and Parks, T. (1976). "Maximum likelihood pitch estimation," *Trans. Acoust. Speech Sign. Process.* **24**, 418–423.

Chapitre 5

La baisse en fréquence des chants de baleines bleues du sud-est du Pacifique

Nous présentons dans cette partie la synthèse d'un article (Malige et al.) soumis au journal JASA (Journal of the Acoustical Society of America) en janvier 2019.

5.1 Résumé

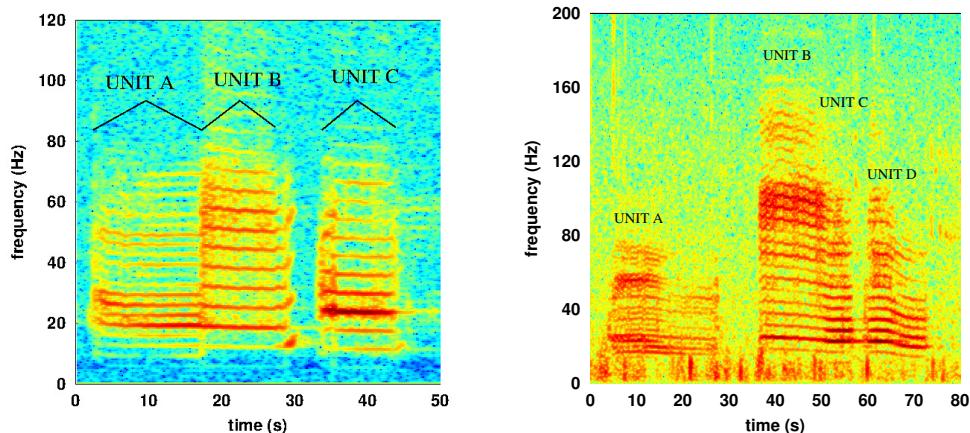


FIGURE 5.1 – Deux phrases caractéristiques de la baleine bleue chilienne. A gauche, le premier chant, décrit en 1971 par Cummings et Thomson en 1971 [32] en général nommé 'SEP1' (South East Pacific 1) mais de moins en moins présents dans les enregistrements actuels. A droite, la phrase du chant SEP2 (South East Pacific 2), décrit en 2014 par Buchan et al. [15], actuellement le plus souvent enregistré pour cette population.

Comme on l'a vu dans la partie précédente, le chant des baleines bleues chiliennes, dit "SEP2"

(pour South East Pacific 2), est la répétition extrêmement régulière d'une phrase, composée de plusieurs unités (voir figure 5.1). D'une façon générale, les chants de baleines bleues sont très répétitifs et auto-similaires à l'intérieur d'une population donnée (McDonald et al. 2006 [84]). Comme vu dans la partie précédente, leur spectre est en général un spectre de raies, composé d'une ou plusieurs fréquences. Cependant, depuis une dizaine d'années, on constate un phénomène pour l'instant inexpliqué : les chants de baleine bleue étudiés montrent une baisse en fréquence dans le temps, linéaire, de l'ordre de quelques dixièmes de Hertz par an (voir McDonald et al. 2009 [83]). Concrètement, cette baisse se manifeste par un décalage de l'ensemble du spectre vers les basses fréquences, de façon plus ou moins uniforme selon les parties du chant.

Dans cette étude, nous avons examiné les différents enregistrements disponibles pour deux types de chants, tous deux caractéristiques de la baleine bleue chilienne, nommés respectivement SEP1 (South East Pacific 1, décrit en 1971 par Cummings et Thomson [32]) et SEP2 (South East Pacific 2, décrit en 2014 par Buchan et al. [15]). Les données que nous examinons sont issues d'une dizaine de relevés présentés dans la table 5.1.

TABLE 5.1 – Données utilisées pour l'étude de la baisse en fréquence du chant de la baleine bleue chilienne. La table présente le nom de la mission, la référence, le lieu, la saison, le nombre de phrases analysées et le taux d'échantillonnage f_s des données.

Relevé	Référence	lat. (S) / long. (W)	année	saison australe	nb. de phrases SEP 1/2	f_s (Hz)
ETP 1	Stafford 1999 [135]	8°/95°	1996	hiver	40 / 50	100
IWC SOWER	Shabangu 2018 [128]	29°/72°	1997	été	- / 36	1000
ETP 2	Stafford 1999 [135]	8°/95°	2002	hiver	- / 50	250
CTBTO	CTBTO [31]	34°/79°	2007	automne	31 / -	250
CTBTO	CTBTO [31]	34°/79°	2009	automne	- / 50	250
Corcovado 1	Buchan 2015 [20]	44°/74°	2012	été	33 / 50	2000
Corcovado 1	Buchan 2015 [20]	44°/74°	2013	été	- / 50	2000
CTBTO	CTBTO [31]	34°/79°	2014	été	20 / 50	250
Corcovado 2	Buchan 2015 [20]	44°/74°	2016	été	- / 50	4000
Chañaral	Patris 2017 [108]	29°/72°	2017	été	- / 50	48000

Pour chaque type de chant (SEP1 et SEP2) nous choisissons premièrement les unités qui nous paraissent adaptées à l'étude (régulières, intenses). Pour le chant de type SEP1, nous choisissons d'examiner un extrait de 4s des unités B et C. Pour le chant de type SEP2, nous examinons 4s des unités C et D, les plus intenses et les plus stables en fréquence. La durée de 4s est choisie comme étant la plus petite partie commune à ces différentes unités. Pour chaque extrait, nous calculons deux paramètres dans le but de caractériser le décalage en fréquence du chant. Premièrement, nous mesurons la fréquence comportant le plus d'énergie (ou fréquence pic) en cherchant le maximum de la transformée Fourier rapide (ou FFT) du signal. Cet indicateur est le plus souvent utilisé dans la littérature. Nous proposons par ailleurs d'utiliser un autre indicateur, basé sur l'étude présentée dans la partie précédente : la fréquence de pulsation, ici confondue avec la fréquence fondamentale (absente du spectre), obtenue par auto-corrélation du signal. Les incertitudes sont classées en trois catégories : la dispersion intrinsèque (représentant les variations entre phrases, dues à des variations à l'émission ou à des phénomènes de propagation), l'erreur de quantification due à la numérisation des signaux, et le bruit additif.

Pour chaque unité étudiée, nous trouvons une baisse de fréquence cohérente avec ce qui est observé pour les autres chants de baleines bleues à travers le monde (voir la table 5.2). Nous montrons également que la méthode consistant à chercher à mesurer la fréquence fondamentale ou fréquence

de pulsation permet de réduire l'incertitude dans le cas où les données sont sur-échantillonnées (fréquence d'échantillonnage supérieur à 400 Hz pour ce type de signal). Des explications ont été avancées pour expliquer le phénomène de la baisse en fréquence des chants de baleines bleues (voir notamment McDonald 2009 [83]) mais aucune n'est pour l'instant privilégiée. Il est clair cependant que cette baisse ne saurait durer indéfiniment, et les observations futures devraient apporter des nouveautés et peut-être des pistes d'interprétation.

TABLE 5.2 – Baisse de fréquence des chants de baleines bleues dans le monde. La dernière colonne montre la baisse annuelle normalisée à la valeur de la fréquence en 2000.

Nom du chant	Références	Période étudiée	Baisse de la fréquence pic (Hz)	Baisse relative
NE Pac.	Mc Donald 2009 [83]	1963-2008	21.9 to 15.2	0.91
SW Pac.	Mc Donald 2009 [83], Miller 2014 [88]	1964-2013	25.3 to 17.5	0.81
NW Pac.	Mc Donald 2009 [83]	1968-2001	23 to 17.9	0.86
N Atl.	Mc Donald 2009 [83]	1959-2004	23 to 17.6	0.66
Antarctique	Mc Donald 2009 [83], Gavrilov 2012 [46], et Leroy 2016 [71]	1995-2014	28.5 to 25.8	0.51
N Indien	Mc Donald 2009 [83], Miksis 2016 [87]	1984-2012	116 to 100	0.53
SE Indien	Mc Donald 2009 [83]	1993-2000	19.5 to 19.0	0.38
SE Indien	Gavrilov 2012 [46]	2002-2010	72.5 to 69.5	0.48
W Indien	Leroy 2018 [72]	2007-2015	34.7 to 33.7	0.35
SEP 1 (unit B)		1970-2014	23.1 to 19.3	0.42
SEP 1 (unit C)		1970-2014	30.8 to 24.3	0.56
SEP 2 (unit C)		1996-2017	26.5 to 23.5	0.44
SEP 2 (unit D)		1996-2017	26.5 to 23.4	0.45

5.2 Contribution des différents auteurs

Cet article réunit de nombreux co-auteurs, essentiellement à cause de l'important corpus de données utilisé. L'idée originale de chercher dans ce type de chants une évolution semblable à celle d'autres chants de baleines bleues déjà étudiés est de Franck Malige et Julie Patris. Les méthodes de traitement du signal ont été proposées par Julie Patris et Franck Malige. Susannah Buchan a fourni son expertise de ces signaux et a réuni l'équipe de tous les autres co-auteurs, cherchant dans la littérature ou dans ses échanges personnels avec des collègues toutes les données susceptibles de nous aider. Le traitement systématique des données a été mené par Franck Malige. La rédaction est le fait de Julie Patris, Franck Malige, Susannah Buchan et Kathleen Stafford. Tous les autres auteurs ont apporté, outre leurs données originales, une relecture attentive.

La contribution des auteurs peut donc être résumée de la façon suivante :

- Franck Malige : analyse des données, idée générale, calculs, rédaction
- Julie Patris : idée générale, calculs, rédaction
- Susannah Buchan : coordination, rédaction
- Kathleen Stafford : rédaction
- tous les auteurs : mise en commun des données originales de chacun

5.3 Article

Inter-annual decrease in pulse rate and peak frequency of Southeast Pacific blue whale song types since 1970

Franck Malige,¹ Julie Patris,¹ Susannah J. Buchan,^{2,3,4} Kathleen M. Stafford,⁵ Fannie Shabangu,^{6,7} Ken Findlay,^{7,8} Rodrigo Hucke-Gaete,⁹ Sergio Neira,² Christopher W. Clark,¹⁰ and Hervé Glotin¹

¹⁾ AMU, Université de Toulon, CNRS, LIS, Marseille, DYNI team, France^a

² COPAS Sur-Austral, Universidad de Concepción, Chile

³ Centro de Estudios Avanzados en Zonas Ridas, Chile

⁴ Woods Hole Oceanographic Institution, USA

⁵ Applied Physics Laboratory, University of Washington, Seattle, USA

⁶ Fisheries Management, Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, South Africa

⁷ Mammal Research Institute Whale Unit, University of Pretoria, South Africa

⁸ Cape Peninsula University of Technology, South Africa

⁹ Universidad Austral, Chile

¹⁰ Cornell University, USA

(Dated: 5 June 2019)

We examined the decrease in the frequency of the dominant southeast Pacific blue whale song type (SEP2) from 1996 to 2017, using acoustic data from five different sources ranging between the Equator and Chilean Patagonia. The pulse rate of the song units as well as their peak frequency were measured using two different methods (summed auto-correlation and Fourier transform). We assessed the sources of error associated with each measurement. There was a linear decline in both parameters for SEP2. A shorter comparative analysis also showed a frequency decline in the scarcer southeast Pacific song type (SEP1) between 1970 to 2014, revealing that both song types are declining at similar rates. We discussed the use of measuring both pulse rate and peak frequency to examine the frequency decline. We also compared the rates of frequency decline with other song types reported in the literature.

©2019 Acoustical Society of America. [http://dx.doi.org/(DOI number)]

[XYZ]

Pages: 1–10

I. INTRODUCTION

A. Frequency decline in whale songs

Blue whale (*Balaenoptera musculus*) songs are the repetition of several highly stereotyped low-frequency, high energy units that compose song phrases, first described in 1971 (Cummings and Thompson, 1971). Song units and phrases have been qualified as 'remarkably consistent' within a song, but also between individuals (Cummings and Thompson, 1971). Song in blue whales has been attributed to reproductive display by males (Oleson et al., 2007). Numerous, distinct songs have been identified worldwide (McDonald et al., 2006), each displaying stability in the temporal and frequency characteristics of units and phrases and intervals between units or phrases. However, this global pattern has been shown to be affected by a general decreasing trend in frequency over decadal timescales (McDonald et al., 2009).

This linear decline in tonal frequencies of blue whale song types is a recently described unexplained phenom-

ena. It appears to occur worldwide, based on analyses of different regional song types, spanning five decades (McDonald et al., 2009). New studies have recently confirmed these results for Antarctic blue whale song type (Gavrilov et al., 2012), (Ward et al., 2017), (Leroy et al., 2018), for the southwest Pacific song type (Miller et al., 2014a), or for different song types in the Indian ocean (Gavrilov et al., 2011), (Leroy et al., 2018). So far, no studies have examined frequency shift in southeast Pacific blue whale songs, even though these were the first blue whale songs to be identified as such (Cummings and Thompson, 1971).

A similar inter-annual frequency decrease has been recently measured for bowhead whale *Balaena mysticetus* (Thode et al., 2017) and fin whale *Balaenoptera physalus* populations (Weirathmueller et al., 2017), (Leroy et al., 2018) and unidentified low frequency sounds attributed to baleen whales (Leroy et al., 2017), (Ward et al., 2017).

B. Southeast Pacific blue whale song types

There are two blue whale song types in the southeast Pacific known as SEP1 and SEP2. SEP1 was first described almost fifty years ago

^{a)}julie.patris@univ-amu.fr

(Cummings and Thompson, 1971), while SEP2 was first recorded in 1996 (Stafford *et al.*, 1999) near the Equator and described in detail as a new song type in 2014 (Buchan *et al.*, 2014). SEP2 has been found to be the dominant song type of southeast Pacific (Buchan *et al.*, 2015), (Saddler *et al.*, 2017).

These songs are composed of a single repeated phrase, highly stereotyped in unit composition, duration and frequency characteristics (see figures 1 and 2). SEP1 phrase is composed of 3 units (Cummings and Thompson, 1971) called *A*, *B*, *C* and shown in figure 1.

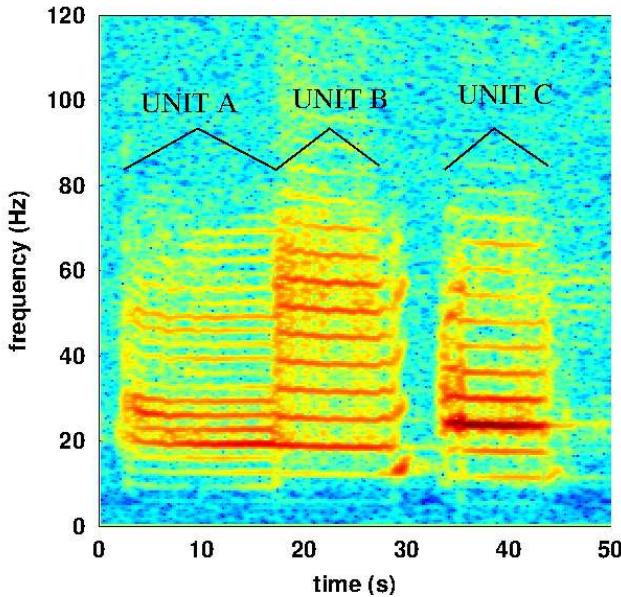


FIG. 1. Time/frequency representation of a phrase of the SEP1 song, recorded in the Corcovado gulf, Chile, 2012 March 1st, sample rate $f_s=2$ kHz, FFT 2^{12} points, overlap of 90%, Blackman window.(color online)

SEP2 phrase is composed of 4 units (Buchan *et al.*, 2014) called *A*, *B*, *C* and *D* and shown in figure 2. The SEP2 phrase is usually repeated every two minutes, in a sequence lasting from some minutes to a few hours (called a song). All these features are observable only in clear recordings, with high signal to noise ratio (SNR). Units *C* and *D* are usually the loudest and together have been used as a kernel for automatic detection (Buchan *et al.*, 2015).

One of the defining characteristics of these song types is the pulsed nature of their units, visible in figure 3 as a repetition rate at low frequency. The SEP1 units have a pulse rate f_{pulse} around 6 pulses per second for units *B* and *C*, and 3 pulses per second for unit *A*. The SEP2 units have a pulse rate f_{pulse} around 6 pulses per second for units *B*, *C* and *D*, and 3 pulses per second for unit *A* (see part III A 2 for measurements techniques).

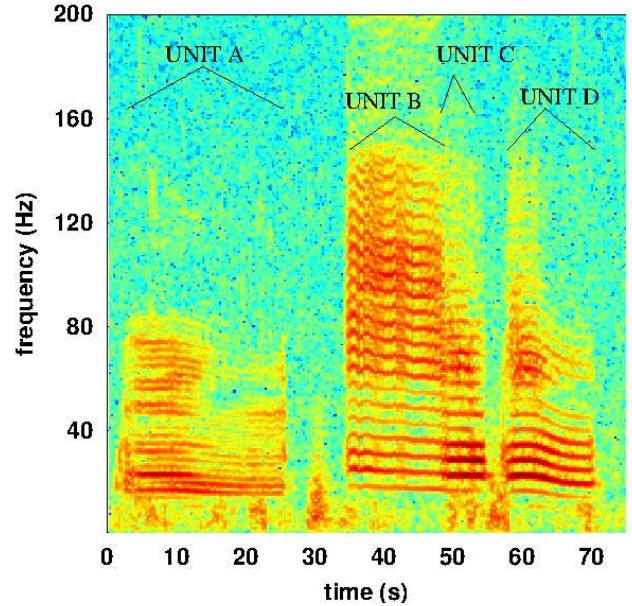


FIG. 2. Time/frequency representation of a phrase of the SEP2 song, recorded off Isla Chañaral, Chile, 2nd February 2017, sample rate $f_s=48$ kHz, FFT 2^{16} points, overlap of 75%, Blackman window. (color online)

This pulse rate can also be seen as the frequency gap between to bands in figures 1 and 2 (Watkins, 1968).

These song types have been recorded at different sites in the eastern Pacific Ocean: near the Equator, in the eastern tropical Pacific (ETP) between 1996 and 2002 (Stafford *et al.*, 1999), off the north coast of Chile in 1997-1998 by the International Whaling Commission's Southern Ocean Whale and Ecosystem Research (IWC SOWER) program (Shabangu *et al.*, 2018), in the Corcovado Gulf in the south of Chile in 2012, 2013, 2016, 2017 (Buchan *et al.*, 2015), near the Juan Fernandez archipelago off Chile in 2005, from 2007 to 2010 and from 2014 to 2016 by the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO <https://ctbto.org/>) and off Isla Chañaral, Chile, in 2017 (Patris *et al.*, 2017).

In this paper, we examine the frequency characteristics of the SEP song types by computing the pulse rate and peak frequency of their units to determine whether frequency decline has occurred in the last decades, using seven different data sets. We also discuss the sources of error associated with both pulse rate and peak frequency measurements.

II. DATA COLLECTION

Being the predominant song type, we analyzed in detail 436 SEP2 song phrases spanning 21 years (1996-2017), from 5 different locations and 7 different data sets listed in Table I and displayed in figure 4.

Fifty high SNR phrases were manually selected for each year. To minimize the probability of only analyzing

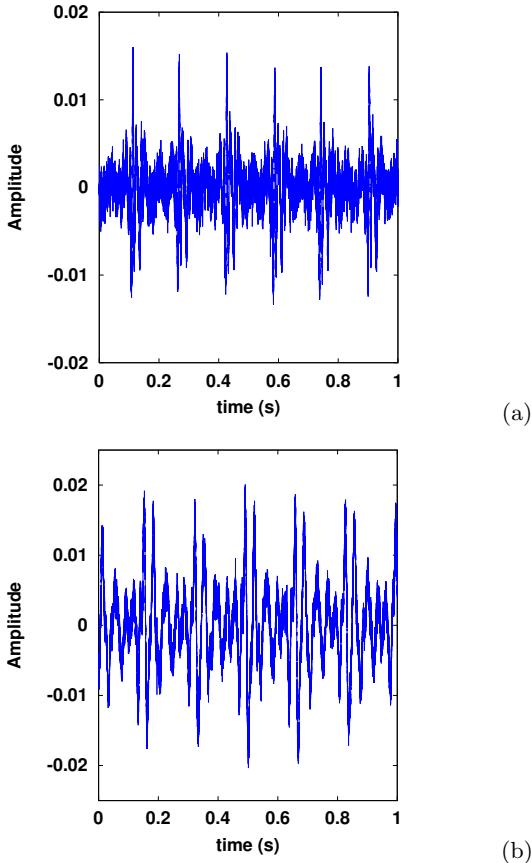


FIG. 3. Extracts of units *B* (left,(a)) and *C* (right,(b)) of a SEP2 song recorded off Isla Chañaral, 2017 February the 2nd, in waveform. (color online)

phrases from a single song bout, phrases were taken from five different days. In the case of the SOWER data, only 36 phrases from three different days were selected, due to the short duration of the data set.

The oldest data for SEP2 is 1996, however for the SEP1 song type, there is data as far back as 1970 ([Cummings and Thompson, 1971](#)) even if, in this paper, only pulse rate, but not peak frequency is reported. Also, over all available data bases, there are fewer examples of SEP1. With these limitations, we applied the same approach for SEP2 to SEP1 examples to compute peak and pulse rate and examine whether SEP1 suffers the same rate of decrease as SEP2. The number, location and season of the SEP1 occurrences analyzed are displayed in table I. This allow us to examine SEP1 frequency shift over 44 years (1970-2014), which is double the time period available for SEP2.

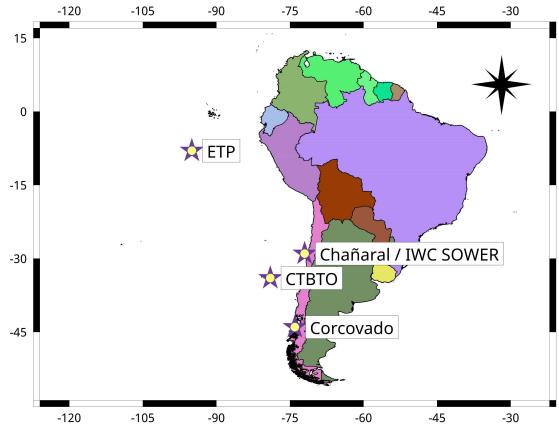


FIG. 4. Location of the recording stations used in this study (color online)

TABLE I. Characteristics of the data analyzed. Table includes name of the data set, references, place, season, number of phrases analyzed and sample rate of the data.

Data Set	lat (S)/ long (W)	year	Austral season	nb. of phrases	samp. f_s (Hz)
ETP ^a	$8^\circ/95^\circ$	1996	winter	40 / 50	100
IWC SOWER ^b	$29^\circ/72^\circ$	1997	sum.	- / 36	1000
ETP ^a	$8^\circ/95^\circ$	2002	winter	- / 50	250
CTBTO ^c	$34^\circ/79^\circ$	2007	fall	31 / -	250
CTBTO ^c	$34^\circ/79^\circ$	2009	fall	- / 50	250
Corcovado 1 ^d	$44^\circ/74^\circ$	2012	sum.	33 / 50	2000
Corcovado 1 ^d	$44^\circ/74^\circ$	2013	sum.	- / 50	2000
CTBTO ^c	$34^\circ/79^\circ$	2014	sum.	20 / 50	250
Corcovado 2	$44^\circ/74^\circ$	2016	sum.	- / 50	4000
Chañaral ^e	$29^\circ/72^\circ$	2017	sum.	- / 50	48000

^a ([Stafford et al., 1999](#))

^b ([Shabangu et al., 2018](#))

^c CTBTO <https://ctbto.org/>

^d ([Buchan et al., 2015](#))

^e ([Patris et al., 2017](#))

III. DATA ANALYSIS

A. Methods

To estimate the frequency decrease, we measured the peak frequency and pulse rate of units of each phrase of SEP song types.

1. Fast Fourier transform to measure the peak frequency

In most studies (McDonald *et al.*, 2009), (Gavrilov *et al.*, 2012), (Leroy *et al.*, 2018) frequency decrease has been assessed by measuring the frequency of the highest energy band (peak frequency f_{peak}) of a tonal part of a song unit. However, the frequency where energy is maximum can be highly variable due to environmental effects or sensor sensitivity even though the general set of frequency peaks within a single unit is very stable at subdecadal timescales. For the SEP2 song type, we decided to call 'peak frequency' the frequency of the band that is *on average* the one with maximum energy, which in this case is around 25 Hz. When maximum energy is shifted to the 32 Hz frequency band, we still measured the exact frequency of the band around 25 Hz, in order to ensure a standard metric for examining the decadal trend in the song frequencies.

For all selected units, we performed a FFT on the first 4 s of the unit by a routine in OCTAVE (Eaton *et al.*, 2009). We measured the peak frequency as the frequency corresponding to the maximum value (in modulus) of the FFT between 23 and 26 for unit A of each song type and 22 and 27 Hz for the other units.

Long term spectral averages (Gavrilov *et al.*, 2012) were not computed because of the complex nature of SEP songs compared, for example, to the Antarctic blue whale song type : the frequencies of different parts of the song overlap, blurring the long-term average.

2. Auto-correlation of the signal to measure the pulse rate

For SEP2, units are periodic, or harmonic, signals : the pulse rate (f_{pulse}) is the fundamental frequency of these units and the ratio $\frac{f_{peak}}{f_{pulse}}$ is an integer. This ratio is equal to 8 for unit A and 4 for units B, C and D. For SEP1 units, we checked first that units B and C are harmonic (see section III C for details). In this case, the pulse rate can be accurately measured by an summed auto-correlation of the signal when the sample rate of the recording is high (see the following section, about associated uncertainties). The auto-correlation function of a signal s is

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t)s^*(t+\tau)dt \quad (1)$$

(where s^* is the complex conjugate of s). In practice, s is a real signal, time T was limited by duration T_{signal} of the unit and our signal was sampled at a frequency f_s . We thus defined an approximation of $C(\tau)$ by

$$C_{T_{signal}, T_s}(\tau) = \sum_{n=0}^{\lfloor T_{signal}/T_s \rfloor} s(nT_s)s(nT_s + \tau) \quad (2)$$

where $T_s = \frac{1}{f_s}$ is the sampling interval and $\lfloor x \rfloor$ is the integer part of a real x . Here, we have $T_{signal} = 4$

s. If the signal s is harmonic, the function $C(\tau)$ has maximums when τ is a multiple of the period. For a description of auto-correlation techniques see for example (Mellinger and Clark, 1997).

For each unit, we computed the approximate auto-correlation function (using an OCTAVE dedicated routine) for $\tau \in [0 : t_{correl} = 1$ s] with a step of T_s (see figure 5). A low-pass filter (fifth order Butterworth with frequency cut-off at 150 Hz) was applied before the auto-correlation to reduce high frequency noise.

To obtain a maximum likelihood of the pulse frequency measurement, we performed a refinement of the auto-correlation method (Wise *et al.*, 1976), involving the computation of the summed auto-correlation function

$$g(t) = \frac{t}{t_{correl}} \sum_{n=1}^{\lfloor t_{correl}/t \rfloor} C_{T_{signal}, T_s}(nt) \quad (3)$$

We computed this function for all values of t between 0 and t_{correl} with a step T_s . This function has a peak for t equal to the period. We thus measured the corresponding time T_{pulse} of the highest peak of the summed auto-correlation in the interval $t \in [0.15; 0.175]$ s (corresponding to frequencies between 5.71 and 6.66 Hz) which gives the frequency $f_{pulse} = \frac{1}{T_{pulse}}$.

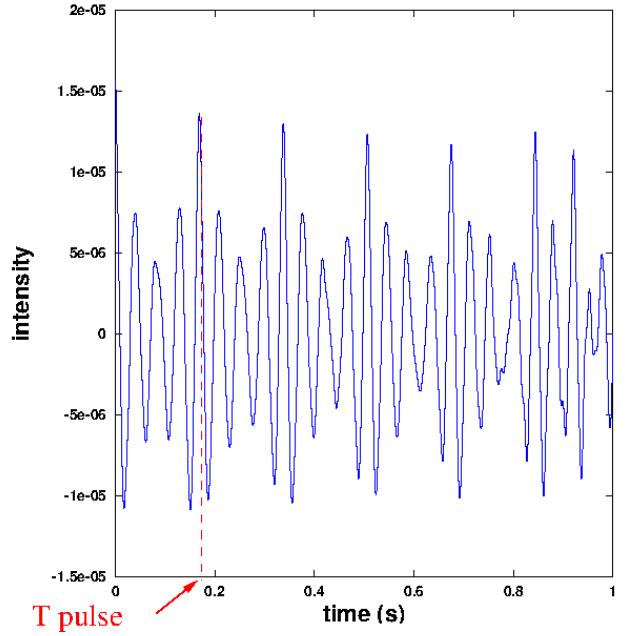


FIG. 5. Graph of the auto-correlation $C_{T_{signal}, T_s}(\tau)$ of unit C : the maximum of correlation for $T_{pulse} \simeq 0.17$ s corresponds to a frequency $f_{pulse} \simeq 6$ Hz. The time T_{signal} is 4 s.(color online)

3. Error in frequency estimation

Uncertainties arise from three main sources : the inherent error of each method (quantification error) in measuring f_{pulse} and f_{peak} , ambient noise and the intrinsic dispersion in whale vocalizations. We assessed separately these three causes of uncertainty in the measurements.

a. Uncertainties due to the method : quantification errors.

Measuring peak frequency by means of a FFT cannot be more precise than the frequency step of the FFT (quantification of the frequency). Given that units C and D are around $T_{signal} = 4$ s long, the highest resolution FFT that can be computed is $f_s \times T_{signal}$ points. This results in a precision in frequency of $\frac{f_s}{f_s \times T_{signal}} = \frac{1}{4} = 0.25$ Hz. We note that this uncertainty is $1/T_{signal}$ and thus does not depend on the sample rate f_s .

On the other hand, the quantification error of the summed auto-correlation method depends strongly on f_s . To estimate f_{pulse} , assuming that the recording device has a sample rate f_s , the uncertainty in time ΔT_{pulse} when we measure T_{pulse} is thus at least of the order of $1/f_s$. We have $f_{pulse} = 1/T_{pulse}$ so the corresponding uncertainty in frequency $\Delta f_{pulse} = \Delta T_{pulse}/T_{pulse}^2 = f_{pulse}^2 \Delta T_{pulse} \simeq f_{pulse}^2/f_s$. In the case of a sample rate of 48 kHz and for a measured frequency f_{pulse} around 6 Hz, the quantification error is $\Delta f_{pulse} \simeq 10^{-3}$ Hz. But for $f_s = 2$ kHz, we have $\Delta f_{pulse} \simeq 0.05$ Hz and for $f_s = 100$ Hz, we have $\Delta f_{pulse} \simeq 0.2$ Hz.

We can also compute (and compare) the relative quantification error $\Delta f/f$. For our signals, we have $f_{pulse} \simeq 6$ Hz and $f_{peak} \simeq 24$ Hz. The relative error of f_{peak} measurement is thus $\Delta f_{peak}/f_{peak} = 1/(t_{signal} \times f_{peak}) \simeq 1\%$ for each recording. The relative error of f_{pulse} measurement depends on the sample rate: $\Delta f_{pulse}/f_{pulse} = f_{pulse}/f_s$. It becomes smaller than 1% for f_s greater than 400 Hz ($f_s = 100$ Hz leads to $\Delta f_{pulse}/f_{pulse} \simeq 6\%$, $f_s = 2000$ Hz leads to $\Delta f_{pulse}/f_{pulse} \simeq 0.3\%$). Thus, pulse rate measurement has a smaller systematic relative uncertainty than peak frequency measurement for f_s greater than 400 Hz.

b. Uncertainty due to noise. To compute SNR, the following approach was used: The energy of a unit of duration T_{signal} is proportional to $\int_0^{T_{signal}} |s(t)|^2 dt$ (Au and Hastings, 2008). We computed an approximation of the energy (where the coefficient A depends on the sampling rate but is constant for a given signal and will not appear in the SNR) :

$$E_{SEP2} = A \sum_{n=0}^{\lfloor T_{signal}/T_s \rfloor} |s(nT_s)|^2$$

We measured the energy of each unit C and D by computing the energy E of the signal during 4s. A band-pass filter (fifth order Butterworth with frequency band 5-50 Hz) was applied before the computation of energy. We then calculated the SNR by estimating the energy E_N of the background noise at a time selected manually before or after each SEP2 phrase, using the same formula and during the same T_{signal} . We compute $SNR_{(dB)} =$

$10 \log_{10}(\frac{E_{SEP2}}{E_N})$ for each SEP2 song phrase. The SNR varied from 1 dB to 40 dB in the 436 selected SEP2 phrases.

To check each method's resistance to noise, we selected one song from the 14th of February 2012 in Corcovado with high SNR (around 40 dB) and we added background noise (taken from the same recording) with increasing level, resulting in a deterioration of the SNR. We then measured the peak frequency and pulse rate.

The measurement of peak frequency by means of a FFT is robust despite increasing background noise: for all levels of noise measured, the main error in the measurement comes from the quantification error. The main noises in the recordings are: short-duration (less than 1 s) low frequency (less than 30-40 Hz) sounds that are especially strong in bad weather and long tonal sounds from ship motors. As the FFT is a linear process and signal to noise ratios were sufficiently high, these sounds did not prevent us from accurately measuring peak frequency. As for the measurement of the pulse rate, these noises seemed to have a higher influence on measurement, probably given that auto-correlation is a non-linear process. By performing several measurements of f_{pulse} for different noise levels, we estimated the uncertainties, which were on the order of 0.05 Hz or less, and shown as error bars in figures 6 and 7.

c. Intrinsic dispersion of frequencies. In theory, intrinsic dispersion is due to the difference between two different sounds emitted by two different whales; two different sounds emitted by the same whale; or two sounds emitted by the same whale but affected differently by propagation effects. For example, in the latter case, the Doppler effect changes the received frequency by $f_{received} = \frac{1}{1-v/c} \times f_{emitted}$ where c is the sound speed and v is the radial speed of the whale relative to the recording device. For a typical value of $v/c \simeq 1/1000$, the difference in the frequency estimation is of the order of 0.1%. That is, for a frequency of 25 Hz, a difference of 0.025 Hz is obtained (see (Miller et al., 2014b) for a detailed analysis). Dispersion uniquely caused by sound production (the former two cases) is extremely difficult to estimate and seems very small (Hoffman et al., 2010).

To estimate the intrinsic dispersion, regardless of its cause, we computed the standard deviation of results obtained for each year for f_{peak} and f_{pulse} . This standard deviation can also be affected by the two precedent sources of uncertainty (background noise and quantification of measurements). These different causes of uncertainty can be separated theoretically. Observationally, they are usually not separable. However, in some instances they appear clearly, as for instance when standard deviation is zero due to quantification errors (quantification errors are then masking the intrinsic dispersion).

d. Representation of uncertainties. For each year, we computed the quantification error, the error due to noise and the standard deviation of measured values, and we

chose the greater of the three values to represent error graphically (see figures 6 and 7).

B. Application to SEP2 and results

As presented in section III A, we measured peak and pulse frequencies for 436 units C and D for SEP2. The measure of these frequencies for units A and B did not give precise results since these units usually have lower SNR and are somewhat modulated in frequency (see figure 2).

1. Shift in peak frequency

Figure 6 clearly shows the decrease in peak frequency for the two units C and D between 1996 and 2017. As found for other blue whale song types (McDonald *et al.*, 2009), the shift in frequency seems to be linear over time.

The peak frequency of unit C dropped from 25.8 ± 0.25 Hz in 1996 to 23.6 ± 0.25 Hz in 2017, an average decrease of 0.10 ± 0.03 Hz per year. For unit D , peak frequency dropped from 25.8 ± 0.25 Hz in 1996 to 23.5 ± 0.25 Hz in 2017, resulting in a decrease of 0.11 ± 0.03 Hz per year. For almost all years, the main source of uncertainty was quantification error. This means that this method has reached its intrinsic limit of precision for analyzing this type of sound.

2. Shift in pulse rate

Figure 7 displays the pulse rate for SEP2 blue whale song type over 20 years, from 1997 to 2017. The results for 1996 were not plotted because auto-correlation methods produced unreasonable values due to the very low sample rate of these recordings, ($f_s = 100$ Hz).

In general, the relative error for pulse rate measurements was higher than for peak frequency measurements, although quantification errors can be reduced (typically with a higher sample rate of recording) for pulse rate measurement but not for peak frequency. Recordings with a high sample rate and high SNR usually had lower associated uncertainty (eg. years 2012 and 2013). Moreover, calculating an average reduces the uncertainty when error is introduced due to noise or intrinsic dispersion, but it usually does not reduce the error due to quantification.

The decrease also appears linear for the pulse rate. This is consistent with a harmonic signal and the fixed ratio $\frac{f_{peak}}{f_{pulse}}$. The pulse rate of unit C dropped from 6.44 ± 0.06 Hz in 1997 to 5.87 ± 0.10 Hz in 2017, an average decrease of 0.03 ± 0.01 Hz per year. For unit D , the pulse frequency dropped from 6.45 ± 0.06 Hz in 1997 to 5.87 ± 0.10 Hz in 2017, resulting in a decrease of 0.03 ± 0.01 Hz per year.

C. Application to SEP1 and results

First, we checked if SEP1 units were harmonic or not by computing the values of f_{peak} and f_{pulse} for forty SEP1 phrases with high SNR selected from the 2012 and

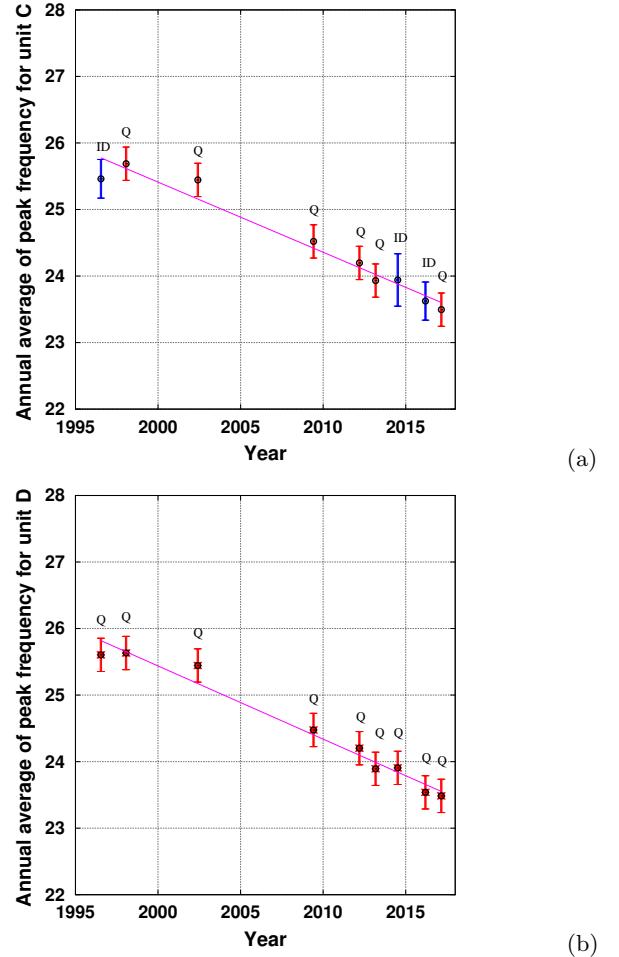


FIG. 6. Temporal evolution of the peak frequency of units C (top panel,(a)) and D (bottom panel,(b)), computed by a Fast Fourier transform of the signal. The error bars color code is : red when quantification error is the greatest source of error, blue when intrinsic dispersion is the greatest source of error. A letter corresponding to the largest source of error is given on top of each error bar. The line correspond to the linear interpolation by least-square error of the points displayed in the graph (the coefficient of determination R^2 being close to 0.95).(color online)

2014 data sets. f_{pulse} was measured by an autocorrelation of the envelope of the signal. We found that $\frac{f_{peak}}{f_{pulse}} = 6.23 \pm 0.50$ for unit A , 3.06 ± 0.09 for unit B and 4.07 ± 0.09 for unit C . We thus assumed that the peak frequency of units B and C is an integer multiple of the pulse rate (as for units of SEP2) and therefore SEP1 units B and C are also harmonic.

We then measured both pulse rate (by summed auto-correlation of the signal as in section III A 2) and peak frequency of 107 high SNR units B and C of SEP1 selected from four years of data (see table I). We also took the value of the pulse rate for 1970 given in (Cummings and Thompson, 1971). We did not have ac-

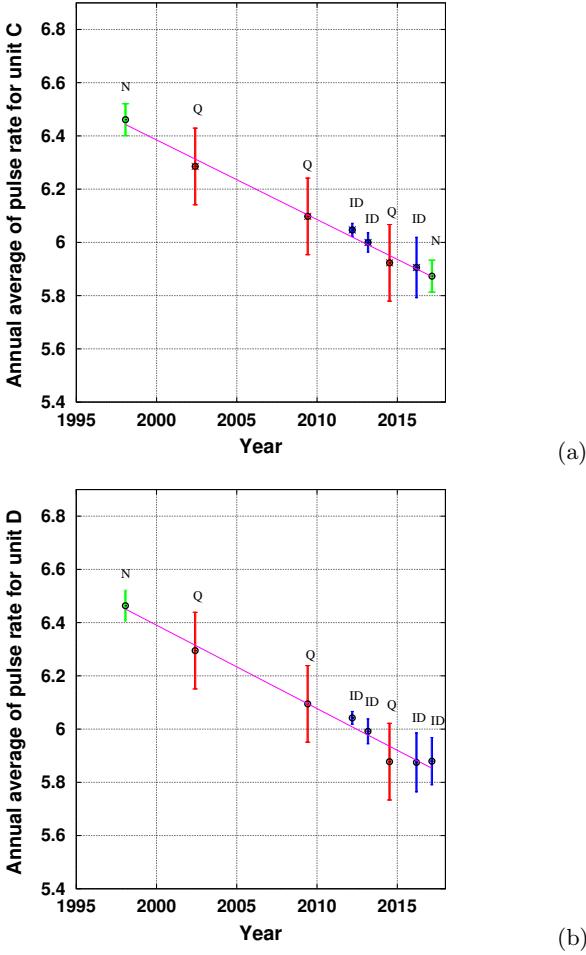


FIG. 7. Evolution of the pulse rate of units *C* (up,(a)) and *D* (down,(b)). Error bars are red when quantification error is the greatest source of error, green when error due to the noise is the greatest source of error, blue when intrinsic dispersion is the greatest source of error. A letter corresponding to the largest source of error is given on top of each error bar. The line correspond to the linear interpolation by least-square error of the points displayed in the graph (the coefficient of determination R^2 being close to 0.98).(color online)

cess to the precise values of peak frequencies for 1970 because in this paper peak frequencies are given only at a precision of 1/3 octave. For 1996, the low sampling rate (100 Hz) did not enable us to make a precise measure of the pulse rate.

Considering that $\frac{f_{peak}}{f_{pulse}} = 3$ for unit *B* and $\frac{f_{peak}}{f_{pulse}} = 4$ for unit *C*, we estimated the long term decline of f_{pulse} combining both methods (see figure 8).

The decrease is clearly linear for pulse rate of units *B* and *C* and is of 0.029 ± 0.005 Hz/year and 0.037 ± 0.005 Hz/year respectively, which compares well with SEP2 (unit *C*: 0.03 ± 0.01 Hz/year and unit *D*: 0.03 ± 0.01 Hz/year). Interestingly, the two units *B* and *C* of the SEP1 song types are not decreasing at the same rate. In

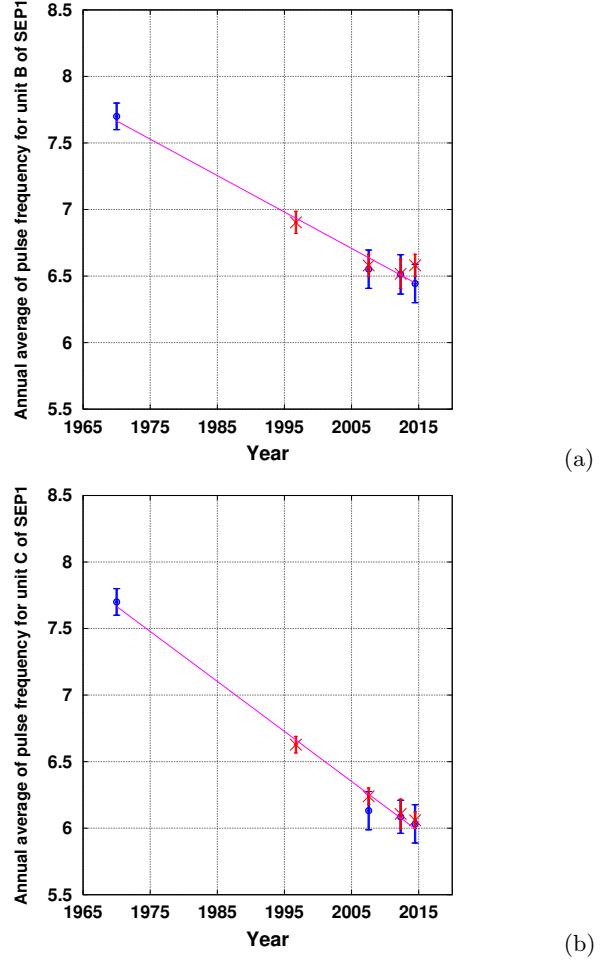


FIG. 8. Pulse rate decrease in SEP1 phrases units. In blue (circles) the measures of pulse rate by mean of a summed auto-correlation method except the value of 1970 which is taken from literature (Cummings and Thompson, 1971). In red (crosses), the points are computed by estimation of the frequency peak (by a FFT) divided by 3 and 4 for units *B* and *C* respectively (figures (a) and (b)). the errors bars are computed as for SEP2. The line correspond to the linear interpolation by least-square error of the points displayed in the graph.(color online)

1970, these two units were quite similar in term of frequencies (Cummings and Thompson, 1971). Since then, the two fundamental frequencies have decreased at a different rate and each unit appear nowadays quite different in time-frequency representation, see figure 1.

Although SEP1 and SEP2 have similar time and frequency characteristics, and appear to occur with the same temporal distribution (Buchan *et al.*, 2015), it remains unclear whether these song types indicate the presence of one or two acoustic groups.

IV. DISCUSSION

A. Comparison of the two methods to compute frequency shift

We note that depending on the data, either peak frequency or pulse rate measurements can be used for these units and give similar results. Error analysis shows that for data with a high sample rate (higher than 400 Hz), the pulse rate measurement with summed auto-correlation method has the best precision.

In the case where occurrences of a song type are scarce and several data sets are used, the combination of these two methods can give a better understanding of the trend. Nevertheless, we have to be cautious with the long-term analysis of SEP1 frequencies due to the small number of SEP1 occurrences analyzed giving only 5 data points.

B. Comparison with frequency shifts in other regional song types

To compare our results with other frequency shifts that have been reported, we extracted data about peak frequency from published papers (See Table II). Several song types do not present pulsed units. Therefore a comparison of pulse rates is not relevant. Nevertheless a clarification, for each pulsed unit of each song type, of the link between the fundamental frequency and the pulse rate could enable to understand better each song type, its production and to realize better measures of frequency trends.

For the different song types, the values of the peak frequencies are very different (many of them are around 20Hz but other are around 30Hz and, in the north of Indian Ocean, it is near 100Hz). Thus, to compare different data, we computed the absolute values of the average decrease of the peak frequency during one year as % of the value estimated in a reference year. We chose the year 2000 as reference year and calculated, for each song type, the mean value of the peak frequency during this year, by linear interpolation. The results are presented in table II.

The frequency decrease observed here in SEP2 song types is comparable to that of other song types reported in the table II. Interestingly, all song types from the north and west Pacific Ocean have a greater decrease than songs from other oceans and song types from the Indian Ocean have a smaller decrease than in other oceans.

Two different decreases are given for the southeast Indian ocean because two different units of the same song type have been measured. Recently, the last two units of the North Indian song type had been proved to decrease at different rates as in our study about SEP1 units B and C ([Miksis-Olds et al., 2018](#)).

Studies have shown that several blue whale song types have intra-annual variations ([Gavrilov et al., 2012](#)), ([Miller et al., 2014a](#)) and ([Leroy et al., 2018](#)). In our case we do not have such temporal precision and we

TABLE II. Comparison of our results to other works

Song type	Period studied	Frequency (Hz)	Decrease in % of 2000's value / year
NE Pac. ^a	1963-2008	21.9 to 15.2	0.91
SW Pac. ^{ad}	1964-2013	25.3 to 17.5	0.81
NW Pac. ^a	1968-2001	23 to 17.9	0.86
N Atl. ^a	1959-2004	23 to 17.6	0.66
S Ocean ^{ace}	1995-2014	28.5 to 25.8	0.51
N Indian ^{af}	1984-2012	116 to 100	0.53
SE Indian ^a	1993-2000	19.5 to 19.0	0.38
SE Indian ^b	2002-2010	72.5 to 69.5	0.48
W Indian ^g	2007-2015	34.7 to 33.7	0.35
SEP 1 (unit B)	1970-2014	23.1 to 19.3	0.42
SEP 1 (unit C)	1970-2014	30.8 to 24.3	0.56
SEP 2 (unit C)	1996-2017	26.5 to 23.5	0.44
SEP 2 (unit D)	1996-2017	26.5 to 23.4	0.45

^a ([McDonald et al., 2009](#))

^b ([Gavrilov et al., 2011](#))

^c ([Gavrilov et al., 2012](#))

^d ([Miller et al., 2014a](#))

^e ([Leroy et al., 2016](#))

^f ([Miksis-Olds and Nieuwirk, 2016](#))

^g ([Leroy et al., 2018](#))

cannot see these seasonal changes, which are masked by our error bars in figures 6 and 7.

C. Pulse rate and peak frequency decrease in other species

Fin whales emit song types composed of clearly separated low frequency sounds around 20 Hz ([Watkins et al., 1987](#)). These sounds are repeated at a nearly constant rate which is also called “pulse rate” in the literature. Even if fin and blue whales have very distinct song types, a joint decrease of the rate of pulses production and peak frequency has been recently noticed for fin whales songs in the northeast Pacific Ocean ([Weirathmueller et al., 2017](#)). Other examples of different decreases of pulse rates can be seen for fin whales in north Atlantic Ocean ([Morano et al., 2012](#)) or in northeast Pacific Ocean ([Širović et al., 2017](#)). In all these cases, the pulse rate and peak frequency are very different (f_{pulse} being around 0.1 Hz and f_{peak} around 20 Hz) and seem not linked by an integer ratio.

A frequency decrease has been found in an unidentified baleen whale “spot call” ([Ward et al., 2017](#)), with sudden increase of peak frequency after some years of constant decrease. This unidentified baleen whale may be a southern right whale ([Ward et al., 2017](#)).

This similarity of trends in frequencies of blue whale song types and other species sound emission (pulse rate

and peak frequency decrease over years) has to be addressed and can be a clue to understand the reason of such trends present in the whole world and in different species of baleen whales.

V. CONCLUSIONS

We observed a linear frequency shift that is very similar to other blue whale song frequency shifts in both SEP1 and SEP2 song types.

Future studies of frequency trends of song types of baleen whales should measure both peak frequency and pulse rate. A precise value of pulse rate can be obtained whenever the signal is harmonic, the sampling rate is high enough and the SNR good and it is specially relevant to measure it when the sound is low frequency and not very long, as in most of blue whale song types.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the help of Explorasub diving center (Chile), Agrupación turística Chañaral de Aceituno (Chile), ONG Eutropia (Chile), Valparaiso university (Chile), the international institutions and research programs CTBTO, IWC, BRILAM STIC AmSud 17-STIC-01. We are grateful to colleagues at DCLDE 2018 and SOLAMAC 2018 conferences for useful comments on the preliminary version of this work. In this work we used only the free and open-source softwares Latex, Audacity and OCTAVE.

- Au, W., and Hastings, M. (2008). *Principles of marine bioacoustics* (Springer).
- Berthommier, F., and Glotin, H. (1999). "A measure of speech and pitch reliability from voicing," in *Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI)*, EPFL-CONF-82549, Scandinavian AI Society, pp. 61–70.
- Buchan, S., Hucke-Gaete, R., Rendell, L., and Stafford, K. (2014). "A new song recorded from blue whales in the corcovado gulf, southern chile, and an acoustic link to the eastern tropical pacific," *Endangered Species Research* **23**, 241–252.
- Buchan, S., Stafford, K., and Hucke-Gaete, R. (2015). "Seasonal occurrence of southeast pacific blue whale songs in southern chile and the eastern tropical pacific," *Marine Mammal Science* **31**(2), 440–458.
- Cummings, W., and Thompson, P. (1971). "Underwater sounds from the blue whale, balaenoptera musculus," *Journal of the Acoustical Society of America* (50), 1193–1198.
- Eaton, J. W., 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), <http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter>, ISBN 1441413006.
- Gavrilov, A., McCauley, R., and Gedamke, J. (2012). "Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of antarctic blue whales," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**(6), 4476–4480.
- Gavrilov, A., McCauley, R., Salgado-Kent, C., Tripovitch, J., and Wester, C. B. (2011). "Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time," *J. Acoust. Soc. Am.* **130** (6), December 2011 **130**(6), 3651–3660.
- Hoffman, M., Garfield, N., and Bland, R. (2010). "Frequency synchronization of blue whale calls near pioneer seamount," *The Journal of the Acoustical Society of America* **128**(1), 490–494 doi:10.1121/1.3446099.

- Leroy, E., Samaran, F., Bonnel, J., and Royer, J.-Y. (2016). "Seasonal and diel vocalization patterns of antarctic blue whale (balaenoptera musculus intermedia) in the southern indian ocean: A multi-year and multi-site study," *PLoS ONE* **11**(11): e0163587 doi:10.1371/journal.pone.0163587 .
- Leroy, E. C., Samaran, F., Bonnel, J., and Royer, J.-Y. (2017). "Identification of two potential whale calls in the southern indian ocean, and their geographic and seasonal occurrence," *The Journal of the Acoustical Society of America* **142**, 1413–1427.
- Leroy, E. C., Royer, J.-Y., Bonnel, J., and Samaran, F. (2018). "Long Term and Seasonal Changes of Large Whale Call Frequency in the Southern Indian Ocean," *Journal of Geophysical Research: Oceans* **123**, 8568–8580.
- McDonald, M., Hildebrand, J., and S.Mesnick (2009). "Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs," *Endangered species research* **9**, 13–21.
- McDonald, M., Mesnik, S., and Hildebrand, J. (2006). "Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: using song to identify populations," *J. Cetacean Res. Manage.* .
- Mellinger, D., and Clark, C. W. (1997). "Methods for automatic detection of mysticete sounds," *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* **29**: 1-4, 163–181.
- Miksis-Olds, J., and Niekirk, S. (2016). "Relating the decreasing frequency of sri lankan pygmy blue whale calls to the local soundscape," *The Journal of the Acoustical Society of America* **139**.
- Miksis-Olds, J. L., Niekirk, S. L., and Harris, D. V. (2018). "Two unit analysis of Sri Lankan pygmy blue whale song over a decade," *J. Acoust. Soc. Am.* **144**(6).
- Miller, B., Leaper, R., Calderan, S., and Gedamke, J. (2014b). "Red shift, blue shift : Doppler shifts and seasonal variation in the tonality of antarctic blue whale song," *PLoS ONE* **9**(9): e107740. doi:10.1371/journal.pone.0107740 .
- Miller, B. S., Collins, K., Barlow, J., Calderan, S., Leaper, R., McDonald, M., Ensor, P., Olson, P., Olavarria, C., and Double, M. (2014a). "Blue whale vocalizations recorded around new zealand : 1964–2013," *J. Acoust. Soc. Am.* **135**(3), 1616–1623.
- Morano, J., Salisbury, D., Rice, A., Conklin, K., Falk, K., and Clark, C. (2012). "Seasonal and geographical patterns of fin whale song in the western north atlantic ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* **132**(2), 1207–1212 <http://dx.doi.org/10.1121/1.4730890>.
- Oleson, E. M., Calambokidis, J., Burgess, W. C., McDonald, M. A., LeDuc, C. A., and Hildebrand, J. A. (2007). "Behavioral context of call production by eastern north pacific blue whales," *Mar Ecol Prog Ser* **330**, 269–284.
- Patris, J., Malige, F., and Glotin, H. (2017). "Construction et mise en place d'un système fixe d'enregistrement à large bande pour les cétacés "bombyx 2" îsla de chañaral, été austral 2017," Technical Report, LIS DYNI, Toulon university 2017-03 .
- Patris, J., Malige, F., Glotin, H., Asch, M., and Buchan, S. J. (2019). "A case study of biological pulsed sound : the blue whales southeast Pacific song unit, models and properties," submitted to *J. Acoust. Soc. Am.* ..
- Saddler, M., Bocconcini, A., Hickmott, L. S., Chiang, G., Lande-Briones, R., Bahamonde, P. A., Howes, G., Segre, P. S., and Sayigh, L. S. (2017). "Characterizing chilean blue whale vocalizations with dtags : a test of using tag accelerometers for caller identification," *Journal of Experimental Biology* **220**, 4119–4129 doi:10.1242/jeb.151498.
- Shabangu, F., Stafford, K., Findlay, K., Rankin, S., Ljungblad, D., Tsuda, Y., Morse, L., Clark, C., Kato, H., and Ensor, P. (2018). "Overview of the iwc sower cruise circumpolar acoustic survey data and analyses of antarctic blue whale calls within the dataset," Technical report.
- Stafford, K. M., Niekirk, S. L., and Fox, C. G. (1999). "Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical pacific," *J. Acoust. Soc. Am.* **106**(6), 3687–3698.
- Thode, A. M., Blackwell, S. B., Conrad, A. S., Kim, K. H., and Macrander, A. M. (2017). "Decadal-scale frequency shift of migrating bowhead whale calls in the shallow beaufort sea," *J. Acoust. Soc. Am.* **142**(3).
- Širović, A., Oleson, E., Buccowich, J., Rice, A., and Bayless, A. R. (2017). "Fin whale song variability in southern califonia and

- the gulf of california," *Scientific reports* **7** doi:10.1038/s41598-017-09979-4.
- Ward, R., Gavrilov, A., and McCauley, R. (2017). "spot call: A common sound from an unidentified great whale in australian temperate waters," *J. Acoust. Soc. Am. Express Letters* **142** <http://dx.doi.org/10.1121/1.4998608>.
- Weirathmueller, M. J., Stafford, K. M., Wilcock, W. S. D., Hilmo, R. S., Dziak, R. P., and Trehu, A. M. (2017). "Spatial and temporal trends in fin whale vocalizations recorded in the ne pacific ocean between 2003-2013," *PLOS ONE* **12**(10) <https://doi.org/10.1371/journal.pone.018612>.
- Watkins, W., ed. (1968). *The Harmonic interval fact or artifact in spectral analysis of pulse train*, **2** (Pergamon Press-Oxford and New-York, American Museum of Natural History, New York).
- Watkins, W. A., Tyack, P., Moore, K. E., and Bird, J. E. (1987). "The 20-Hz signals of finback whales (*Balaenoptera physalus*)," *J. Acoust. Soc. Am.* **82**(6).
- Wise, J., Caprio, J., and Parks, T. (1976). "Maximum likelihood pitch estimation," in *Transactions on acoustics, speech and signal processing*, edited by IEEE, Vol. ASSP-24.

Chapitre 6

Vers une localisation de la source du chant par inversion monohydrophone

Dans la partie 1.5, nous avons abordé le thème de la localisation d'une source acoustique. Dans le contexte de la bioacoustique, il est important de pouvoir localiser une source, c'est-à-dire l'animal émetteur du son, notamment dans le cadre de l'estimation de la taille des populations. Par ailleurs, il a été vu également que la localisation à l'aide d'un seul capteur, bien qu'à priori complexe, présente des avantages fondamentaux, notamment parce que la majorité des données recueillies actuellement et dans le passé sont dans ce cadre.

Dans ce chapitre, nous présentons un travail exploratoire consistant à chercher une méthode de localisation monohydrophone qui soit adaptée à notre signal d'étude, en l'occurrence le chant de la baleine bleue dit 'SEP2' qui a été décrit lors des précédents chapitres. Cette méthode de localisation monohydrophone originale est basée sur une modélisation fine du champ acoustique réalisée grâce à des méthodes haute performance. Nous présentons un rapide état de l'art sur la localisation monohydrophone, ainsi que les détails de mise en place de notre méthode, puis nous exposons nos premiers résultats sur le sujet. En conclusion, nous notons que bien que ces résultats soient encourageants, cette première ouverture vers des méthodes basées sur les éléments spectraux nécessitera d'être mieux testée, notamment en ce qui concerne sa robustesse aux imprécisions sur les paramètres environnementaux.

6.1 Etat de l'art de la localisation mono-hydrophone

6.1.1 Localisation mono-hydrophone

La localisation d'une source sonore sous-marine est un problème classique en l'acoustique océanique, et qui s'est particulièrement développé à partir des années 1970 avec l'arrivée des calculateurs (voir Hinich 1973 [57]). En général, il est résolu grâce à des données issues de multiples capteurs, comme il a été rappelé dans la partie 1.5, cependant, la localisation mono-capteur est également étudiée. On peut citer le travail de Clay, 1987 [26] qui utilise un renversement temporel pour calculer la réponse impulsionale du milieu, dans le cadre d'un guide de Pekeris à deux dimensions (voir chapitre 2). Li et Clay, 1987 [73] complète l'étude théorique par une expérience menée en laboratoire avec un guide d'onde à air. L'étude théorique est complétée par Frazer et Pecholcs, 1990 [44] qui testent différents estimateurs grâce à des simulations, et une vérification expérimentale de ces méthodes est proposée par Lee, 1998 [70]. Les délais d'arrivée dans un guide d'onde sont utilisés par Jesus, 2000 [60] pour obtenir la position d'une source.

De façon proche, l'étude de la propagation modale (arrivée des modes) dans l'océan profond, assimilé à un guide proche de celui de Pekeris, permet à Kuperman et al. 2001 [64] de localiser une source située à plusieurs milliers de kilomètres avec une précision comparable à celles obtenues avec des méthodes impliquant plusieurs capteurs.

6.1.2 Application à la localisation de cétacés

Les méthodes décrites ci-dessus ont été appliquées avec succès à la localisation de cétacés. En effet, ceux-ci sont des sources puissantes, présentes dans différents types de milieux, et présentant des types de signaux également très variés, ce qui autorise une grande variété de méthodes.

Les méthodes simples basées sur des mesures d'intensité sonores sont en général assez peu précises, même si elles permettent parfois d'avoir un ordre de grandeur de la distance de la source (voir Samaran, 2010 [123] ou Doh, 2014 [34]). Ceci est d'autant plus vrai en zone profonde, où le guide d'onde est plus régulier et peut être modélisé par une formule de type 'équation du sonar' de façon relativement efficace, et sur de grandes distances. Cependant ils supposent une connaissance a priori de l'intensité du signal émis qui n'est pas aisée à obtenir : Stimpert et al. 2015 [136] par exemple travaillent sur des signaux acquis par un hydrophone directement placé sur la baleine. L'intensité du signal est variable et n'est pas significativement différente entre un signal émis par la baleine portant l'hydrophone et une baleine se trouvant à quelques dizaines de mètres de distance.

Les méthodes plus complexes tendent le plus souvent à retrouver la distance entre la baleine et l'hydrophone à partir d'arrivées multiples d'un signal bref. Elles sont applicables dans le cas où les signaux empruntant les différents chemins schématisés sur la figure 1.11 sont séparables dans le temps. Des techniques très proches des mesures de TDOA font intervenir des 'hydrophones virtuels', de la même façon qu'on définit la source virtuelle d'un rayon lumineux réfléchi par un miroir. Ces méthodes ne peuvent être utilisées que sur des signaux brefs et assez peu directifs, pour lesquels on peut avoir plusieurs échos mesurables (voir notamment le travail de Nosal et al. 2006 [96] sur des signaux de cachalots). Nous avons appliqué ce type de méthode pour retrouver la position d'un grand dauphin *Tursiops truncatus* enregistré dans notre corpus : pour cet enregistrement, nous disposons de sons très particuliers (assimilables à des 'clics' basse fréquence, ou sons brefs basse fréquences - SBBF) dont deux ou trois échos sont clairement perceptibles. Le calcul est présenté dans l'annexe B.

Mc Donald et al. 1999 [82] reconstruisent la position de rorquals communs (*Balaenoptera physalus*) grâce à une simulation de la propagation du son par des méthodes de type 'rayon acoustique', quand Tiemann et al. 2006 [141] l'appliquent à des signaux émis par des cachalots (*Physeter macrocephalus*).

Les méthodes basées sur la séparation des modes acoustiques s'appliquent à un environnement de type guide d'onde en petits fonds, avec des fréquences basses et des distances moyennes à longues. Ces méthodes (dites de temps d'arrivée des modes ou TAM) permettent de retrouver la distance mais aussi la profondeur à laquelle le son a été émis. Grâce à une technique adaptée de filtrages des modes, Bonnel et al. 2014 [11] réussissent à localiser les baleines du Groenland (*Balaena mysticetus*), la même méthode étant employée pour des baleines franches nord-atlantiques *Eubalaena glacialis* par Thode et al. en 2017 [139].

Harris et al. 2013 [55] ainsi que Matias et al. 2015 [81] proposent une approche différente, basée sur un récepteur différent : il s'agit d'un accéléromètre, utilisé en sismologie pour capter les trois composantes de la position ou de la vitesse particulière, une autre façon de décrire l'onde sonore (voir chapitre 2). Ces capteurs sont nécessaires pour caractériser les ondes se propageant dans les solides, mais ils peuvent être également utiles dans l'eau, et intéressent de plus en plus les biologistes, notamment parce qu'il a été mis en évidence récemment que beaucoup de poissons sont plus sensibles aux mouvements particulaires provoqués par le passage de l'onde qu'à la pression

proprement dite (voir Carroll et al. 2016 [22]). Les travaux mentionnés permettent de positionner une baleine se trouvant à quelques kilomètres du récepteur.

6.1.3 L'intérêt des méthodes par éléments spectraux

Les travaux cités dans la section précédente constituent des précédents encourageants pour localiser une baleine-source. Cependant ils ne s'appliquent pas immédiatement au cas de sons longs tels les chants de baleines bleues (*Balaenoptera musculus*).

En effet, ils sont basés en général sur la distinction dans le temps des différents 'modes' de propagation du signal. Cette méthode est liée à la résolution du problème de propagation sonore pour un son court à large bande, pour lequel on peut distinguer des fréquences se propageant à différentes vitesses (voir chapitre 2). Un avantage de cette méthode est qu'elle permet notamment de mener les calculs de façon analytique pour une approximation dite 'guide de Pekeris' relativement simple, ce qui permet une interprétation physique du guide d'onde très élégante. Pour des guides d'onde plus complexes, les calculs sont menés grâce à des méthodes de résolution par informatique mais la méthode reste très robuste aux variations des paramètres environnementaux. Cependant, pour des signaux longs moins riches en fréquence, la modification du signal est plus proche d'une réverbération que d'une arrivée par mode. Il est donc difficile de séparer les modes pour ce type de signal. On peut voir un exemple de ce problème dans les différents types de signaux de notre corpus correspondant aux émissions de baleines bleues. Pour un même environnement et une même espèce, on distingue temporellement différents modes pour le signal modulé en fréquence ('D call') mais ils ne sont pas apparents pour le cas de la phrase dite 'SEP2' (chant du pacifique sud oriental).

Dans ce cadre, nous avons donc décidé de tester la faisabilité d'une méthode de localisation mono-hydrophone proche des méthodes d'inversion dites 'Matched Field processing', mais basée sur une modélisation haute performance adaptée à notre problème. Nous nous situons en effet dans un cas expérimental caractérisé par les paramètres suivants :

- son basse fréquence (de l'ordre de quelques dizaines de Hertz),
- son pulsé long, peu localisé dans le temps, harmonique,
- distances faibles à moyennes (distance maximale de l'ordre de 10 km),
- petits fonds (d'une demie longueur d'onde à quelques longueurs d'onde),
- bathymétrie très complexe (canal entre des îles, canyon profond entrant en biais par rapport au canal, ...),

La complexité du fond nous impose de choisir une méthode en trois dimensions, type de méthode en général très coûteuse en temps. Etant donné le contexte bathymétrique, il est nécessaire de tenir compte des effets retour, des diffractions, et en général de la plus grande complexité possible du champ acoustique créé par la source, ce que ne permettent pas les méthodes les plus rapides (par exemple de type équation parabolique, très utiles à plus grande échelle et pour des terrains plus réguliers, voir Lin 2019 [75]). Nous avons choisi une méthode dite par éléments spectraux (voir partie 2.3) qui possède toute la précision nécessaire et présente l'avantage d'être facilement parallélisable. En effet, les moyens actuels et notamment le calcul dans des grands centres de calcul nationaux rend envisageable ce qui ne l'était pas il y a quelques années. Les méthodes par éléments spectraux, historiquement très appliquées à la géophysique, ont largement été validées sur les calculs océanographiques (voir Cristini et Komatitsch, 2012 [29]). Ces méthodes servent notamment de référence pour de la localisation de source (Wang et al. 2019 [151]). Les méthodes haute performance sont très sensibles aux conditions environnementales et nécessitent une bonne connaissance du terrain et de la source, ce qui fera l'objet de ce chapitre. La suite de ce chapitre est donc consacrée à exposer la mise en place de notre méthode, les choix de modélisation et les relevés des paramètres physiques. On notera que nous avons commencé par une étude sur un terrain distinct de celui présenté au chapitre 3, pour des raisons techniques : nous n'avions pas encore de données propres lorsque nous avons commencé les tests de modélisation, et nous avons

donc dans un premier temps appliqué les calculs à un terrain au sud du Chili (en sortie du golfe de Corcovado), zone pour laquelle notre collègue Susannah Buchan nous a fourni des données de baleine bleue.

La localisation d'une source dans les conditions que nous présentons ici n'a à notre connaissance jamais  t t t e tentée, et les méthodes haute performance de calcul en forme d'onde complète (c'est-à-dire sans approximation autre que la discrétisation due à la résolution numérique) n'ont pas  t t  appliquées à ce genre de problème. Nous exposons dans ce chapitre (et dans le suivant) un travail préliminaire, qui relève avant tout de l'exploration de cette possibilité, et de la faisabilité de notre méthode.

6.2 Présentation de la méthode

6.2.1 Principe de réciprocité de la fonction de Green

Le problème de la localisation de source est essentiellement un problème inverse (voir par exemple Wang and Komatitsch 2019 [151] qui utilisent le même type de modèle physique). Les modèles de type éléments finis sont trop gourmands en temps de calcul pour que des méthodes d'inversion classiques soit applicables. En effet, celles-ci mettent en jeu un grand nombre de simulations faisant varier la position de la source, et la minimisation d'une fonction de coût dépendant de la position de la source. Dans notre cas, il n'est pas envisageable de répéter la simulation pour un ensemble de positions. Nous choisissons donc d'utiliser le principe de réciprocité, qui nous permet de n'effectuer qu'une seule simulation.

Le principe de réciprocité Le principe de réciprocité de la fonction de Green (demontré notamment dans l'ouvrage *Computational Ocean Acoustics* de Jensen et al. [59]) est l'equivalent acoustique du principe de Helmholtz en optique, qui s'exprime simplement selon l'adage classique du metteur en scène : si je peux te voir, tu peux me voir.

Dans un milieu supposé statique et linéaire, le principe de réciprocité pose que le signal n'est pas modifié lorsque l'on échange les positions respectives de la source et le récepteur. En d'autres termes, supposons qu'un signal initial S_e soit émis en un point A et reçu en un point B (le signal reçu est alors noté S_r). Alors, le principe de réciprocité affirme que le signal reçu en A lorsque S_e est émis en B est exactement S_r . Emission et réception jouent des r les interchangeables dans la propagation. Un test rapide avec le logiciel SPECFEM 2D est présenté sur la figure 6.1 : on constate que la différence entre un signal reçu en B alors qu'il avait  t t émis en A , et un signal reçu en A alors qu'il avait  t t émis en B est inférieure au bruit numérique d u à la simulation.

Plutôt que de modéliser la propagation depuis chaque point d'une grille de positions vers l'hydrophone, nous allons donc modéliser la propagation de l'onde acoustique *dès* l'hydrophone jusqu'à la grille des positions, qui comportera quelques milliers de points (variable selon les lieux et les simulations). Ce changement de point de vue est particulièrement adapté à un logiciel comme SPECFEM, qui permet de rajouter un nombre élevé de 'récepteurs' pour une seule simulation. En effet le champ acoustique résultant est calculé pour l'ensemble de la boîte (avec un maillage fin imposé par les performances exigées pour la simulation voir plus bas, section 6.2.2). Le fait de donner les résultats pour quelques milliers de lieux n'est donc pas coûteux en terme de temps de calcul (voir notamment la documentation du logiciel [131]), bien que ce soit naturellement demandeur en terme de stockage d'information (ce qui n'est malheureusement pas  vit able).

Selon les simulations effectuées, nous utilisons différentes géométries de grilles, adaptées au lieu choisi mais respectant la structure générale suivante : points séparés d'environ 200 mètres, grille plus ou moins centrée sur la position de l'hydrophone, trois ou quatre couches en profondeur (nous nous situons toujours dans des zones peu profondes). Cette structure générale conduit à une grille

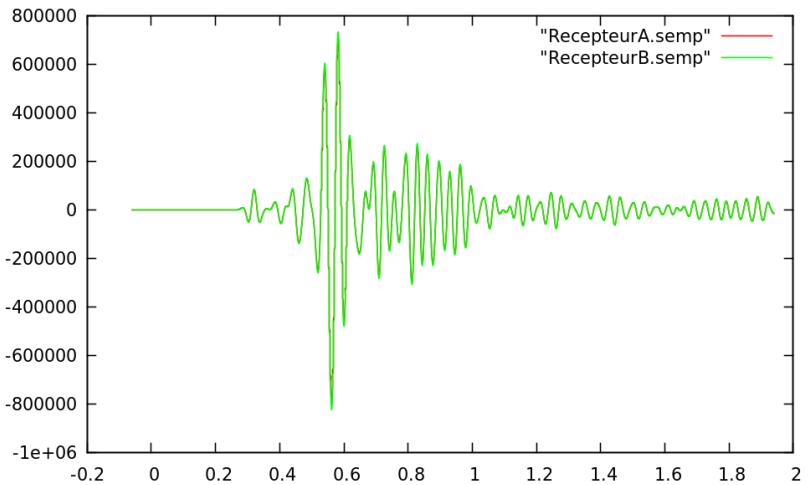


FIGURE 6.1 – Résultats d'un test rapide du principe de réciprocité, mené grâce au logiciel SPECFEM 2D. Le premier signal (en rouge, légende 'RecepteurA') est mesuré en A , point situé à 110 mètres de profondeur et à 800 mètres d'un point B (situé à une profondeur de 10 mètres) d'où est émis une fonction de Ricker de fréquence centrale $f_c = 20$ Hz. Le second signal (en vert, légende 'RecepteurB') est mesuré en B lorsque la même fonction est émise en A . Les deux signaux sont similaires aux erreurs numériques prés .

de positions possibles de l'ordre de 4000 points, ne permettant pas une précision meilleure que la centaine de mètres pour la position horizontale de l'animal. Cette précision est de toutes façons supérieure à la précision de la position visuelle relevée depuis le théodolite.

6.2.2 Paramètres généraux des simulations SPECFEM

Le logiciel SPECFEM permet de simuler la propagation d'un signal acoustique dans des milieux complexes, en trois dimensions spatiales (plus le temps). Pour l'utiliser, un certain nombre de paramètres doivent être déterminés. Nous nous intéressons ici aux paramètres généraux indépendamment des spécificités de chaque lieu, soit essentiellement le problème du maillage en trois dimension, lié au choix du pas de temps, ainsi que les conditions aux bords et les choix de géométrie associés.

6.2.2.1 Maillage.

SPECFEM est un logiciel de résolution de l'équation de propagation fondé sur un découpage de l'espace (méthodes de type éléments finis). Il nécessite donc un maillage préalable de la zone à modéliser, ce qui est une étape à la fois délicate et cruciale. En effet, la qualité du maillage conditionne les résultats du modèle : un maillage fin s'adapte aux détails de l'environnement mais est coûteux en temps de calcul, alors qu'un maillage plus grossier est moins précis mais plus rapide. Le problème majeur réside dans le fait que pour une géométrie réaliste il n'est pas possible d'obtenir un résultat régulier : certaines parties seront nécessairement maillées plus finement que d'autres. Une grande disparité dans la taille du maillage conduit à la pire des solutions : un temps de calcul très grand (conditionné par l'échelle de l'élément le plus petit) par rapport à la précision obtenue.

Pour les simulations qui nous concernent, il s'agit de modéliser la propagation du son dans une

“boîte” d’océan de quelques kilomètres de côté et des profondeurs variant entre quelques mètres et quelques centaines de mètres. SPECFEM tient compte de la propagation dans le sol, ce qui implique de considérer sur quelle épaisseur de sol il faudra calculer le champ acoustique. Par soucis d’équilibre entre le temps de calcul et l’influence du sol, nous avons choisi des boîtes telles que leur dimension verticale soit de l’ordre de deux fois la profondeur maximale atteinte, ce qui donnent des parallélépipèdes de 500 mètres de profondeur.

Pour faire le maillage de la boîte modélisée, plusieurs solutions sont envisageables techniquement. Nous avons choisi d’utiliser le mailleur interne, nommé Meshfem 3D. Ce mailleur n’est pas très sophistiqué mais il est bien adapté à un milieu constitué de plusieurs ‘couches’ homogènes (on verra plus loin au paragraphe 6.2.4 que la couche peut n’être pas strictement homogène, mais présenter des variations de certains paramètres), empilées verticalement. Pour la simulation Chañaral, pour laquelle la bathymétrie est particulièrement complexe, un mailleur plus sophistiqué aurait certainement permis de réduire le temps de calcul. Cependant, la prise en main et l’utilisation d’un tel mailleur ont un coût en temps humain prohibitif dans le cadre de notre étude de faisabilité. Comme nous n’effectuons qu’une simulation par lieu, passer trop de temps humain sur le maillage pour diminuer le temps de calcul ne serait in fine pas très efficace.

Le mailleur interne travaille à partir d’un fichier représentant la bathymétrie du lieu sous la forme de données de type x, y, z . L’élément de choix de finesse du maillage est contenu dans l’instruction définissant le nombre d’éléments en x , y et z (où x et y sont les coordonnées horizontales, et z la profondeur). Dans le cas d’un logiciel comme SPECFEM qui est conçu pour être parallélisé, ce nombre d’éléments sera également contraint par le nombre de coeurs utilisés dans le réseau de supercalculateurs. La taille des éléments conditionne à son tour le pas de temps minimal qui peut être envisagé, ce qui influence le temps de calcul total et la fréquence maximale pouvant être résolue. On conçoit donc que l’échelle de la boîte a un effet en puissance quatre sur le temps total de calcul à fréquence égale, ce qui est considérable : si on multiplie par n la taille de la boîte, le temps de calcul sera multiplié par n^4 . Le temps total de calcul est également influencé par la durée totale du signal transmis, bien que dans ce cas l’augmentation soit simplement linéaire. Dans toutes les simulations, nous envisageons l’utilisation d’un signal d’entrée long d’une dizaine de secondes, ce qui nous a conduit (en tenant compte du temps de propagation dans les zones les plus éloignées de la boîte) à choisir un temps total de simulation de l’ordre de 20 secondes, ce qui correspond à des simulations de l’ordre de 200 000 pas.

6.2.2.2 Problèmes aux bords

Les simulations obtenues par les familles de modèles de type éléments finis présentent à priori des problèmes délicats aux bords, en particulier pour simuler des conditions d’absorption totale (conditions typique d’une paroi virtuelle de boîte). Les conditions dites PML (pour ‘perfectly matched layers’) n’étant pas opérationnelles pour un maillage avec le mailleur interne, nous avons choisi d’appliquer des conditions dites de Stacey, proposées par le logiciel (voir Stacey, 1988 [132]). Nous avons également évité de mettre des récepteurs trop près des bords, laissant une marge d’un kilomètre entre les bords de la boîte modélisée et le début de la grille de récepteur, de façon à minimiser l’influence des effets de bords sur nos résultats.

6.2.3 Description du premier terrain : le golfe de Corcovado

Comme nous l’avons déjà signalé, un premier jeu de données a été fourni par notre collègue Susannah Buchan concernant un hydrophone fixe placé à la sortie du golfe de Corcovado, dans la partie austral du Chili. A partir de ce lieu, nous avons modélisé le terrain environnant mais, ne disposant pas de ‘vérité terrain’, ces données serviront à tester les capacités du logiciel et à vérifier l’efficacité des méthodes de reconstruction.

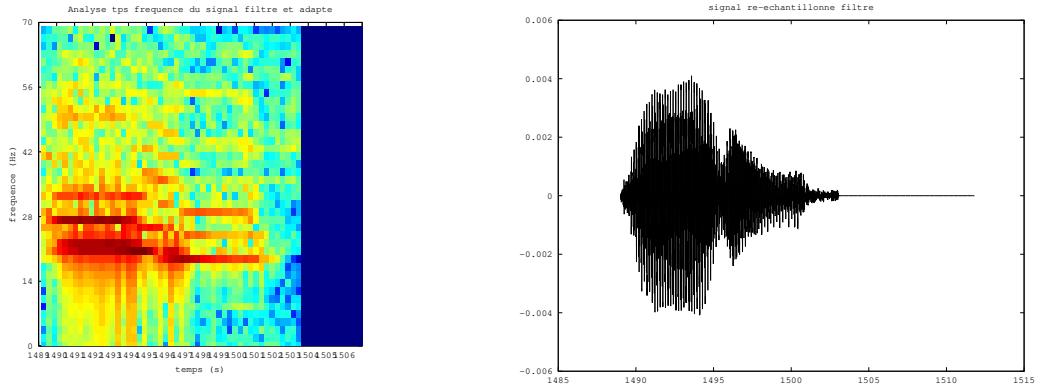


FIGURE 6.2 – Le signal, enregistré en 2016 au sud du golfe de Corcovado par S. Buchan puis ré-échantillonné et filtré. A gauche, une visualisation temps-fréquence. A droite, la forme d’onde.

6.2.3.1 Les données Corcovado

Pour vérifier la pertinence de nos outils numériques sur un problème réaliste, nous avons donc décidé d’utiliser des données réelles pour construire nos tests dits “simulés” ou “de laboratoire”. Ces données ont été obtenues par notre collègue Susannah Buchan du programme COPAS Austral (voir notamment Buchan et al. 2014 [15]). Il s’agit d’un chant de baleine bleue de type chilien tel que décrit dans le chapitre 4, dont les principales caractéristiques sont d’être un signal long, basse fréquence, répété et très stable entre individus. Le chant a été enregistré en 2016 à l’entrée du golfe de Corcovado, au sud du Chili, une zone très étudiée pour sa population de baleines bleues, au sein de données qui n’ont pas encore été publiées. Parmi les différents chants fournis par nos collègues, nous en choisissons un de grand rapport signal sur bruit, et qui ne présente aucune surimposition visible d’un autre chant. Il correspond à la source notée S0403_0149_1489 du 3 avril 2016, à 1h49 du matin.

Le signal d’entrée a été extrait (seule la partie D est utilisée, voir chapitre 4 pour la description du chant SEP2 de la baleine bleue chilienne), ré-échantillonné selon le pas de temps de notre modèle et filtré à 50 Hz. La figure 6.2 présente le signal choisi comme entrée pour nos simulations. Dans le cas d’un test ‘simulé’, le choix du signal d’entrée est essentiellement déterminé par la nécessité de tester le comportement de SPECFEM vis-à-vis de signaux (relativement) haute fréquence et longs. Le logiciel a en effet été conçu pour des signaux sismiques qui présentent des caractéristiques très distinctes (fréquence maximale de l’ordre de quelques hertz, large bande, relativement courts). Lorsqu’il s’agira d’un test plus réaliste, le choix du signal d’entrée sera beaucoup plus délicat (voir partie 6.2.5).

Dans le but de vérifier les possibilités de notre méthode sur un profil topographique réaliste, après quelques tests préliminaires sur des profils artificiels, nous avons décidé de modéliser la position réelle de l’hydrophone ayant enregistré les données. La position géographique de l’hydrophone a été communiquée par notre collègue et nous avons trouvé des relevés bathymétriques sur un site de données publiques mis à disposition par l’Université de Columbia, aux Etats Unis. Il s’agit de l’outil GMRT (Global Multi-Resolution Topography) fourni par le Marine Geo-science Data System [52]. Cet outil fournit un fichier ASCII de profondeurs d’une résolution de 180×256 , qui peut facilement être adapté au meilleur interne MeshFEM. La bathymétrie de la zone est présentée sur la figure 6.3, qui permet de constater que l’hydrophone se situe dans une zone de petits fonds, entre 30 et 180 mètres, avec une pente assez régulière dirigée selon un axe nord-est/sud-ouest.

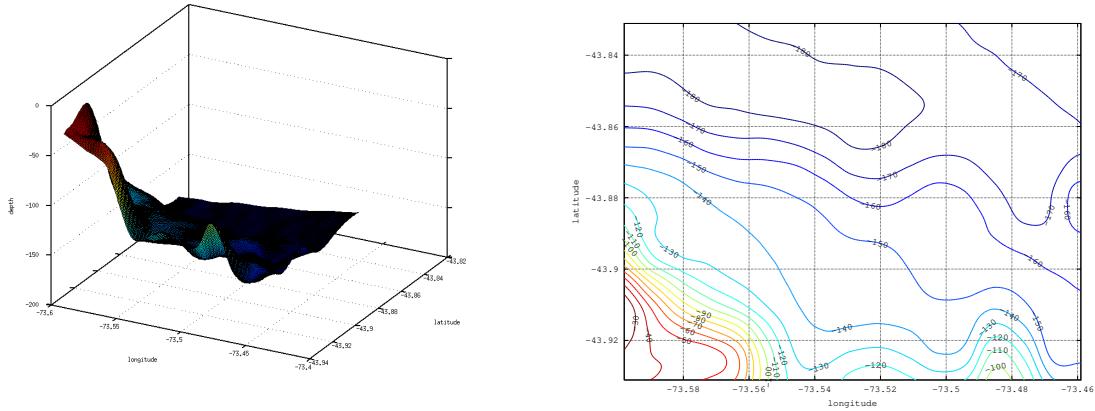


FIGURE 6.3 – Bathymétrie de la zone de Corcovado où est construit le premier modèle, tirée du site de données publiques GMRT [52]. À gauche, une vue en trois dimension et à droite, les lignes isobathes. L’hydrophone est placé au centre de la boîte, à 10 mètres du fond.

Par ailleurs, Susannah Buchan et Renato Quiñones nous ont également fourni des données d’océanographie obtenues dans la zone considérée. Ces données comprennent des mesures de salinité et de température dans la colonne d’eau jusqu’à 150 mètres de profondeur, ce qui nous permet de calculer le profil de vitesse du son (grâce à l’équation 2.11 chapitre 2) représenté sur la figure 6.4.

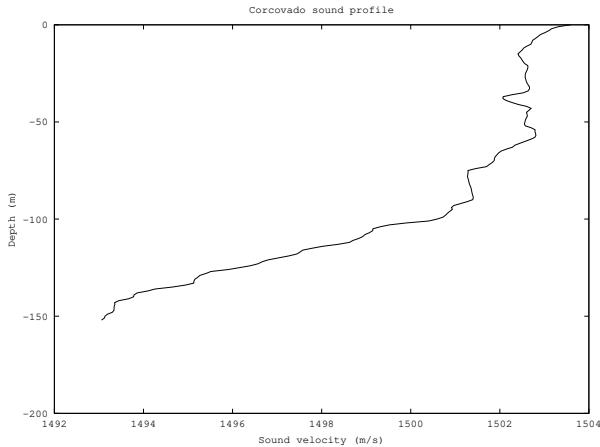


FIGURE 6.4 – Profil de vitesse du son dans l’eau pour la zone de Corcovado en Avril (date des enregistrements) obtenu grâce aux mesures effectuées par Susannah Buchan et Renato Quiñones .

6.2.3.2 Détails techniques des simulations

Nous avons effectué deux simulations sur la zone de Corcovado avec des paramètres très similaires, la deuxième étant essentiellement l’occasion d’implémenter dans SPECFEM la variation de

la vitesse du son dans l'eau en fonction de la profondeur. Dans les deux cas, la grille de récepteurs utilisée comprend trois couches aux profondeurs respectives de 10, 50 et 90 mètres, avec 1470 points répartis selon une symétrie hexagonale avec un pas de 200 mètres entre les points(voir figure 6.5). Le choix des trois couches de profondeur irrégulière 10, 50 et 90 mètres est discutable (car nous échantillonons assez peu la colonne d'eau). Il est guidé par notre connaissance a priori de la position des baleines lorsqu'elles chantent, qui se situe probablement assez proche de la surface (voir l'étude de Oleson et al, 2007 [98] dans l'hémisphère nord, et Saddler, 2017 [122] au sud du Chili). Par ailleurs, 50 points sont ajoutés aléatoirement, à une profondeur de 40 mètres, à cet ensemble de points : ils représenteront les "baleines virtuelles", en fait des points d'émission. Pour chacune de ces baleines virtuelles, le test consistera à considérer le signal reçu en ce point, qui sera considéré comme égal au signal qui serait reçu par l'hydrophone si il était émis en ce point (voir le principe de réciprocité décrit en début de ce chapitre). Ce signal est noté W_i , avec $i \in [1 : 50]$ le numéro de la baleine virtuelle. Le principe de la méthode consistera à comparer ce signal de la baleine virtuelle numéro i avec chacun des signaux émis par chaque point de la grille, pour voir si la comparaison peut nous aider à retrouver la position. Les positions horizontales des 50 baleines virtuelles de chacune des simulations sont représentées sur la figure 6.5.

Le tableau 6.1 synthétise les paramètres physiques et informatiques de ces deux simulations.

TABLE 6.1 – Paramètres physiques et informatiques des simulations Corcovado.

	Simulation 1	Simulation 2
Date	19 Mai 2017	1 septembre 2017
Calculateur	CINES (Montpellier)	
Source	fichier S0403_0149_1489	
Récepteurs	Grille 4460 pts STATIONS_CYL1	Grille 4460 pts STATIONS_CYL2
Topographie	Extrait de GMRT [52]	
Densité du sol	$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$	
Vitesse ondes P (sol)	$v_P = 3000 \text{ m/s}$	
Vitesse ondes S (sol)	$v_S = 1500 \text{ m/s}$	
Vitesse dans l'eau	fixe $v = 1500 \text{ m/s}$	variable (profil figure 6.4)
Pas de temps	$dt = 9.10^{-5} \text{ s}$	
Nombre de pas	$N = 200\,000$ pas	
Nombre de processeurs	256	576
Durée du calcul	24 h	23 h
Fréquence maximale		50 Hz

6.2.4 Simulation Chañaral : choix des paramètres physiques

Les données issues de Bombyx II, l'instrument posé entre l'île de Chañaral et la côte, au nord du Chili (voir chapitre 3), constituent la base pour notre troisième grande simulation. Contrairement aux deux premières simulations, une grande attention a été portée ici sur les paramètres physiques (bathymétrie, type de sol, vitesse du son dans l'eau) et biologiques (signal source). Nous détaillons ici les choix effectués.

Comme nous l'avons vu dans le cas des deux premières simulations, pour lancer une simulation SPECFEM, un certain nombre de paramètres et informations sont nécessaires. Ils constituent la base du modèle physique sur lequel peut travailler le logiciel de simulation. Ils sont listés ci-dessous :

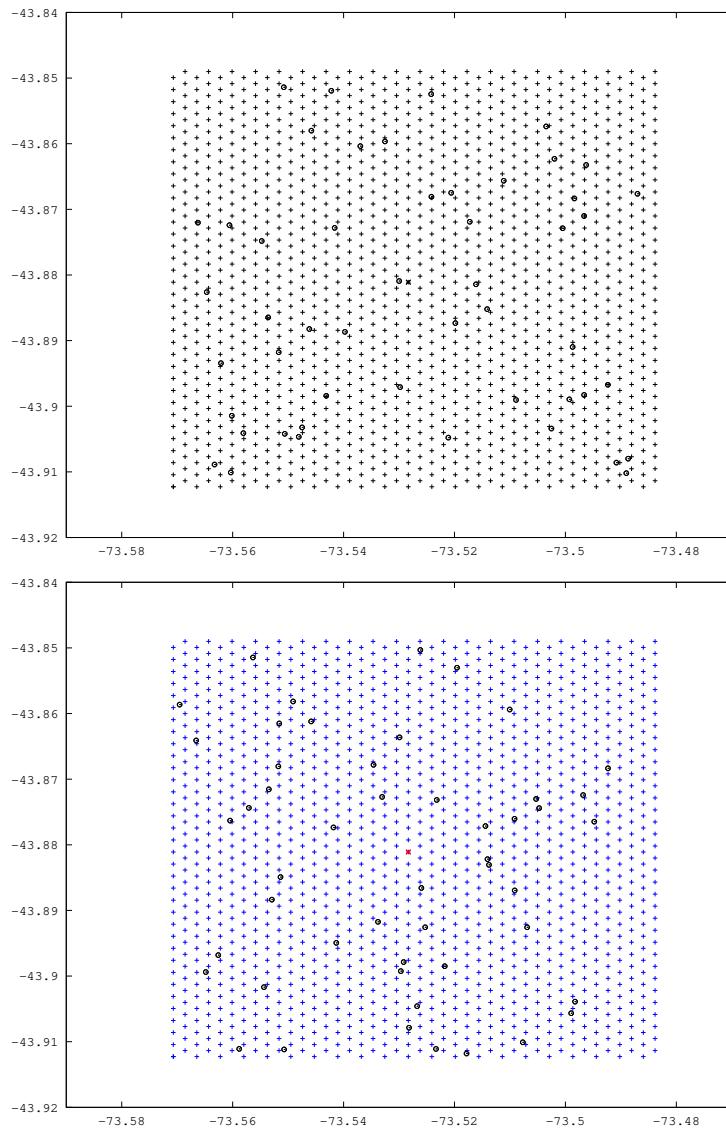


FIGURE 6.5 – Coupe horizontale des grilles de récepteurs utilisées dans les simulations. La grille présente une symétrie hexagonale, avec une distance de 200 mètres entre les points voisins. Les récepteurs ne sont pas placés à moins de un kilomètre du bord de la boîte de simulation de façon à éviter des éventuels effets de bords. Les points surimposés représentent les 'baleines virtuelles' : ce sont des points choisis aléatoirement représentant une position de baleine qu'il s'agira de retrouver. A haut, la première simulation, en bas, la deuxième.

- type de signal d'entrée, pour caractérisation des temps de calculs (pas de temps, durée totale)
- choix de la boîte : taille, coordonnées, type de maillage ...
- bathymétrie

- caractérisation de la colonne d'eau (température, salinité) pour une évaluation de la vitesse du son dans l'eau
- caractérisation du sol

Nous examinons ci-après ces différents paramètres.

6.2.4.1 Type de signal d'entrée

Nous traitons ici la question du type de signal (impulsion ou signal temporel, durée, caractérisation), et non sa forme effective (qui sera traité dans la partie 6.2.5). Cette question ne dépend pas du lieu modélisé, et elle a été résolue lors des tests dans le golfe de Corcovado. Elle ne pose donc pas de problème majeur pour la simulation. Le signal d'entrée qui est choisi correspond à la dernière partie du chant (extrêmement stéréotypé) de la baleine bleue chilienne, partie en général nommée D2 (voir illustration figure 6.6). C'est un signal pulsé, harmonique, piquant à 23 Hz avec une légère descente de la fréquence pic. Sa durée est d'une dizaine de secondes, et sa fréquence maximale est de l'ordre de 50 Hz. Ces contraintes impliquent donc une simulation autorisant une période

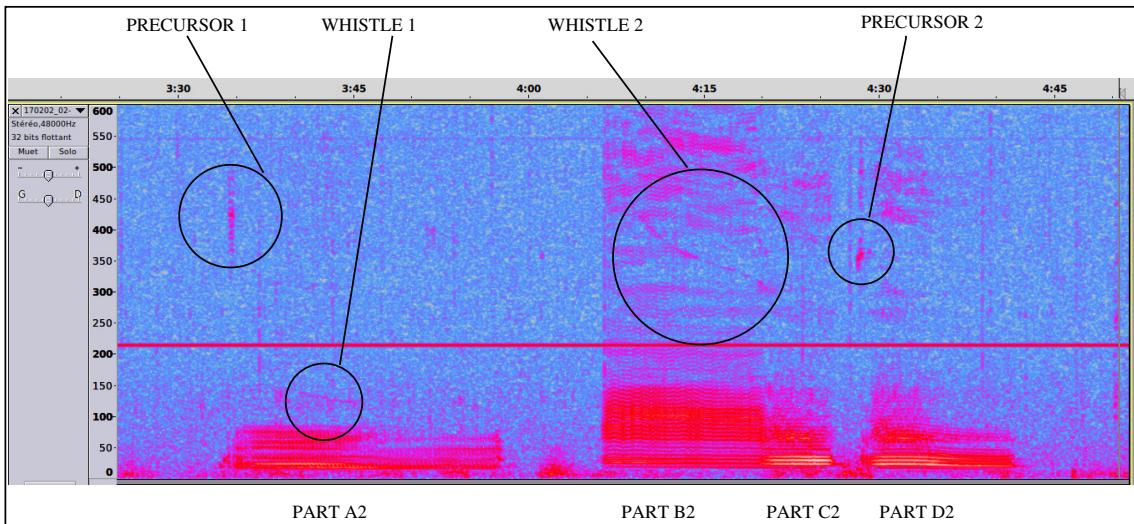


FIGURE 6.6 – Exemple annoté de chant dit 'SEP2' (south east pacific 2) caractéristique des baleines bleues présentes au Chili (voir Buchan et al. 2014, [15]). La dernière partie, dite 'D2' est utilisée pour le modèle. La raie à 214 Hz correspond à un défaut de notre instrumentation et ne fait pas partie du signal (elle est trop haute pour nous gêner pour les simulations).

minimale de 0,02 secondes (ce qui sera obtenu en adaptant le nombre d'éléments du maillage) et un pas de temps correspondant au choix de maillage fait. La durée totale de simulation, incluant la durée de propagation, sera de l'ordre de 20 secondes.

Enfin, deux choix sont possibles : intégrer en entrée le signal temporel directement, ce qui a pour avantage d'éliminer des sources possible de bruit haute fréquence, mais aussi d'obtenir le résultat directement, sans avoir à retravailler sur les signaux obtenus. C'est l'option qui a été choisie pour les deux premières simulations, correspondant à la zone de Corcovado. L'autre possibilité est de faire tourner la simulation sur un 'dirac' (une impulsion aussi courte que possible), puis de convoluer le résultat par le signal désiré. Cette option permet une plus grande souplesse, puisque cela permet de changer le signal d'entrée le cas échéant, sans avoir à relancer une simulation. En revanche, cela

nécessite un travail important en aval, pour convoluer toutes les sorties (plus de 4400 vecteurs de 200 000 points dans l'état actuel des essais).

Pour la dernière simulation, c'est cette option qui a été choisie : en effet, la forme du signal d'entrée est une donnée sensible devant être testée (voir partie 6.2.5). Faire tourner la simulation avec une impulsion en entrée permet d'utiliser une seule simulation et de faire autant de tests que désirés pour le signal d'entrée.

6.2.4.2 Choix de la boîte à utiliser

La simulation SPECFEM est effectuée dans une 'boîte' à trois dimensions. Celle-ci aura naturellement comme frontière supérieure la surface de l'eau. Les cinq autres frontières, en revanche, doivent être spécifiées.

Rappel des lieux La zone d'étude, d'un point de vue très large, concerne un canal d'environ 4 milles nautiques de large sur 7 de long, situé au nord du Chili, dans une zone d'importance océanologique due à une résurgence très forte du courant de Humboldt. Cette résurgence induit une forte productivité et une grande richesse biologique (voir notamment le dossier d'étude de Gayer et al., 2008 [48]). Une ligne mouillée sur un corps mort, sur laquelle peut être fixé l'appareil Bombyx II (voir chapitre 3), a été installée en décembre 2016 aux coordonnées suivantes :

- latitude : -29,01223° soit S 29°00'44.04"
- longitude : -71,52386° soit W 71°31'25,92"

L'île de Chañaral, qui borde ce canal naturel, est une réserve intégrale depuis 1990, en raison notamment de son importance pour la nidification du manchot de Humboldt. De plus, la zone de 1 mille nautique autour de l'île est déclarée réserve marine en 2005. La carte figure 6.7 présente les lieux de façon globale ainsi que la position de la bouée.

La boîte de modélisation doit naturellement inclure la position de l'hydrophone. Sa taille doit tenir compte d'un certain nombre de contraintes :

- le temps de calcul admissible pour effectuer les simulations,
- la géographie et notamment le problème des îles ou interfaces triples (eau/air/sol),
- les observations effectuées par l'équipe d'observations visuelles .

Temps de calcul Le calcul étant effectué sur le groupe du centre CINES à Montpellier et dans le cadre de la collaboration avec Dimitri Komatitsch et son équipe, on désire que le temps cumulé d'une simulation reste dans l'ordre de grandeur des 50 000 heures (réparties sur quelques centaines de coeurs).

Les deux premières simulations effectuées dans la zone de Corcovado ont permis de montrer que le mailleur interne (XMESHFEM3D) est pertinent pour l'étude de ce genre de topologie, et une taille d'environ 10 km x 10 km x 500 m permet des calculs dans l'ordre de grandeur de temps désiré. On cherchera donc à reproduire ces ordres de grandeurs dans le cadre de l'étude liée à Bombyx II.

Problématique des îles Le meilleur interne est adapté, extrêmement pratique et facile d'accès pour nos modèles. En revanche, il ne permet pas de gérer facilement les interfaces triples eau-sol-air. Par conséquence, les îles et les côtes sont un problème pour nos maillieurs. Par ailleurs, la boîte telle qu'elle est maillée doit être rectangulaire. On cherche donc à construire une boîte qui évite les côtes. Une profondeur relativement faible (de l'ordre de 10m) est bien gérée, aussi bien par le mailleur que par le programme principal. Ce problème nous permet donc une boîte qui frôle les côtes, sans les atteindre.

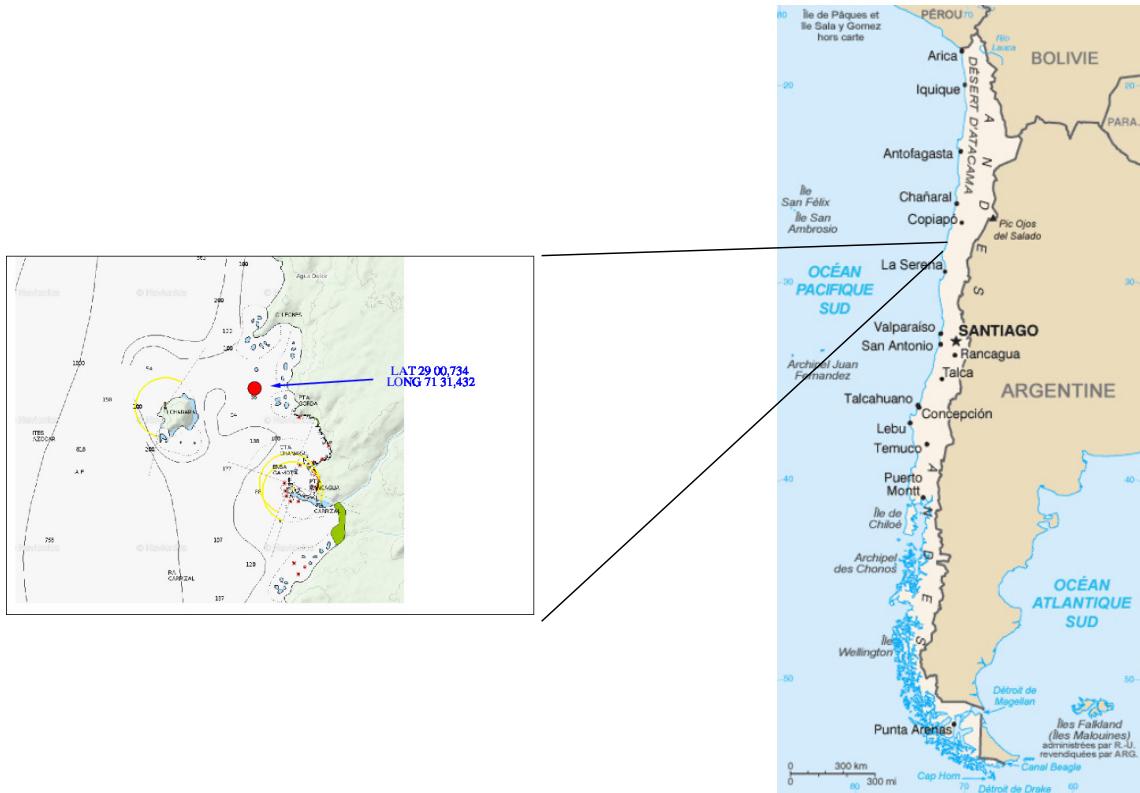


FIGURE 6.7 – Carte générale de la zone d'étude (obtenue par le générateur de cartes marines Navionics) située dans la partie nord du Chili

Champ d'observation Le travail de terrain a été mené en collaboration avec une équipe de l'université de Valparaíso, sous la direction de Maritza Sepúlveda. Cette équipe a comme mission d'observer la zone environ 10 heures par jour, sur des périodes déterminées (deux fois 15 jours pour la saison 1 en 2017, trois fois 15 jours pour la saison 2 , 2017/2018), pour reporter la position des grands cétacés présents sur zone. Leur point d'observation, situé sur l'île de Chañaral, définit une zone d'étude marine à laquelle nous adaptions notre boîte.

Choix d'un extrait géographique L'extrait choisi pour répondre à ces contraintes correspond aux coordonnées suivantes :

	Longitude (degrés)	Latitude (degrés)
Minimale	-71.5620	-29.0700
Maximale	-71.5080	-28.992

La boîte ainsi choisie a une extension de 5.248 km sur 8.668 km, ce qui est plus petit que la boîte conçue pour les tests Corcovado, mais coïncide avec les limitations mises en évidence.

La grille de récepteurs utilisée pour cette simulation comprend quatre couches aux profondeurs respectives de 10, 25, 50 et 90 mètres, munies chacune de 1400 points répartis selon une symétrie

hexagonale avec un pas de 200 mètres entre les points (voir figure 6.8). Nous avons ajouté une couche en profondeur par rapports aux essais sur le terrain Corcovado. Notre échantillonnage en z reste relativement faible pour une étude précise du champ acoustique. Il est le résultat d'une recherche de compromis entre le volume de données générées par nos simulations et la précision des résultats, sachant, comme nous le mentionnons plus haut, que les baleines bleues sont probablement situées assez près de la surface lorsqu'elles chantent (Oleson et al. 2007 [98] et Saddler et al. 2017 [122]).

De plus, 100 points sont ajoutés aléatoirement, à une profondeur aléatoire entre 0 et 100 mètres : ils représenteront les baleines 'virtuelles' (voir partie 6.2.3 sur les simulations Corcovado). Ainsi, cette simulation pourra également être utilisée pour les tests sur baleines "virtuelles".

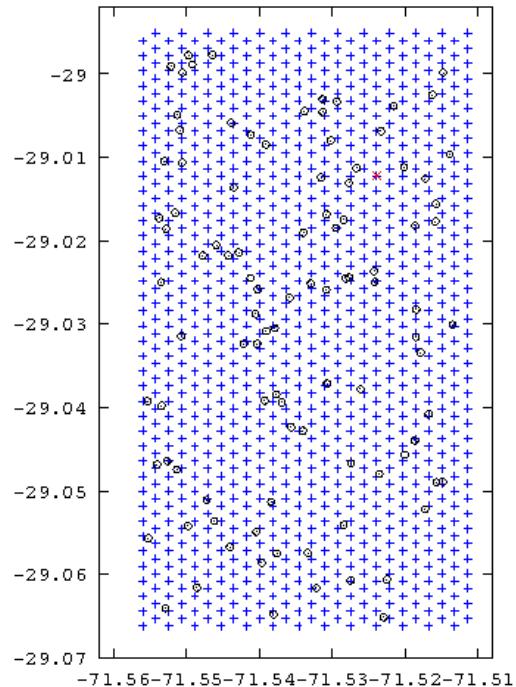


FIGURE 6.8 – Coupe horizontale de la grille de récepteurs utilisée dans la simulation Chañaral. La grille présente une symétrie hexagonale, avec une distance de 200 mètres entre les points voisins. Les récepteurs ne sont pas placés à moins de un kilomètre du bord de la boîte de simulation de façon à éviter des éventuels effets de bords. Les points surimposés représentent les 'baleines virtuelles' : ce sont des points choisis aléatoirement représentant une position de baleine qu'il s'agira de retrouver.

6.2.4.3 Bathymétrie

Problématique des données publiques Pour obtenir un relevé précis des fonds, nécessaire au modèle, plusieurs ressources publiques ont été consultées :

- Les cartes officielles du SHOA, organisme militaire chargé de la cartographie marine au Chili. Ces cartes sont en vente, et visibles également sur internet (shoa.cl, carte 3000 de

Caldera à Coquimbo)

- Le site Navionics, qui présente des cartes marines actualisées.
- Le site du Marine Geoscience Data System (<http://www.marine-geo.org/tools/GMRTMapTool/>) qui offre des données de profondeur numérisées. C'est cette source qui avait été utilisée dans le cas des premiers tests effectués à Corcovado.

Cependant, un examen de ces différentes sources montrent qu'elles sont toutes issues des mêmes mesures, qui se trouvent être très inexactes. Nos propres mesures ont très rapidement montré que les cartes officielles sont fausses à plus de 100 % (exemple d'un point noté à 54 mètres sur les cartes et mesuré à 120 mètres de fond sur le terrain).

Campagnes de mesures et sources externes Nous avons donc mené une série de campagnes de mesures de profondeur, en parcourant la zone en bateau, munis d'un petit sondeur type Garmin Striker 4. L'équipe à bord comprend l'équipage du bateau, plus trois volontaires (Cristian Vera, Franck Malige et Julie Patris) pour faire les relevés. Une centaine de mesure ont été prises lors de diverses campagnes (quelques mesures lors de la pose de l'appareil en décembre 2016, deux journées dédiées en mai et octobre 2017). Notre sondeur ne nous permet pas des mesures à plus de 300 mètres de profondeur en eau salée, nous avons donc complété par des mesures acquise lors de la mission d'acoustique active de Susannah Buchan. Nous avons également utilisé des données publiées par le CEAZA lors de son étude de 2008 sur le terrain (Gaymer et al. [48]). Les résultats sont présentés sur la carte de la figure 6.9.

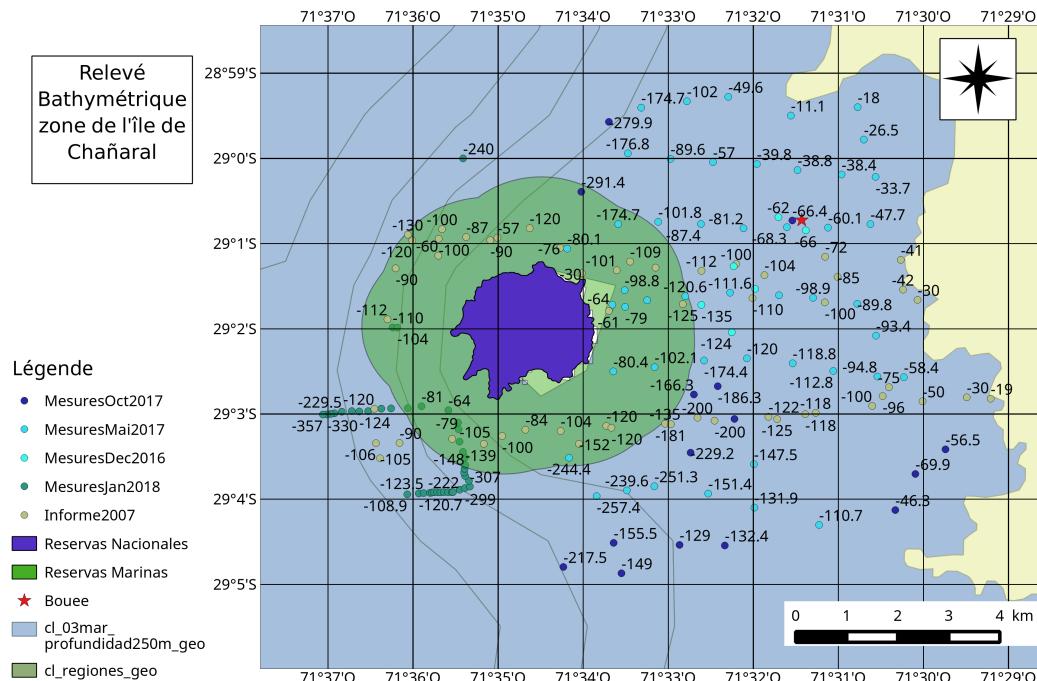


FIGURE 6.9 – Résultats de nos campagnes bathymétriques (carte créée avec le logiciel libre QGIS).

Bathymétrie interpolée A partir des données relevées, nous avons interpolé une carte de fond grâce au logiciel libre Octave (Eaton et al. 2009 [37]). Pour des raisons pratiques de cohérence, l’interpolation est effectuée sur une boîte bien plus grande, dont on tire ensuite un extrait. Le fichier final, donnant les positions $\{x, y, z\}$ du fond, est échantillonné à un pas de 1/10000ème de degrés en longitude et en latitude (soit environ 10 mètres) et comprend donc de l’ordre de 500 000 points.

Le fond interpolé est montré sur la figure 6.10.

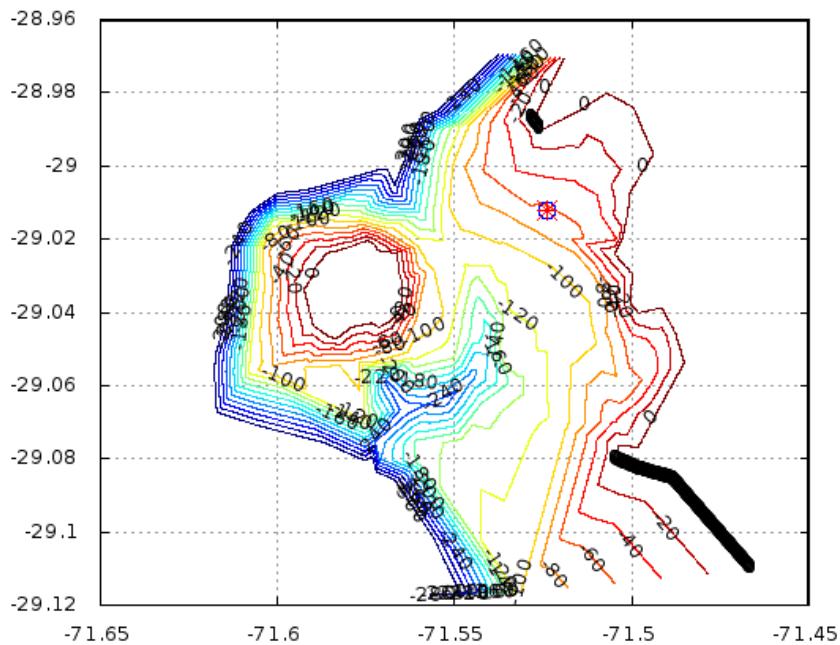


FIGURE 6.10 – Bathymétrie interpolée (lignes de niveaux).

6.2.4.4 Vitesse du son

La propagation dans l’océan peut être substantiellement modifiées par le changement de la vitesse du son dans la colonne d’eau. Nous avons donc essayé d’obtenir des données qui nous permettent de déterminer ce paramètre.

Sources des données Les données ont été récupérées de deux sources principales : le rapport de base du CEAZA déjà cité (Gaymer et al. 2008 [48]), ainsi que des mesures de température en surface et au niveau de l’hydrophone (entre 12 et 30 mètres de profondeur) prise par l’équipe de plongeurs au moment des interventions de maintenance sur l’équipement. Les mesures montrent que la salinité évolue peu, que ce soit dans le temps (saisons, années) ou en fonction de la profondeur. Nous gardons donc la valeur de référence de Gaymer et al. 2008 [48] de 34,6 ppm. En revanche, le profil de température est notablement différent entre l’été et l’hiver, avec disparition de la thermocline en hiver (température stabilisée autour de 12 °C quelle que soit la profondeur).

Courbes obtenues La vitesse du son dans l'eau est établie d'après les données recueillies et la formule expérimentale rappelée dans Jensen et al. 2011 [59] (voir aussi chapitre 2, équation 2.11) :

$$c(z) = 1449 + 4,6 \times T(z) - 0,055 \times T(z)^2 + 0,00029 \times T(z)^3 + (1,34 - 0,01 \times T(z)) \times (S(z) - 35) + 0,016 \times z$$

Les courbes obtenues sont représentées sur la figure 6.11. La variation totale de vitesse obtenue entre 0 et 300 mètres est de l'ordre de 10 m/s en été, essentiellement due à la thermocline, et de l'ordre de 4 m/s en hiver, essentiellement due à la profondeur.

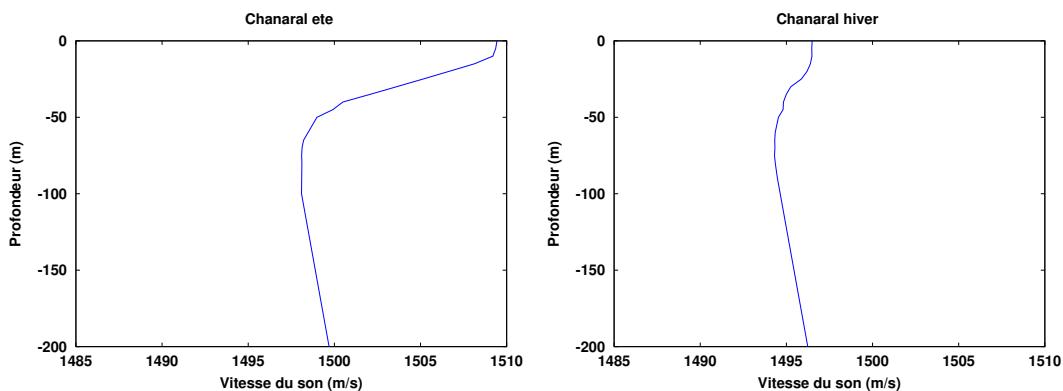


FIGURE 6.11 – Courbes obtenues pour la variation de vitesse du son dans l'eau dans le canal de l'île de Chañaral : à gauche, en été (janvier-février), à droite, en hiver (septembre-octobre)

Ces courbes sont cependant sujettes à caution. En effet, les conditions peuvent varier significativement d'une année sur l'autre, et les valeurs obtenues datent d'une dizaine d'années (et sont, de fait, des moyennes entre des saisons différentes). L'important est probablement ici de reconnaître qu'en hiver la vitesse varie peu, et qu'en été la thermoclyne est de l'ordre de 4 à 5°C, entre 16°C et 12°C environ, et s'étend sur 30 à 40 mètres de profondeur. Nous avons utilisé pour nos simulations les données correspondant à la période estivale, qui correspond à l'époque de nos enregistrements.

6.2.4.5 Conditions au sol

Une zone océanique constitue en général un guide d'onde acoustique, et dans le cas des zones peu profondes comme c'est le cas ici (profondeur comprise entre 10 mètres et 250 mètres environ) le type de matériau constituant le sol peut être important pour caractériser la propagation du son. Nous avons donc cherché à savoir quels pouvaient être les paramètres du sol dans la zone du canal.

Données Les données obtenues sont une fois de plus essentiellement issues de l'étude de Gaymer et al. 2008 [48]. Cependant un recensement précis des caractéristiques du sol n'a été effectué que proche de l'île (à une distance maximale de 1 mille nautique). Si, proche de l'île, le fond est parfois dominé par des galets, on constate que rapidement, le fond est sableux. Ceci est corroboré par les affirmations des pêcheurs locaux, qui sont en général plongeurs (extraction de coquillages et algues) ou pêchant au filet dans les profondeurs plus grandes. Enfin, la présence de la plage au nord de la bouée est cohérente avec cette hypothèse.

En l'absence de campagnes de mesures détaillées concernant les paramètres géoacoustiques des sols, nous choisissons un milieu équivalent, sableux, décrit ci-après.

Valeurs choisies Nous avons donc cherché à adapter les paramètres de notre modèle à un fond sableux, soit des valeurs de l'ordre de celles présentées ci-dessous (d'après Jensen et al. 2011 [59]) :

- masse volumique : $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$,
- vitesse des ondes P : $v_p = 1650 \text{ m/s}$,
- vitesse des ondes S : $v_s = 300 \text{ m/s}$,

On voit ici que la vitesse des ondes S est très faible, ce qui représente un coût énorme pour le calcul. En effet, la longueur d'onde associée à la vitesse c est de l'ordre de c/f (à une fréquence f). Lorsque c est faible (5 fois plus faible dans ce cas que la vitesse de propagation dans l'eau), la longueur d'onde diminue en conséquence et il faut découper l'espace en un maillage beaucoup plus fin pour pouvoir résoudre l'onde dans la simulation. Dans notre cas, on constate donc que pour obtenir la même fréquence maximale (de l'ordre de 50 Hz) le temps de calcul est multiplié par un facteur de l'ordre de 25 !

Nous décidons donc de ne pas tenir compte de la propagation des ondes de cisaillement dans le sol, qui n'ont probablement d'influence que très près du fond. Une étude de l'impact de ce choix sera fondamentale pour le développement ultérieur de notre méthode mais elle n'a pas été menée à ce stade (nécessitant un fort investissement en temps de calcul).

L'atténuation des ondes P est intégrée via Q , le facteur de qualité, dans le modèle. On peut considérer une atténuation 'classique' dans le sable de $\alpha_{\text{dB}/\lambda} = 0,2 \text{ dB}$ par longueur d'onde. D'après Jensen et al. 2011 [59] cette valeur est convertie en facteur de qualité par :

$$Q = \frac{20 \times \pi \times \log(e)}{\alpha_{\text{dB}/\lambda}} \approx \frac{27,3}{\alpha_{\text{dB}/\lambda}}$$

On obtient ainsi une valeur du facteur de qualité de $Q = 136$.

6.2.4.6 Description de la simulation Chañaral

Les paramètres finalement retenus dans la simulation correspondant à la zone nord du Chili sont regroupés dans le tableau 6.2.

TABLE 6.2 – Paramètres physiques et informatiques de la simulation Chañaral.

	Simulation Chañaral
Date	29 Mars 2018
Calculateur	CINES (Montpellier)
Source	Impulsion en temps (type Dirac)
Récepteurs	Grille 4260 points STATIONS_CHA2 (fig 6.8)
Topographie	Voir figure 6.9
Densité du sol	$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$
Vitesse ondes P (sol)	$v_p = 1650 \text{ m/s}$
Vitesse ondes S (sol)	sol fluide ($v_s=0$)
Vitesse dans l'eau	variable (profil d'été figure 6.11)
Pas de temps	$dt = 3.10^{-5} \text{ s}$
Nombre de pas	$N = 650\,000$ pas
Nombre de processeurs	600
Durée du calcul	21 h
Fréquence maximale	69 Hz

6.2.5 Le problème du signal source

Le problème du choix d'un signal source est également crucial, puisque l'ensemble de la méthode repose sur le fait que les sons émis sont stéréotypés et se ressemblent beaucoup d'un événement à l'autre, d'une baleine à l'autre. Comment choisir une source 'standard' supposée correspondre au chant émis ? Nous réfléchissons à cette question et exposons les options choisies dans cette partie.

6.2.5.1 Problématique et possibilités envisagées

Quelle source utiliser comme entrée à notre simulation ? Cette question est cruciale pour la comparaison des résultats de la simulation avec des signaux réels. Même si on peut espérer que l'erreur sur la source, en ce qu'elle affecte de la même façon tous les points de la grille, ne biaise pas trop la méthode, il est quand même évident qu'elle va beaucoup influer sur son efficacité.

Trois méthodes sont envisagées pour essayer de connaître le signal émis par la baleine :

- utiliser les données : dans un cas où on connaît la position de la source du chant, inverser le calcul de propagation pour remonter au signal émis ;
- essayer de faire une moyenne des différents signaux mesurés, en espérant 'effacer' ainsi les effets de propagation comme les effets individuels ;
- construire un modèle mathématique du signal.

Nous examinons ces différentes possibilités dans les paragraphes suivants.

6.2.5.2 Obtention d'une source par inversion du calcul de propagation

L'idée d'inverser la propagation d'un signal pour lequel on connaît la position de la baleine est intéressante, même si elle pose plusieurs problèmes :

- elle exclut l'utilisation de ce chant pour la suite, ce qui est dommage car on dispose de peu de chants avec position de la baleine,
- elle permet la reconstruction d'un signal corrigé des effets de propagation mais pas d'une éventuelle signature individuelle,
- surtout, elle pose la question de l'inversion de la propagation !

Gardant les deux premières objections en tête, nous allons travailler sur la façon d'inverser la propagation. Dans ce but, j'utiliserai deux propriétés de la propagation du son : le principe de réciprocité, déjà commenté, et l'idée de retournement temporel. Ci-dessous, un rappel un peu formalisé de ces deux propriétés.

Principe de réciprocité Le principe de réciprocité de l'équation d'onde peut se résumer en une phrase : le signal reçu en un point B lorsqu'un certain signal initial a été émis en un point A est égal au signal qui sera reçu en A si le même signal initial est émis du point B . Ceci est vrai à condition que le milieu n'ait pas d'éléments d'asymétrie, ce que nous considérerons comme vérifié. Ce principe sera écrit de la façon suivante.

L'effet de la propagation entre deux points sera noté comme une fonction F qui associe à un signal initial S_e un signal reçu S_{r_i} qui dépend de S mais aussi de la position d'émission notée A_e et de la position de réception, notée A_i . On a donc :

$$S_{r_i} = F(S_e, A_e, A_i),$$

et, en utilisant ces notations, le principe de réciprocité s'écrit :

$$S_{r_i} = F(S_e, A_e, A_i) = F(S_e, A_i, A_e).$$

Ce principe est extrêmement utile, puisqu'il permet de récupérer le signal émis par une baleine b_i et reçu par l'hydrophone ($F(S_e, A_{b_i}, A_H)$) bien que le résultat de la simulation soit en fait le signal reçu à la position A_{b_i} lorsque S_e est émis à la position de l'hydrophone A_H .

Cependant, on note que le principe de réciprocité ne permet en rien d'inverser la fonction F dans la mesure où il n'affecte pas le rôle respectif du signal émis et du signal reçu.

Retournement temporel L'idée de retournement temporel est basé sur une autre symétrie de l'équation d'onde, qui, faisant figurer une dérivée d'ordre deux par rapport au temps, peut être 'retournée'. La méthode nécessite de connaître la valeur du champ acoustique en tout point à un instant t , et permet, en transformant chaque point de l'espace en émetteur, de récupérer un signal 'focalisé dans le temps et l'espace' vers sa source (voir par exemple une bonne explication dans la thèse de Nicolas Quieffin [116]). De plus, grâce au théorème de Green (ou représentation faible de l'équation de Helmholtz), la méthode peut être améliorée puisqu'elle ne nécessite plus que la connaissance du champ sur une frontière entourant la source. Dans sa thèse, Nicolas Quieffin [116] montre comment on peut utiliser la présence d'obstacles pour diminuer le nombre de récepteurs, tout en ayant une qualité restant acceptable.

On reste cependant loin du cas où il n'y a qu'un récepteur ... Ce cas a été étudié notamment par José Moura et Yuanwei Jin [91], qui mettent en évidence que lorsque l'environnement est particulièrement complexe (de type guide d'onde), la méthode peut être utilisée avec profit même lorsqu'on ne dispose que d'un récepteur.

Il serait donc intéressant de l'appliquer ici, pour reconstruire le signal source. Dans ce cas, on peut donc formaliser la propriété de la façon suivante, en notant $\mathbf{RT}(S)$ le retournement temporel du signal S , soit $\mathbf{RT}(S(t)) = S(-t)$:

$$\mathbf{RT}(S_e) \simeq F(\mathbf{RT}(S_{r_i}), A_i, A_e).$$

On constate qu'à l'approximation liée à l'utilisation d'une seule antenne près, cette méthode permet bien d'inverser la fonction F , puisqu'elle permet de remonter au signal source S_e à partir d'un signal reçu S_{r_i} .

Utilisation d'un dirac en entrée Dernière précision pour notre analyse : la simulation de la propagation dans le canal de la isla de Chañaral a été faite en prenant comme entrée un Dirac. En effet, la propagation dans le milieu est considérée comme un filtre linéaire indépendant du temps, donc complètement caractérisé par sa réponse impulsionale en tout point de l'espace.

Le signal désiré s'obtient alors en effectuant la convolution du signal d'entrée par la réponse impulsionale ainsi obtenue (en chaque point de la grille). On a donc, en notant δ le signal impulsionnel (Dirac) et $f * g$ le produit de convolution de f et g :

$$S_{r_i} = S_e * F(\delta, A_e, A_{r_i}).$$

Cette technique a l'avantage de permettre un choix a posteriori du signal d'entrée. En revanche il nécessite dans notre cas beaucoup de calculs puisque le signal reçu doit être convolué en chaque point de notre grille de réception.

Test de la méthode Pour évaluer la capacité de cette méthode d'inversion, nous avons effectué un certain nombre de tests informatiques, consistant à envoyer d'un point A_i donné, un signal connu S_e (d'abord un signal synthétique, puis un signal enregistré correspondant à un chant de baleine bleue) et à voir si il pouvait être reconstruit - et dans quelle approximation - par ces outils.

Les tests sont basés sur le raisonnement détaillé suivant.

Nous disposons d'une simulation, faite à partir d'un Dirac émis à la position A_H de l'hydrophone, qui permet d'obtenir la réponse impulsionale en N points de notre zone géographique. Nous avons donc N fichiers correspondant aux RI_i tels que

$$\forall i \in [1 : N], RI_i = F(\delta, A_H, A_i).$$

Nous disposons également d'un signal réel enregistré de chant de baleine bleue S_e , filtré et ré-échantillonné de façon à être comparable au résultats de la simulation. Ce signal sera supposé être un signal émis par une baleine donnée.

Pour appliquer la méthode du retournement temporel, nous cherchons d'abord à calculer le signal S_{r_H} reçu par l'hydrophone lorsque S_e est émis par la baleine i . Il est obtenu par :

$$S_{r_H} = F(S_e, A_i, A_H) = F(S_e, A_H, A_i) = S_e * F(\delta, A_H, A_i) = S_e * RI_i .$$

Nous appliquons alors à ce signal un retournement temporel pour obtenir $\mathbf{RT}(S_{r_H})$. Ce signal retourné doit alors être renvoyé par l'hydrophone pour être reçu au point A_i , de façon à vérifier si ce signal reçu, noté $\mathbf{RT}(S_f)$, peut être comparé à S_e (après avoir été de nouveau retourné, en notant $\mathbf{RT}(\mathbf{RT}(S_f)) = S_f$ le signal finalement comparé au signal émis).

Nous avons donc :

$$\mathbf{RT}(S_f) = F(\mathbf{RT}(S_{r_H}), A_H, A_i) = \mathbf{RT}(S_{r_H}) * F(\delta, A_H, A_i) = \mathbf{RT}(S_{r_H}) * RI_i .$$

Soit finalement :

$$\mathbf{RT}(S_f) = \mathbf{RT}(S_e * RI_i) * RI_i$$

et

$$S_f = \mathbf{RT}(\mathbf{RT}(S_e * RI_i) * RI_i) .$$

On constate que pour récupérer un signal dont on espère qu'il soit proche de celui envoyé, d'après cette méthode, il suffit donc d'appliquer deux fois un produit de convolution avec la réponse impulsionnelle d'un canal donné - quel que soit le canal. On rappelle que l'approximation de cette méthode consiste à supposer qu'on puisse avoir une bonne efficacité alors qu'on n'a qu'un récepteur - au lieu d'une infinité, entourant la source, dans le cas théorique. Par conséquent, on peut imaginer que le signal S_f dépende en réalité du canal utilisé (c'est à dire du point i où est prise la réponse impulsionnelle).

Expérimentation Lorsqu'elle est implémentée sur octave, la méthode décrite ci-dessus pour vérifier les capacités du retournement temporel nécessite quelques ajustements. En effet, la convolution par une réponse impulsionnelle tronquée (à support fini) conduit à des aberrations qu'il convient d'éviter. De plus, la convolution par la réponse impulsionnelle est très sensible au bruit haute fréquence : le signal d'entrée S_e a été filtré à 40Hz (fréquence maximale prévue par la simulation SPECFEM), mais on constate qu'il est également nécessaire de filtrer le résultat de la première convolution (noté plus haut S_{r_H}) avant d'appliquer la seconde.

Le résultat des tests effectués est montré sur la figure 6.12.

On constate que la méthode donne un résultat assez bon (lorsqu'on considère le peu de récepteurs dont on dispose). Cette option pour reconstruire le signal est donc viable, en gardant en tête les inconvénients mentionnés au début (chant lié à un individu, invalidation d'une des données importantes).

Résultats et signal reconstruit Pour reconstruire un signal qui pourra être considéré comme un signal 'typique' original de baleine bleue S , la procédure à suivre dans ce cas est donc la suivante :

- relever dans les données un chant de bonne qualité pour lequel la position de l'animal est connue (ce n'est pas la partie la plus aisée ... les données ne sont pas nombreuses!),
- filtrer la partie D2 de ce chant à 40 Hz par un Butterworth d'ordre 6, pour obtenir S_{r_H} ,
- appliquer le retournement temporel au signal ainsi préparé, $\mathbf{RT}(S_{r_H})$,

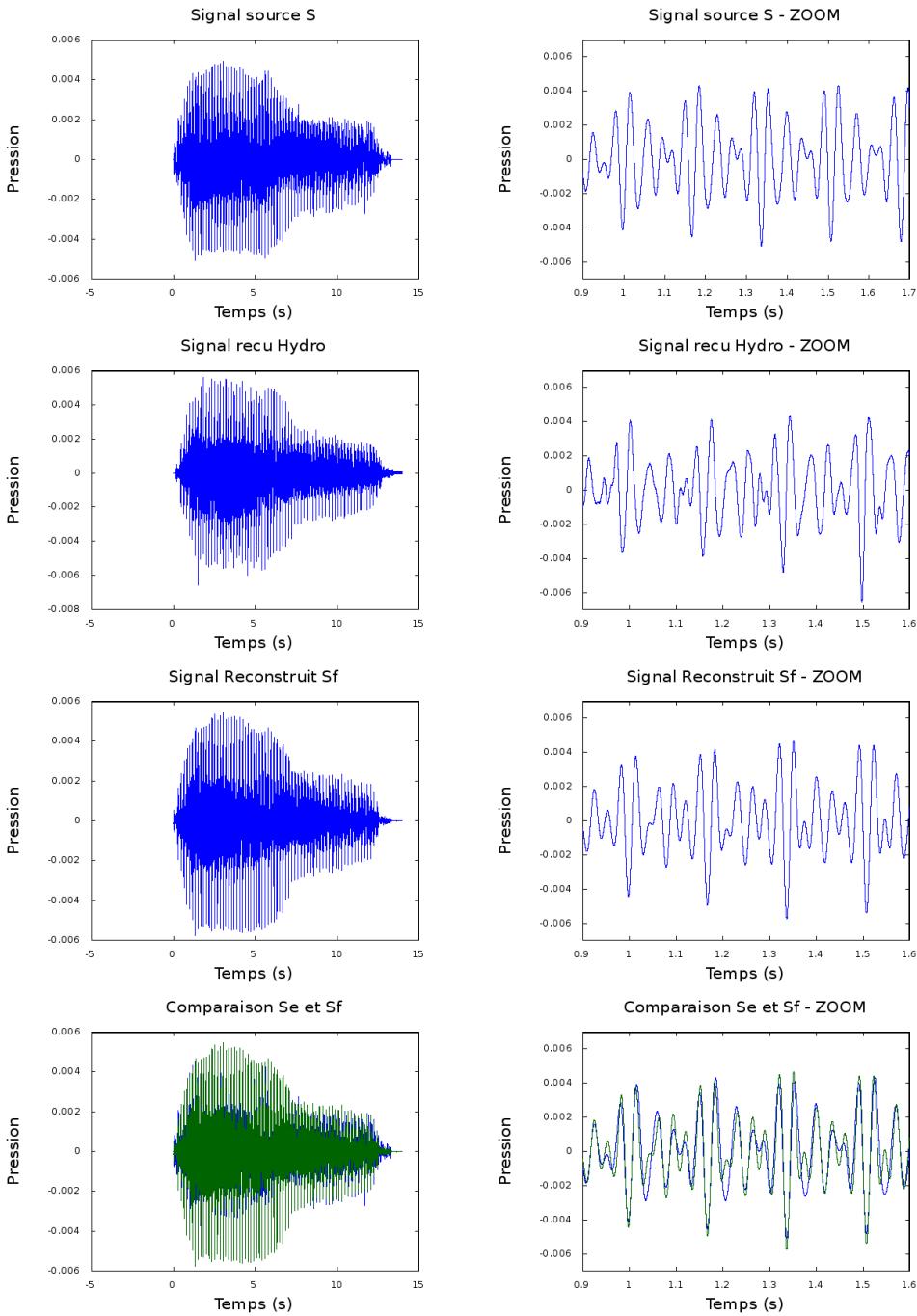


FIGURE 6.12 – Les étapes de la méthode de vérification des propriétés du retournement temporel. Sur chaque ligne, on montre d'abord le signal entier (à gauche), puis un zoom entre les dates $t_1 = 1$ s et $t_2 = 2$ s (à droite). Première ligne : signal émis S_e ; deuxième ligne : signal reçu à l'hydrophone, S_{r_H} ; troisième ligne, signal reconstruit S_f ; quatrième ligne, comparaison entre le signal émis S_e , en bleu, et le signal reconstruit S_f , en vert. .

- convoluer le résultat avec la réponse impulsionnelle donnée par le modèle au point i de la grille qui est le plus proche de la position observée par l'équipe de suivi visuel, on obtient donc $\mathbf{RI}_i * \mathbf{RT}(S_{r_H})$,
- le signal S recherché est alors obtenu par retournement temporel : $S = \mathbf{RT}(\mathbf{RI}_i * \mathbf{RT}(S_{r_H}))$.

Cette procédure a été appliquée aux signaux reçus le 24/01/2017, jour où une baleine bleue a été aperçue près de l'île et où de très beaux chants sont visibles sur les enregistrements.

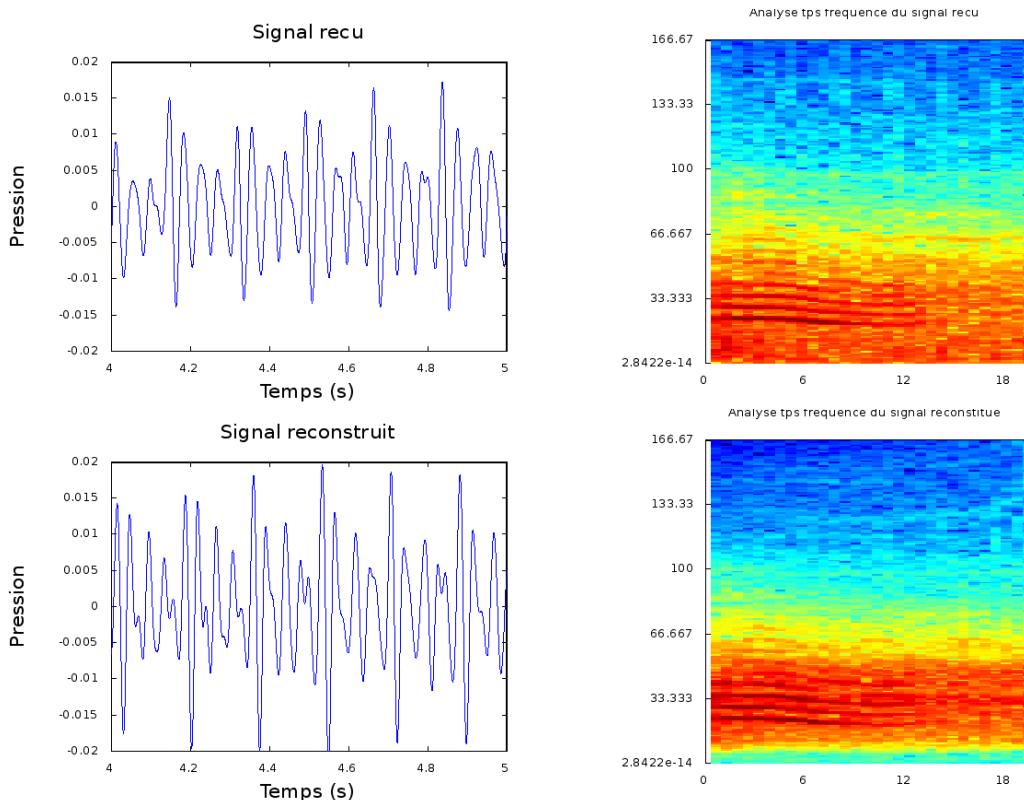


FIGURE 6.13 – Résultats de la création d'un signal 'reconstitué' à partir de la méthode du renversement temporel. Première ligne : signal reçu, à gauche un zoom temporel, à droite la représentation temps-fréquence. Deuxième ligne : signal reconstitué par la méthode décrite dans le texte (à gauche un zoom temporel, à droite la représentation temps-fréquence)..

Un résumé des résultats est présenté figure 6.13. On constate que le signal reconstruit semble moins régulier que le signal reçu, avec un renforcement des harmoniques hautes au détriment du classique 24 Hz.

De plus, le signal reconstruit est très sensible au filtrage effectué, et, surtout, à la profondeur estimée de l'animal (notre simulation nous permet quatre options : 10 m, 25 m, 50 m ou 90 m). Lorsqu'on utilise la réponse impulsionnelle avec une source à 10 m de profondeur, le signal est bien moins régulier et plus bruité en hautes fréquences. La réponse impulsionnelle à 50 mètres donne les résultats les plus 'réguliers'.

6.2.5.3 Une source moyennée

Pour échapper à l'individualisation du chant considéré comme standard, on peut essayer de faire une 'moyenne' de différents chants reçus. Ceci n'est pas sans poser problème cependant : le déphasage est à prendre en considération ... Attention, même en supposant que l'on réussisse à faire une moyenne, cela ne corrige pas forcément des effets de propagation. On peut considérer que ceux-ci sont différents pour chaque chant, peut-être, mais il y a des effets constants par exemple d'étalement qui seront peut-être équivalents sur tous les chants pris pour moyenner, ce qui biaise la méthode. Cependant, bien que cette méthode puisse paraître aberrante si on pense à un 'chirp' ou autre signal biologique classique,, c'est une des caractéristiques du chant d'être tellement auto-similaire entre deux émissions que la moyenne conserve beaucoup de caractéristique du chant.

Un test a donc été fait en prenant la méthode détaillée ci-après. Pour quatre chants enregistrés à Chañaral (à quatre dates différentes) on effectue les opérations suivantes :

- extraction de la partie 'D2' du chant,
- filtrage à 60 Hz (Butterworth d'ordre 5) et ré-échantillonage du signal ($f_e = 3300$ Hz),
- calage sur le premier fichier grâce à une recherche du maximum de la fonction de corrélation.

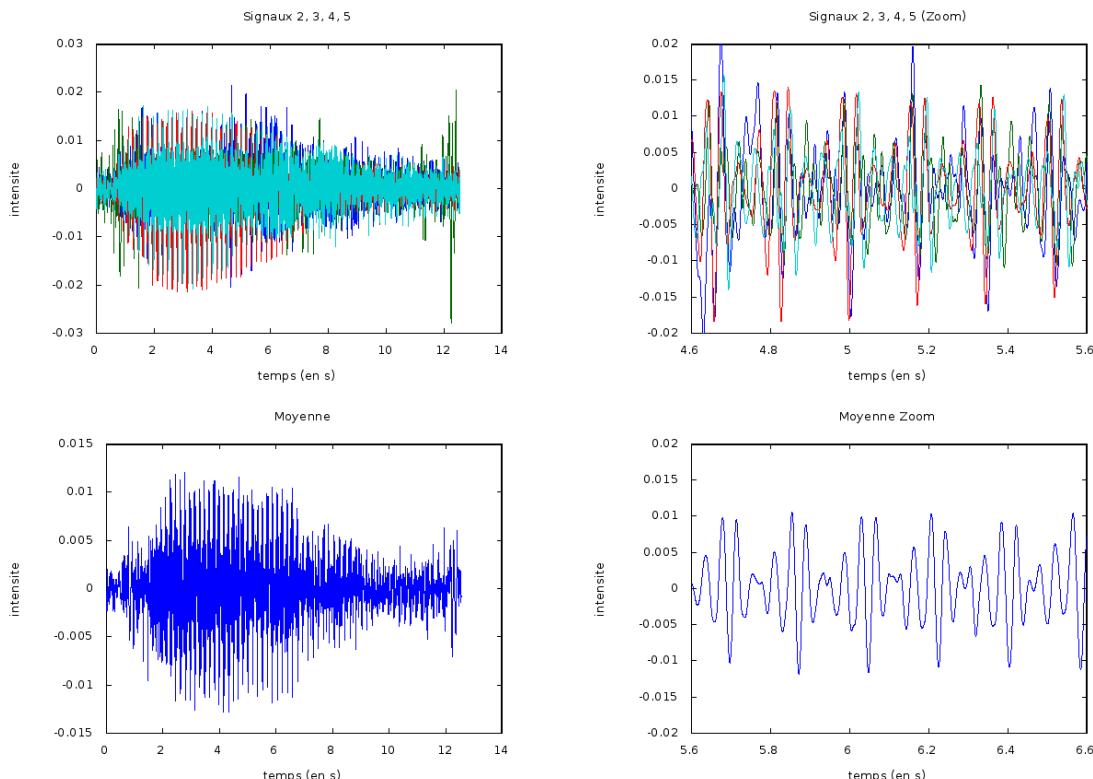


FIGURE 6.14 – Résultat de la moyenne de plusieurs signaux reçus. A gauche, l'ensemble de l'extrait, à droite, une partie zoomée. La première ligne montre les quatre signaux superposés, la deuxième ligne montre la moyenne obtenue. Celle-ci reste cohérente avec les signaux initiaux, soulignant l'extrême stabilité en fréquence du chant.

Sur les images de la figure 6.14 , on peut voir le genre de résultats obtenus. La moyenne n'est pas

aberrante, ce qui souligne la grande stabilité en fréquence du chant entre les exemples. Cependant, on constate que la deuxième partie du chant est moins bien reconstruite (ceci est dû à la descente en fréquence qui n'est pas exactement la même d'un chant à l'autre). Cet outil est donc possible en gardant en considérations les objections déjà mentionnées (biais dû à des effets de propagation communs à tous les fichiers, comme par exemple un étalement temporel, atténuation de la deuxième partie).

6.2.5.4 Une source synthétique

Le travail effectué dans la caractérisation des chants (Chapitre 4) peut servir comme base de la constitution d'une source 'synthétique', élaborée à partir d'une fonction mathématique analytique.

Le modèle adopté consiste à 'fabriquer' une fonction dont la régularité est issue de propriétés mathématiques mais dont les paramètres sont copiés sur un signal observé.

La fonction est construite à partir des éléments suivants.

Le point de départ est un signal sinusoïdal, la 'porteuse' $p(t)$, de fréquence f_{port} , modulée par un signal périodique, l'enveloppe $e(t)$, formée de 'pics' à la fréquence f_{env} . En accord avec l'étude présentée dans le chapitre 4, on prendra la fréquence de l'enveloppe égale à un multiple de la fréquence de la porteuse. Ceci est un résultat de l'étude des chants SEP2 de baleines bleues sur vingt ans, et se manifeste notamment dans le fait qu'aucun déphasage n'apparaît au cours du chant entre la porteuse et l'enveloppe. Pour obtenir cette enveloppe, nous avons choisi de calculer les puissances paires d'une sinusoïde. En effet, ce calcul est relativement simple et permet d'obtenir un nombre d'harmoniques contrôlé.

L'amplitude A du signal est elle-même variable dans le temps afin de reproduire le début du son, sa baisse d'intensité et sa fin. Enfin, l'unité de chant D2 ayant une baisse en fréquence au milieu, la fréquence de la porteuse est donc aussi variable au cours du temps.

On écrit donc a priori le chant de la façon suivante :

$$s(t) = A(t) \times p(t) \times e(t),$$

avec :

- la porteuse $p(t) = \sin(2\pi f_{\text{port}}(t) \times t)$;
- l'enveloppe $e(t) = (\sin(2\pi f_{\text{env}}(t) \times t))^n$, avec n ajustable selon le nombre d'harmoniques voulus. On prendra $n = 14$ pour l'essai final ;
- l'amplitude variable permettant de reproduire la forme générale du chant en douceur :

$$\begin{aligned} A(t) &= \frac{1}{\pi} \arctan(\pi t) \\ &\times \left(\frac{-(A_{\max} - A_{\min})}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{4}(t - \frac{6\tau}{10})\right) + \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2} \right) \\ &\times \left(\frac{1}{\pi} \arctan(5\pi(t - (\tau - 1))) + 1 \right). \end{aligned}$$

Dans ce développement, $A_{\min} = 2$, $A_{\max} = 10$ et $\tau = 14$ s (durée du chant) sont des paramètres mesurés sur un chant d'amplitude normalisée. Le premier terme multiplicatif permet d'obtenir le début du chant, le deuxième la diminution d'amplitude présente un peu après la moitié, et le troisième la fin du chant.

- la fréquence de la porteuse, variable, dont il a fallu tronquer un bout de façon à éviter des distorsions de basse fréquence, est basée sur la fonction :

$$f_{\text{port}} = \frac{-(f_{\max} - f_{\min})}{\pi} \arctan\left(\pi\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right) + \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2},$$

avec $f_{\max} = 23,5$ Hz et $f_{\min} = 20,5$ Hz mesurés sur des signaux reçus ;

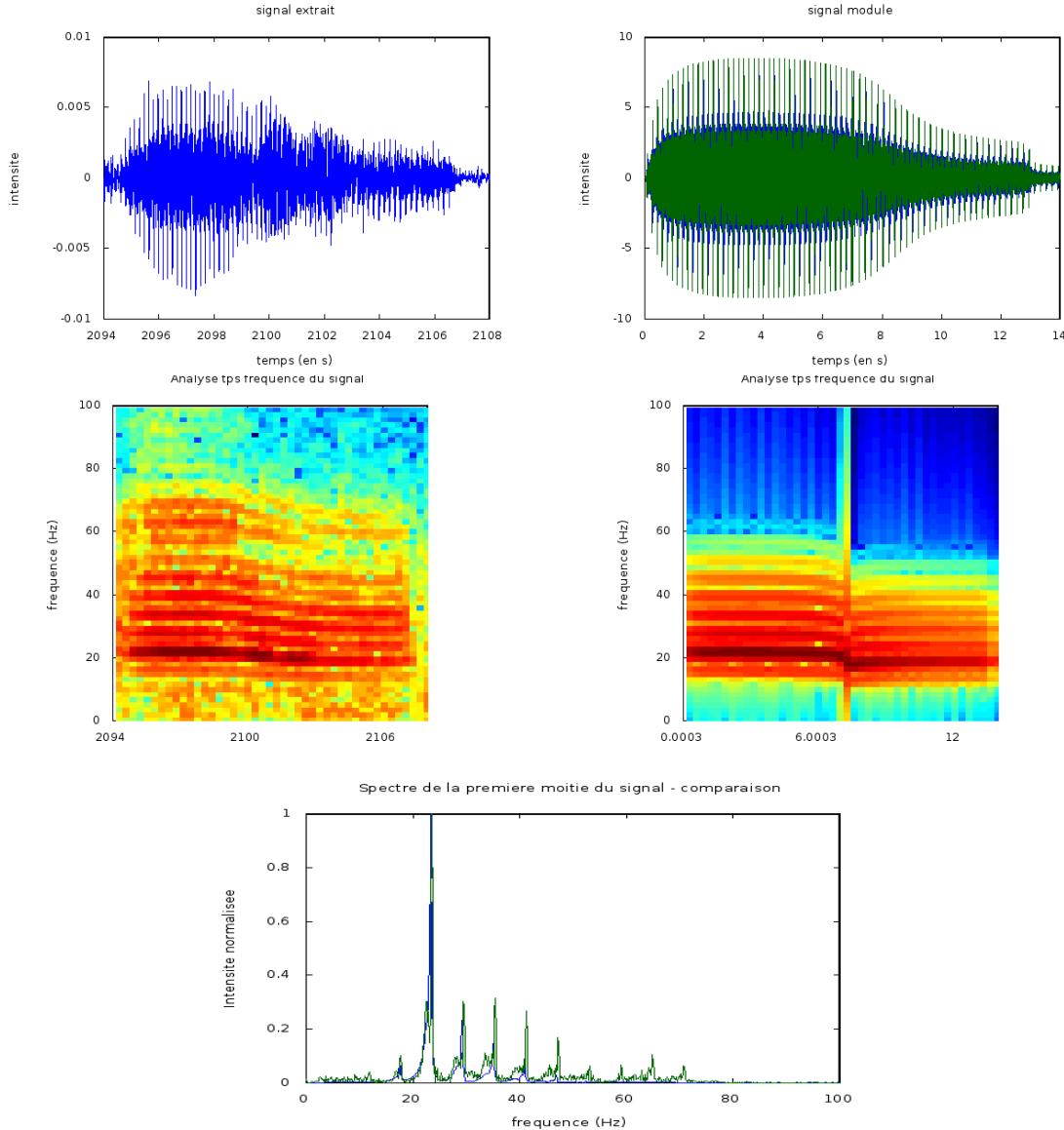


FIGURE 6.15 – Résultat du modèle mathématique. Les deux premières lignes permettent de visualiser le signal synthétique en rapport avec un signal enregistré pris au hasard : à gauche, l'extrait du signal enregistré, à droite, le modèle synthétique. La première ligne permet de visualiser le signal en temporel, permettant d'apprécier les variations de l'amplitude $A(t)$ (voir texte). La deuxième ligne permet de voir les signaux en représentation temps/fréquence. Enfin, la dernière image représente la superposition des spectres du signal enregistré et du signal simulé (première partie du chant).

— la fréquence de l'enveloppe, qui est simplement obtenue par $f_{\text{env}} = 8 \times f_{\text{port}}$.

Ce modèle, quoique pouvant paraître un peu compliqué, est très facile à écrire et ses paramètres sont peu nombreux et faciles à contrôler. Cependant, on constate sur les spectres de signaux reçus

que, si les harmoniques en $f_{port} + kf_{env}$ sont bien présentes (raies à 24 Hz, 30Hz, 36Hz, 40Hz, ...) les harmoniques en $f_{port} - kf_{env}$ sont absentes, à l'exception peut-être de la première, à 18 Hz, mais très atténuée. Pour reproduire ce comportement, au lieu d'effectuer la multiplication évoquée précédemment, on calcule la décomposition en série de Fourier de $p(t) \times e(t)$, et on ne retient que les harmoniques au dessus de la fréquence de la porteuse, ainsi que celle à 18 Hz, atténuée d'un facteur 3. La fonction finale est donc, en gardant les mêmes définitions pour $A(t)$, f_{port} et f_{env} (dont la dépendance en temps n'est pas notée pour des raisons de lourdeur d'écriture) :

$$\begin{aligned}
s(t) = A(t) \times & \left(\frac{1}{2} \sin(2\pi f_{port} t) + \frac{3432}{16384} \sin(2\pi f_{port} t) \right. \\
& - \frac{3003}{16384} \sin(2\pi(f_{port} + 2f_{env})t) - \frac{1001}{16384} \sin(2\pi(f_{port} - 2f_{env})t) \\
& + \frac{2002}{16384} \sin(2\pi(f_{port} + 4f_{env})t) - \frac{1001}{16384} \sin(2\pi(f_{port} + 6f_{env})t) \\
& + \frac{364}{16384} \sin(2\pi(f_{port} + 8f_{env})t) - \frac{91}{16384} \sin(2\pi(f_{port} + 10f_{env})t) \\
& \left. + \frac{14}{16384} \sin(2\pi(f_{port} + 12f_{env})t) - \frac{1}{16384} \sin(2\pi(f_{port} + 14f_{env})t) \right).
\end{aligned}$$

Les coefficients de ce développement découlent du calcul de la puissance du sinus. La puissance $n = 14$ est choisie car de toutes façons, notre simulation est limitée à 60 Hz, il est donc inutile d'essayer de simuler des harmoniques de plus haut rang.

Le signal obtenu peut être vu figure 6.15. On constate qu'il s'agit d'un modèle fort simplifié. Cependant, l'accord en fréquence est correct de façon générale. D'autre part, il serait possible d'adapter la hauteur de chaque harmonique au signal mesuré, mais cela paraît contradictoire : en effet, la hauteur relative de chaque harmonique dépend beaucoup de la propagation, il est donc inutile, voire contre-productif, de chercher à imiter un chant en particulier.

6.2.5.5 Conclusion sur les sources possibles

Chacune des trois sources produites présente des défauts :

- la fonction reconstruite par retournement temporel est peu régulière, peut-être à cause de l'hypothèse forte utilisée lors de la reconstruction du signal à partir d'un seul récepteur ;
- la fonction moyennée semble plausible dans la première moitié mais moins dans la seconde ;
- la fonction modélisée semble très artificielle.

En l'absence d'un critère théorique fort pour choisir a priori entre les trois possibilités, nous garderons les trois sources et vérifierons a posteriori quelles options donnent les meilleurs résultats, et dans quel cadre.

6.3 Premiers résultats

Pour la localisation de source par la méthode mono-hydrophone présentée, nous avons obtenu deux types de résultats. Une première phase présentée dans la section 6.3.1 ci-dessous concerne les tests simulés ou de laboratoires. Ces résultats nous servent essentiellement à valider les possibilités de l'outil (modélisation du champ acoustique par des méthodes aux éléments spectraux) et de la méthode. En deuxième phase (partie 6.3.2) nous proposons le résultats de nos tests de terrain, qui consiste à comparer des positions pointées par notre méthode avec la position relevée par l'équipe de suivi visuel. Cette partie se clôt par l'article publié pour la conférence IEEE-Océans en Juin 2019. Comme mentionné plus haut, trois simulations ont été réalisées en tout sur le centre de

calcul du CNRS. Ces trois simulations correspondent à des étapes d'amélioration de notre modèle (la fonctionnalité de la variation de la vitesse du son en fonction de la profondeur dans l'eau a été ajoutée lors de la deuxième simulation, la simulation fine des propriétés du sol dans la troisième, ...). Comme la finesse de la modélisation n'influe pas (ou peu) pour les tests dits 'simulés', les résultats des trois grandes simulations sont présentés de façon équivalente. En revanche, pour l'expérience de terrain (comparaison avec les résultats observés) seule la troisième simulation est utilisée.

6.3.1 Résultats des tests simulés et discussion

Comme nous l'avons évoqué dans la partie 6.2.3, une première étape dans les tests consiste à chercher à retrouver des baleines "simulées". Celles-ci correspondent à des positions choisies au hasard que nous essayons de retrouver en corrélant le signal reçu de ces positions avec le signal reçu de l'ensemble de points de la grille. Ce test ne permet pas de vérifier la qualité de nos modèles tant physique que biologique (paramètres de vitesse, de densité, signal source), mais uniquement l'applicabilité de la méthode. En particulier, on testera la réaction de SPECFEM à une bathymétrie complexe et à des signaux de fréquence beaucoup plus élevée que le type d'application pour lesquelles il a été conçu. Le test doit permettre également d'envisager un premier bilan de la méthode, qui, si elle ne fonctionne pas à ce niveau, n'aura aucune raison de fonctionner sur le terrain, quelle que soit la qualité de nos données.

Nous disposons pour ces tests de deux jeux de données : les résultats des deux simulations dites "Corcovado" d'une part (résumées table 6.1) et les résultats de la simulation dite "Chañaral" d'autre part (table 6.2). Ces deux jeux de données correspondent simplement à des temps différents de notre étude (avant d'avoir des données propres, nous avons utilisé des chants de baleines bleues fournis par notre collègue Susannah Buchan). Ils nous servent essentiellement pour tester la simulation en y intégrant progressivement le plus de paramètres physiques possibles. Pour chacun de ces jeux de données, 100 baleines ont été placées de façon aléatoire (50 par simulation pour les données "Corcovado", et 100 baleines pour la simulation "Chañaral").

6.3.1.1 Critères de corrélation

Dans les méthodes de localisation de type des champs d'onde adaptés (matched field processing) dans la famille desquelles se situe notre étude, une étape majeure est le choix du 'meilleur' signal au sens d'un critère bien choisi (voir partie 1.5.1.2). Il s'agit de construire une fonction spatiale de type fonction de coût, ou de vraisemblance, qui sera extrême pour la position de l'espace correspondant à la 'meilleure' solution au sens de ce critère.

Le critère que nous proposons pour la construction de cette fonction est lié au calcul d'une corrélation entre le signal reçu au point correspondant à une baleine et les signaux reçus de l'ensemble des points de la grille. Deux types de corrélation seront explorées, l'une située dans l'espace des fréquences (nommée **FFTCor**) et l'autre dans l'espace temporel (nommée **MaxCor**).

Corrélation entre les spectres La première fonction calculée est établie à partir des modules des transformée de Fourier des deux signaux : c'est le coefficient de corrélation linéaire (au sens statistique) entre les deux spectres. Concrètement, on applique une transformée de Fourier rapide sur chacun des signaux. On calcule ensuite le coefficient de corrélation entre les deux vecteurs correspondant à la norme de la transformée de Fourier de chaque signal. Le coefficient de corrélation linéaire est défini comme la covariance entre deux vecteurs, normalisée par le produit de leurs écarts types, ce qui se traduit par : soient deux vecteurs x, y de moyennes respectives $\langle x \rangle$ et $\langle y \rangle$ et d'écarts types $\sigma(x)$ et $\sigma(y)$, leur coefficient de corrélation vaut :

$$\text{corr}(x, y) = \frac{\sum_i (x_i - \langle x \rangle) \times (y_i - \langle y \rangle)}{(N - 1)(\sigma(x) \times \sigma(y))}. \quad (6.1)$$

Pour chaque baleine virtuelle, on obtient donc un réel compris entre 0 et 1 par point de la grille. L'information de phase de la transformée de Fourier n'est pas utilisée. Cette méthode sera notée **FFTCor** pour la suite.

Corrélation temporelle Pour la deuxième méthode, on calcule la fonction de corrélation entre les deux signaux en temps, sans passer par la transformée de Fourier. On rappelle la définition de la fonction de corrélation entre deux vecteurs réels x et y de même longueur N :

$$\text{pour } k \in [1 : N], R_{xy}(k) = \sum_{i=1}^N x_{i+k} \times y_i. \quad (6.2)$$

et R_{xy} est alors un vecteur de la même taille que x et y . On relève la valeur du maximum de cette fonction. La position du maximum (c'est-à-dire le décalage temporel entre les deux signaux) n'est pas relevée, puisque ce n'est pas une information qui pourra être utilisée par la suite, l'instant initial d'émission du son étant inconnu. La figure 6.16, en haut, présente l'exemple d'une corrélation entre un signal issu d'une baleine virtuelle (en l'occurrence la 25ème baleine de la grille de Chañaral) et le signal issu d'un point de la grille. On voit que la fonction présente un maximum bien visible. Sur la figure du bas, trois points de la grilles sont corrélés au signal issu de la même baleine virtuelle. On constate que le maximum de corrélation n'est pas constant : sa valeur est donc stockée pour chaque point de la grille. Cette méthode est notée **MaxCor** dans la suite.

6.3.1.2 Différentes sources

Dans le cas des simulations Corcovado, l'entrée est un signal réel enregistré dans la zone. En revanche, dans le cas de la simulation Chañaral, c'est une impulsion qui a été utilisée en entrée de la simulation. On a donc convolué a posteriori la réponse de la simulation en chaque point avec le signal source. Dans ce cas, les trois signaux sources décrits dans la partie 6.2.5 ont été successivement utilisés, il s'agit de la source modélisée mathématiquement (notée **mod**), la source issue du processus d'inversion par retournement temporel (notée **inv**) et la source obtenue par la moyenne de plusieurs signaux reçus (notée **moy**).

6.3.1.3 Cartes de corrélations

Les résultats de nos comparaisons sont présentés sous la forme de cartes de corrélation. Pour chaque baleine virtuelle, on crée une carte faisant figurer la valeur de la corrélation entre le signal issu de la baleine virtuelle et le signal issu de chaque point de la grille sur une coupe horizontale. Cette opération est répétée pour chacune des deux méthodes de corrélation (le coefficient de corrélation spectral **FFTCor** d'une part et le maximum de la fonction de corrélation temporelle **MaxCor** d'autre part), et chacune des sources testées (dans le cas de la simulation "Chañaral").

Le maximum de ces cartes (toutes profondeurs confondues) donne le résultat de la localisation, pour un type de méthode et un type de source donnés.

Des cartes de corrélations en deux dimensions (on ne montre que la couche correspondant au point trouvé) sont présentées en exemple, figure 6.17 pour les simulations sur Corcovado, et figure 6.18 pour la simulation Chañaral.

Ces exemples montrent quelques cas où la position a été retrouvée de façon satisfaisante, et quelques cas où la position n'est pas retrouvée. Dans l'ensemble, on peut voir une géométrie passablement différente dans les deux zones : alors que la symétrie centrale est forte autour de l'hydrophone dans les résultats Corcovado, elle l'est beaucoup moins pour les résultats Chañaral. Ceci reflète évidemment le fait que la bathymétrie autour de l'hydrophone est plus régulière à Corcovado. On se trouve, pour cette zone, dans une situation classique de guide de Pekeris, avec une

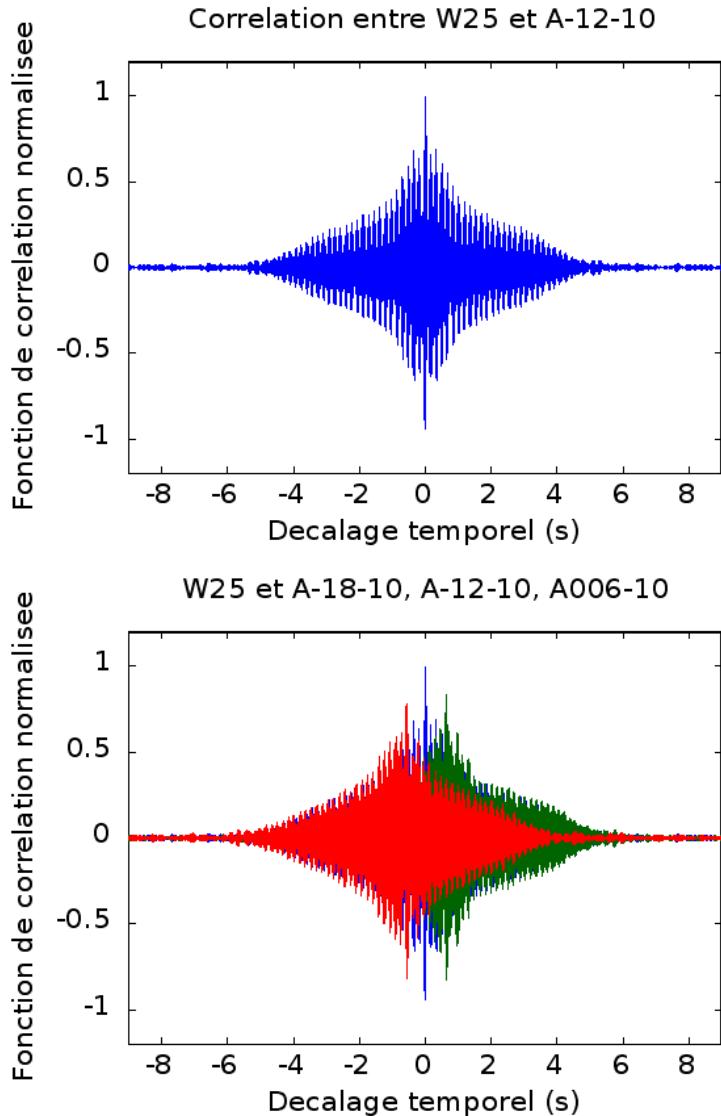


FIGURE 6.16 – Visualisation de la fonction de corrélation entre le signal émis par la baleine virtuelle W25(latitude -29.020° , longitude -71.546° , profondeur 14 m), dans la simulation Chañaral, et des signaux émis par différents points de la grille. En haut, on représente la corrélation entre W25 et un point de la grille, nommé A-12-10.Z10, qui correspond à la position trouvée par la méthode (latitude -29.021° , longitude -71.545° , profondeur 10 m). En bas, on représente trois fonctions de corrélation, obtenues pour trois positions différentes de la grille, à une même latitude et une même profondeur (longitudes respectives -71.555° , -71.545° et -71.513°). La deuxième de ces courbes correspond à la meilleure corrélation entre baleine et point de la grille

symétrie cylindrique autour de l'émission, symétrie uniquement rompue par la légère pente sud-ouest / nord-est. En revanche, la bathymétrie de Chañaral est plus irrégulière, avec le cañon qui

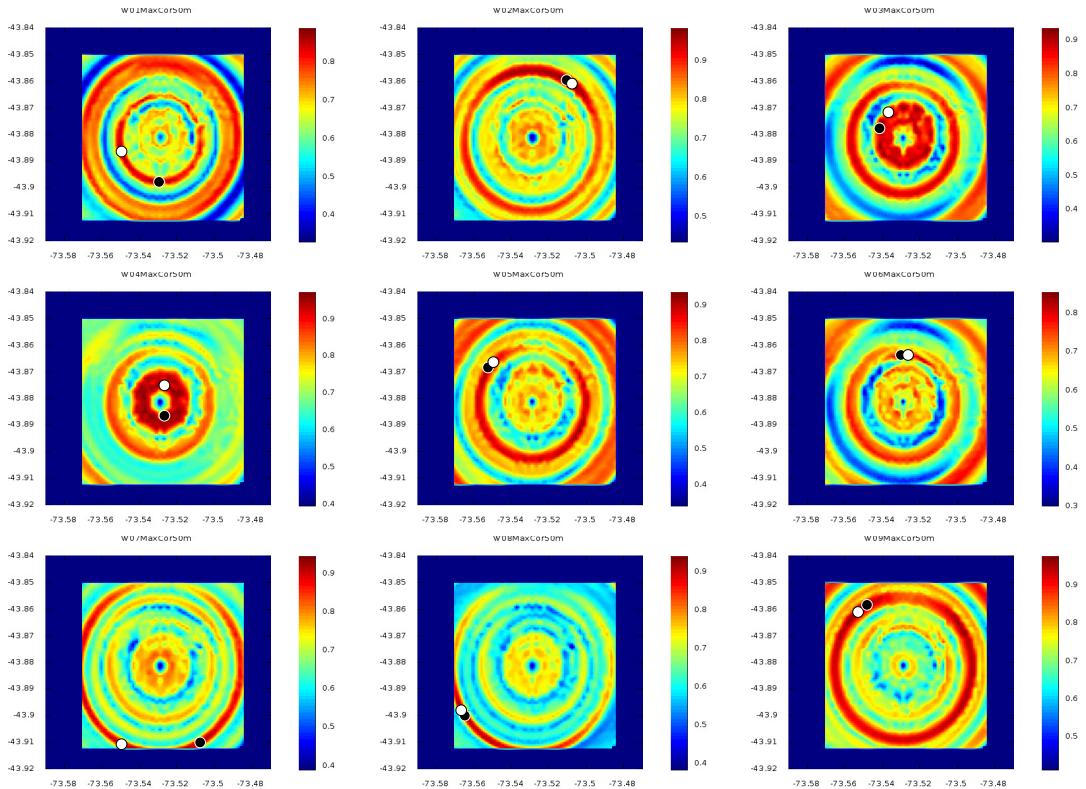


FIGURE 6.17 – Cartes de corrélation pour les neufs premières baleines virtuelles de la deuxième simulation Corcovado. La méthode représentée ici est la corrélation temporelle MaxCor. Sur chaque carte, le point noir représente la position réelle et le point blanc la position correspondant au maximum de corrélation.

perce par le sud le canal considéré.

Les cartes de la figure 6.19 montrent sur un exemple l'aspect des cartes pour les quatre profondeurs qui ont été proposées dans le cadre de la simulation Chañaral. Il s'agit d'un cas où la position de la baleine virtuelle a été correctement retrouvée, sur la couche de profondeur (10 mètres) la plus proche de la profondeur imposée à la baleine virtuelle. L'échelle de couleur (qui permet de visualiser la valeur du coefficient de corrélation en chaque point) est la même pour toutes les cartes, et permet de voir que la carte correspondant à l'altitude 10 mètres est plus contrastée que les trois autres, et présente en l'occurrence le pic de corrélation. La carte correspondant à la profondeur de 90 mètres présente un angle en haut à droite de basse corrélation, ce qui correspond à une faible profondeur : le signal est ici dans le sol et non pas dans l'eau.

6.3.1.4 Taux de localisation réussie par type de méthode et type de source

Les résultats généraux sont présentés dans le tableau 6.3. Quelques diagrammes sont aussi présentés sur la figure 6.20 qui permettent de mieux visualiser la répartition des résultats.

De façon générale, on peut résumer les résultats par les chiffres suivant : la position de la baleine virtuelle est retrouvée à 500 mètres près une fois sur deux à peu près, alors que la distance à l'hydrophone est retrouvée trois fois sur quatre. Dans l'ensemble, ces chiffres ne sont pas très

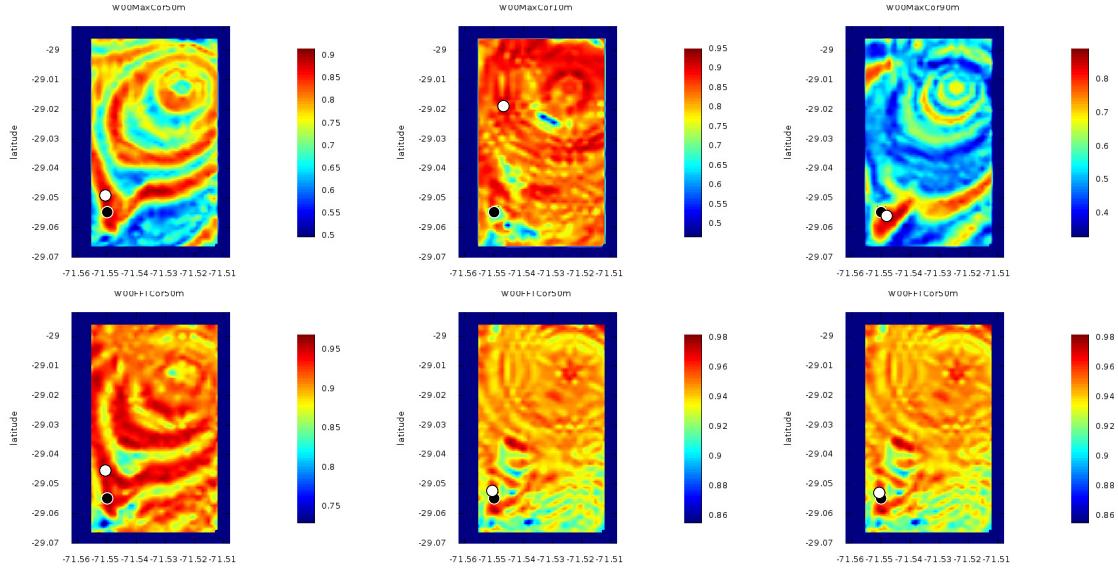


FIGURE 6.18 – Cartes de corrélation obtenues avec la simulation Chañaral : exemple de la 100ème baleine virtuelle, située à 64 mètres de profondeur. Sur chaque carte, la position réelle est marquée d'un point noir et la position retrouvée par la méthode est marquée d'un point blanc. De gauche à droite : sources **mod** (modélisée), **inv** (par inversion) et **moy** (moyennée). Ligne du haut : méthode de corrélation temporelle (**MaxCor**), colonne de droite : méthode de corrélation dans le domaine fréquentiel (**FFTCor**). Toutes les cartes représentent la couche à 50 mètres de profondeur, sauf la méthode **MaxCor** avec la source **inv** (première ligne, deuxième colonne) qui est la couche à 10 mètres de profondeur, et avec la source **moy** (première ligne, troisième colonne) qui représente la couche à 90

TABLE 6.3 – Résultats des tests simulés. Chaque cas a été testé sur 100 baleines virtuelles placées aléatoirement. Deux méthodes de corrélation sont testées, ainsi que trois types de sources pour la simulation Chañaral.

Simulation :		Corcovado	Chañaral		
			mod	inv	moy
Position horizontale trouvée à 200 mètres près	MaxCor	26	34	36	43
	FFTCor	16	19	24	32
Position horizontale trouvée à 500 mètres près	MaxCor	48	50	60	62
	FFTCor	41	32	45	43
Distance à l'hydrophone à 500 mètres près	MaxCor	98	78	87	86
	FFTCor	83	57	68	71
Profondeur correctement estimée	MaxCor	100	79	68	91
	FFTCor	94	70	66	71

hauts, surtout si l'on considère qu'il s'agit d'un test préliminaire qui ne fait pas intervenir la qualité des données permettant de paramétriser le modèle. En particulier, on voit qu'il sera illusoire d'espérer trouver la position d'une baleine à partir d'un seul chant, puisque le taux de réussite à 500 mètres près n'est que de 50%. En revanche, les résultats sont loin d'une répartition aléatoire et la méthode pointe en moyenne sur la bonne position : une bonne stratégie consiste donc à étudier

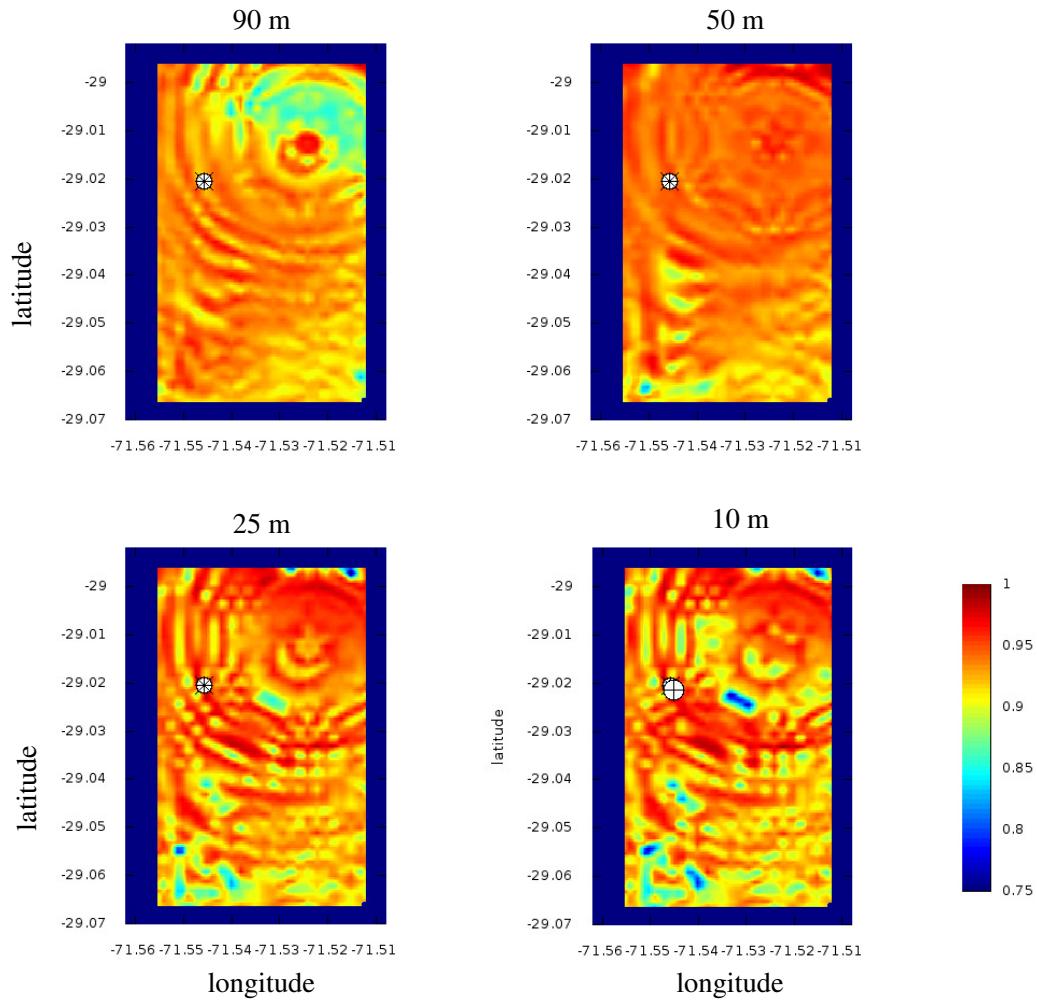


FIGURE 6.19 – Exemple de corrélations à différentes profondeurs. On montre ici un exemple issu de la simulation Chañaral (exemple de la 25ème baleine virtuelle, située à 14 mètres de profondeur). Sur chaque carte, la position horizontale de la baleine virtuelle est marquée d'une étoile noire sur fond de cercle blanc. Le maximum de corrélation est ici trouvé pour la couche située à 10 mètres de profondeur. Sur cette carte, la position du point trouvé est noté par une croix noire sur fond blanc. L'échelle de corrélation est la même pour toutes les cartes.

une série de chants émis par le même individu en peu de temps, et d'analyser statistiquement les résultats obtenus.

Dans le détail, on voit des différences assez fortes entre le site de Corcovado et le site de Chañaral : Sur Corcovado, la distance à l'hydrophone est très bien retrouvée (de l'ordre de 90 % des cas), elle l'est moins pour le site de Chañaral (environ 75% des cas). En revanche, la position horizontale (distance et azimut) est légèrement mieux retrouvée sur le site de Chañaral (presque 50% des cas contre moins de 45 % pour Corcovado). Naturellement, ces résultats peuvent être interprétés par la différence de géographie entre les lieux : comme il a déjà été mentionné, le site de Corcovado a un fond beaucoup plus régulier que celui de Chañaral. La distance y est plus facilement récupérée, par contre la position n'est pas toujours correctement interprétée (en particulier, il s'agit

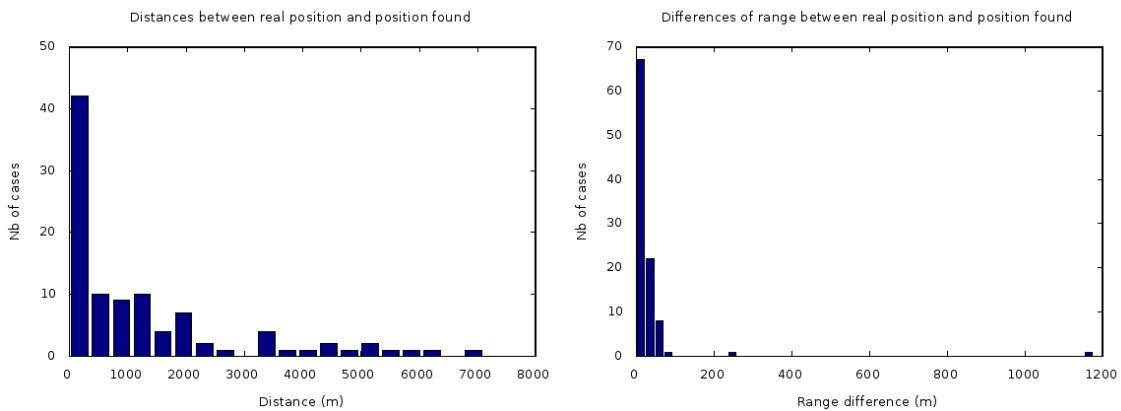


FIGURE 6.20 – Statistique des résultats Corcovado pour la méthode du maximum de corrélation temporelle. A gauche, la répartition des distances entre le point trouvé et la position de la baleine virtuelle. A droite, la répartition des différences entre la distance à l'hydrophone du point trouvé et la distance à l'hydrophone de la baleine virtuelle. Les échelles sont différentes entre les deux graphes.

souvent d'une erreur due à une quasi symétrie entre les deux demi-plans séparés par l'axe de la pente, sud-ouest / nord-est).

Dans l'ensemble, on constate que la corrélation dans le domaine temporel donne de meilleurs résultats, probablement parce que la corrélation en temporel contient plus d'information (puisque la méthode fréquentielle n'utilise que le module de la transformée de Fourier, perdant une partie de l'information). Cependant, il est à noter que la phase entre la première et la deuxième partie du signal n'est pas stable d'un chant à l'autre, comme nous l'avons constaté au moment de faire la moyenne entre plusieurs signaux (voir partie 6.2.5). Il faudra donc être prudents sur cette bonne performance de la méthode temporelle par rapport à la méthode fréquentielle (pour laquelle le déphasage entre première et deuxième partie importe moins) au moment de faire des tests sur des données réelles, pour lesquelles la fonction source n'est pas la même que le signal enregistré, contrairement aux tests simulés considérés ici.

En ce qui concerne la forme du signal d'entrée, pour lequel nous testons trois possibilités, on ne s'attend pas a priori à voir beaucoup d'effet puisque dans ces tests simulés, nous ne pouvons pas mettre à l'épreuve la ressemblance entre notre signal source et le signal réellement émis par la baleine. On constate cependant que la source correspondant à une modélisation mathématique donne des résultats significativement moins bons que les deux autres, qui sont construites à partir de données enregistrées et non d'une formule. On peut interpréter cette différence en supposant que le signal mathématique est moins riche en harmonie et en détails, ce qui expliquerait son efficacité moindre. Il semble donc important d'avoir un signal initial complexe pour appliquer cette méthode, ce qui rejoint l'importance d'avoir des signaux à large bande pour des localisations monohydrophone par modes adaptés (Le Touzé, 2007 [143]).

6.3.1.5 Conclusion sur les tests simulés

Nous tirons de l'analyse de ces tests comparés quelques premières conclusions qui nous paraissent les plus significatives :

- la méthode de modélisation du champ acoustique par éléments spectraux est faisable pour

- les échelles de taille et de fréquence considérées,
- alors qu'une bathymétrie relativement simple fait apparaître une large indétermination sur l'azimuth (symétrie forte), une situation côtière plus complexe telle que celle de notre deuxième terrain montre tout l'intérêt d'une simulation précise telle qu'offerte par nos méthodes de calcul haute performance,
- la méthode de localisation monohydrophone, même dans le cadre de tests simulés qui ne permettent pas de détecter les 'mismatches' (erreurs d'adéquation) environnementaux, ne permet de localiser la source que dans un cas sur deux environ, ce qui limitera l'utilisation ultérieure à des cas où l'information est suffisamment redondante.

6.3.2 Résultats terrain

La vérification terrain est obtenue en croisant deux types de résultats : d'une part les résultats d'observations visuelles menées depuis l'île de Chañaral, et d'autre part les résultats de notre modélisation et enregistrements acoustiques. Nous présentons ci-dessous d'abord la partie visuelle, puis le détails de nos résultats obtenus par l'analyse acoustique, et enfin le croisement entre les deux.

6.3.2.1 Résultats des observations visuelles

Les observations visuelles sont menées par une équipe de biologistes de l'université de Valparaíso. Les experts sont postés sur un point dominant de l'île Chañaral pour des missions de 12 jours, par permis spécial de la CONAF (organisme gérant la réserve terrestre de l'île). En effet, l'île est une réserve intégrale de façon à protéger les oiseaux marins qui y nichent, particulièrement le manchot de Humboldt (*Spheniscus humboldti*) et le puffinure de Garnot (*Pelecanoides garnotii*). Ces observations sont incluses dans un projet plus vaste de suivi de la faune marine et de gestion des zones protégées dirigé par Maritza Sepulveda et Macarena Santos (voir Sepulveda et al. 2017 [127]). L'équipe de 5 ou 6 personnes est munie de deux théodolites leur permettant de mesurer la position d'une cible à quelques centaines de mètres près (selon la distance) sur une aire d'observation allant de l'île à la côte (voir figure 6.21). De 9 heures du matin à 6 heures du soir, lorsque le vent se maintient en dessous de quatre Beaufort, l'équipe observe à la fois les grands cétacés et les bateaux de tourisme, notant la position de chacun, ainsi que des suivis de trajectoires de façon à estimer les réactions des animaux à la pression touristique. A notre demande, l'équipe fait également un relevé général des cétacés présents sur zone toute les heures (entre 9h et 18h), notant l'espèce et la position.



FIGURE 6.21 – Vue du point d'observation sur l'île de Chañaral. La côte est visible de l'autre côté du canal, avec notamment les roches noires de Palo Gordo. Photographie de Macarena Santos, tirée du live de Sepúlveda et al. 2016 [126].

Les données qui nous intéressent ont été obtenues lors de deux sessions de douze jours d'observation en 2017, du 17/01/2017 au 28/01/2017 puis du 15/02/2017 au 26/02/2017. Comme nous l'avons mentionné au chapitre 3, trois espèces de mysticètes sont communément observées dans la zone : le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*), le plus abondant, la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*) et la baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*). La figure 6.22 montre les résultats de ces deux sessions d'observation en 2017, chaque point représentant une observation. Naturellement, ces résultats ne permettent pas de savoir combien d'animaux ont été vus, dans la mesure où chaque animal peut être marqué plusieurs fois. L'aire couverte par les observations correspond à la boîte que nous avons choisie pour le modèle : on constate que 95% des observations visuelles sont incluses dans notre périmètre de modélisation.

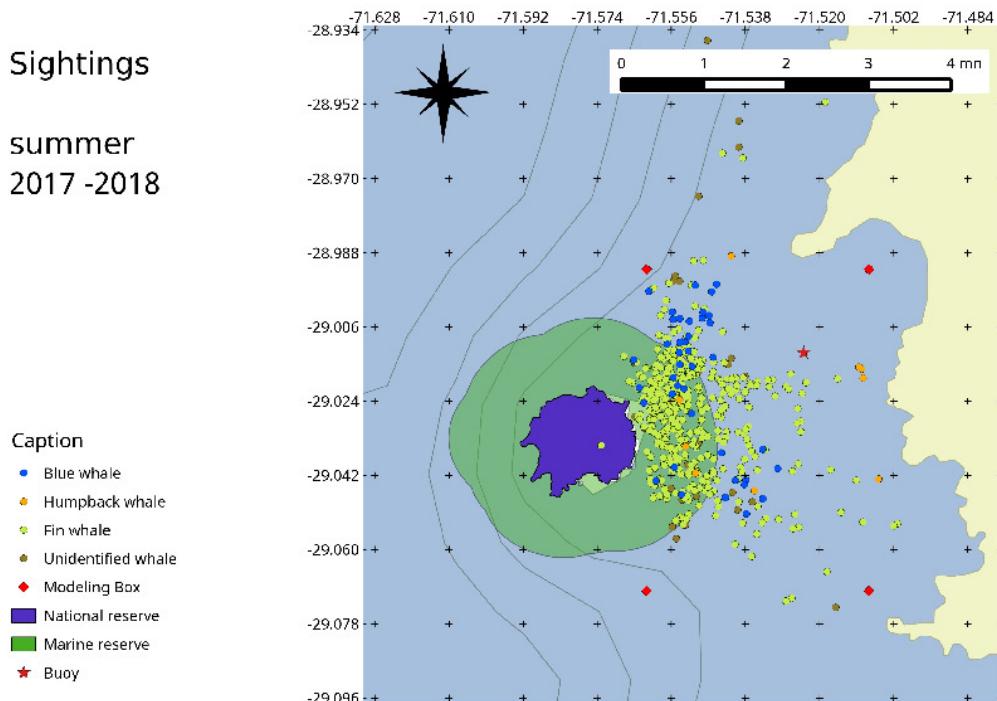


FIGURE 6.22 – Observation de mysticètes depuis l'île de Chañaral par l'équipe de Maritza Sepulveda et Macarena Santos (voir Sepulveda et al. 2017 [127]). L'étoile marque la position de notre hydrophone, et le rectangle matérialisé par des croix rouges la position de notre boîte de modélisation.

Nous sommes intéressés uniquement par les observations de baleine bleue, puisque leur chant est le signal que nous avons choisi. Malheureusement, les observations de baleine bleue ne sont pas les plus communes. Sur 500 observations, seules 40 concernent cette espèce, aperçue sur 9 jours seulement. Parfois l'animal est suivi toute la journée : par exemple la première détection de baleine bleue a eu lieu le 18 janvier ; elle a été notée 17 fois durant le temps d'observation. Parfois au contraire, l'animal n'apparaît qu'une fois dans les notes, soit qu'il n'ait fait que passer, soit qu'il n'ait pas été détecté pendant les relevés effectués toutes les heures.

Par ailleurs, la probabilité que l'animal émette un chant n'est bien sûr pas égale à un, c'est à dire qu'un animal aperçu n'est pas forcément en train de chanter. Nous touchons là le problème du taux d'émission sonore évoqué dans la partie 1.4.3 traitant de l'estimation d'abondance.

D'après Oleson et al. 2007 [99] seuls les mâles émettent ce type de vocalisations. Pour cette raison, les chants sont supposés avoir un lien avec des comportements de reproduction (marquage de territoire, affirmation de présence, etc.). La zone de l'archipel de Humboldt à laquelle le canal appartient est reconnue comme zone d'alimentation pour les grands rorquals (voir notamment Toro et al. 2016 [142]). Cependant, les détections très fréquentes de chants dans nos données acoustiques (voir chapitre 4) semblent montrer que les baleines bleues émettent leurs chants même sur des terrains dits d'alimentation. Il est intéressant de noter qu'au contraire, aucun chant (au sens d'émission stéréotypée probablement liée à la reproduction) de rorqual commun n'a été détecté sur la zone, malgré leur présence permanente.

6.3.2.2 Choix des jeux de données acoustiques

L'ensemble des chants de baleine bleue (dits SEP 2) détectés dans nos enregistrements a été décrit au chapitre 4. Plus de 2000 phrases ont été détectées par inspection visuelle, ce qui représente des détections pratiquement quotidiennes sur la période étudiée.

Cependant, la qualité de ces enregistrements, en terme de signal sur bruit, est très variable. Les baleines bleues sont réputées être parmi les sources acoustiques les plus puissantes du monde animal, avec des intensités mesurées atteignant les 180 dB ref 1 μPa @ 1 m (Samaran et al. 2010 [124]). Ces sons, de très basse fréquence (entre 15 Hz et 100 Hz, voir McDonald et al. 2006 [84]) se propagent très efficacement dans l'océan (voir chapitre 2). Il est donc probable que nous puissions percevoir les chants émis par des animaux se trouvant très éloignés de l'hydrophone. La limite de détection de ce type de son peut en effet atteindre les 100 km dans certaines expériences (voir Dreicer et al. 2018 [35]).

Les détections que nous avons dans notre corpus de données ont des valeurs de signal sur bruit allant d'une valeur très élevée à des valeurs très faibles. La figure 6.23 donne un aperçu de la différence entre un signal très clair et un signal très bruité en représentation temps-fréquence.

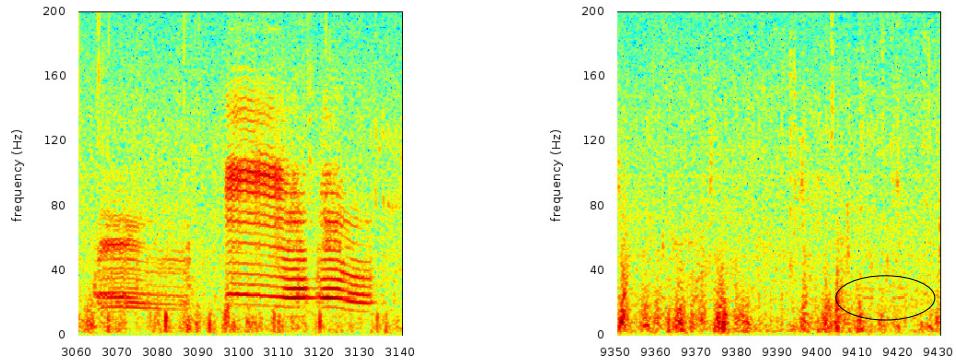


FIGURE 6.23 – Représentation temps-fréquence de deux détections d'une phrase SEP2 de chant de baleine bleue. A gauche, un extrait du 2 février 2017 ayant un signal sur bruit excellent, tous les détails du chant présentés au chapitre 4 apparaissent. A droite, un extrait du 11 février avec un signal sur bruit très faible. Seule la partie la plus intense du chant est détectable, à savoir les deux traits à 23 Hz qui durent environ 5 secondes chacun (entourés). Les deux images sont des extraits de 80 secondes, et la FFT a été calculée avec des fenêtres de Hanning de 2^{12} points.

Nous avons vu dans la partie 6.3.1 que notre méthode est sensible à la richesse du signal d'entrée : pour distinguer entre les positions, il est nécessaire d'avoir un signal comprenant des parties harmoniques et des variations de fréquences. Un signal très faible tel que celui décrit dans

la partie droite de la figure 6.23 n'est donc pas un bon candidat pour être comparé avec les résultats de notre simulation. De plus, il est probable qu'un tel signal viennent d'un animal distant. En effet, bien que l'intensité ne soit pas un bon indicateur de la distance de la source en général, dans ce cas où les chants sont remarquables par leur stabilité, on peut supposer qu'une telle différence de niveau (30 dB de différence de signal sur bruit entre les deux images de la figure 6.23) est au moins en partie due à un effet de distance ou de masquage. Nous en déduisons qu'il est fort probable que l'animal soit de toutes façons hors de la boîte dans laquelle est faite la simulation.

Etant donnés les résultats obtenus sur nos tests simulés (partie 6.3.1), nous ne pouvons pas nous attendre à un taux de reconstruction de la position meilleur que 50 %, même à supposer tous les paramètres du modèle parfaitement adaptés à la réalité. Nous avons donc besoin de données redondantes pour pouvoir espérer localiser un animal. La zone étudiée étant une zone d'alimentation, les baleines ne sont pas en déplacement mais restent généralement assez statiques, effectuant de courtes boucles probablement autour des bancs de krill (essentiellement constitué de l'espèce *Euphausia mucronata* dans l'archipel de Humboldt, voir Thiel et al. 2007 [138]). Par ailleurs, nous avons vu dans la partie concernant la caractérisation de ces chants (chapitre 4) que, lors de leurs chants, les baleines bleues répètent inlassablement la même phrase, toutes les deux minutes en général, et ceci pendant plusieurs heures. Nous avons donc de longues séries de ces phrases, émises sans aucun doute par le même individu, étant donné la structure du chant, le faible taux de superpositions que nous avons dans nos données, et le peu d'individus aperçus.

Pour tester notre méthode de localisation de baleines bleues dans une boîte de 10 km de long, nous avons donc besoin de sélectionner des séries de phrases cohérentes (appartenant à un même chant) de très bon signal sur bruit. Ces caractéristiques ne sont pas si fréquentes dans les enregistrements, faisant écho aux indices de présence plutôt rares obtenus par l'équipe chargées des observations visuelles.

Les jeux de données finalement sélectionnés, comprenant tous au moins 10 phrases successives avec un signal sur bruit supérieur à 25 dB, sont présentés ci-dessous :

- enregistrement du 19/01/2017 : 16 phrases, durée 1 heure, de nuit, signal sur bruit relativement faible (**jeu 1**) ;
- enregistrement du 24/01/2017 : 21 phrases, durée 1 heure, en matinée (**jeu 2**) ;
- enregistrement du 24/01/2017 : 20 phrases, durée 2 heures, en après-midi, signal sur bruit relativement faible (**jeu 3**) ;
- enregistrement du 02/02/2017 : 52 phrases avec un signal sur bruit excellent, durée trois heures, de nuit (**jeu 4**) ;
- enregistrement du 22/02/2017 : 16 phrases avec un niveau de signal fort mais beaucoup de bruit dû à un accident sur l'appareil enregistreur, durée une heure, de nuit (**jeu 5**) ;

6.3.2.3 Résultats

Lorsque nous comparons les jeux de données acoustiques choisis dans le paragraphe précédent avec les observations visuelles de baleines bleues, nous ne trouvons qu'un seul événement en commun. Il s'agit du jeu de données numéro 2, le seul parmi les cinq séries sélectionnées qui soit à la fois de très bonne qualité et ayant eu lieu durant les heures d'observation de l'équipe postée sur l'île, le 24 janvier 2017. Il s'agit donc du seul cas où nous ayons simultanément un fort enregistrement acoustique et une détection visuelle.

Pour ce jeu, nous avons donc corrélé les signaux simulés des 4160 points de notre grille (voir figure 6.8) avec chacune des phrases de la série. Ce travail est fait pour les trois sources possibles et les deux méthodes de corrélation (voir explications dans la partie 6.2.4). Nous faisons la même chose pour les quatre autres jeux de données, bien que nous n'ayons pas de contrepartie visuelle pour ceux-ci.

Pour chaque phrase nous trouvons une position correspondant au maximum de corrélation

(quelle que soit la méthode utilisée). Nous découpons alors notre boîte en 78 rectangles mesurant approximativement 0,5 milles nautiques sur 0,4. Nous comptons ensuite le nombre de phrases trouvées dans chacun des rectangles. De cette façon nous construisons une carte grossière de pics de présence. Nous supposerons que la case la plus souvent retrouvée par la méthode, si il y en a une, correspond à la position réelle de l'animal

Quels que soient les jeux de données, les sources correspondant à une modélisation mathématique (`mod`) et une moyenne sur plusieurs signaux (`moy`) ne donnent pas des résultats cohérents : on obtient soit une répartition uniforme ne pointant sur aucune case en particulier, soit des résultats impossibles (baleines localisée dans la couche rocheuse...). De même, les corrélations obtenues dans le domaine temporel ne donnent aucun résultat exploitable.

En revanche, les résultats obtenus en utilisant la méthode de corrélation dans le domaine fréquentiel et la source obtenue par retournement temporel nous obtenons un pic de présence sur une case pour trois des cinq jeux de données choisis. Ces trois jeux correspondent à ceux pour lequel le signal est le plus intense (jeux 2, 4 et 5). Les deux jeux restant ne donnent pas de résultat (aucune case n'est privilégiée).

Les cas correspondant aux trois jeux de données pour lesquel le signal est fort sont présentés dans la figure 6.24. Il s'agit du jeu 2 (24 janvier, matinée), du jeu 4 (2 février, nuit) et du jeu 5 (22 février, nuit). Le jeu 2 correspond à celui pour lequel nous avons une détection visuelle, et celle-ci correspond à la case la plus souvent choisie dans nos résultats (voir figure 6.25 sur laquelle la densité de résultats est insérée à la carte). Dans les deux autres cas (le 2 et le 22 février), notre méthode pointe vers un zone proche d'une péninsule rocheuse à la sortie du village Caleta Chañaral de Aceituno. Nous notons qu'un projet de science citoyenne, mis en place par la CONAF (gestion des zones protégées) signale la présence de deux baleines bleues en matinée du 2 février, soit quelques heures après nos enregistrements (Susannah Buchan and Marinella Maldonado, communication privée) "à la sortie du port". Ces données sont à prendre avec précaution mais correspondent de façon intéressante à nos résultats.

6.4 Discussion

Quelle peut être l'interprétation de nos résultats ?

Considérons premièrement les raisons pour lesquelles seule une des trois sources testées donne des résultats plausibles. Le modèle mathématique (`mod`) donnait déjà des résultats assez mauvais pour les tests simulés : il paraît probable qu'il ne comporte pas assez d'information, qu'il ne soit pas suffisemment riche pour permettre sa localisation, même comparé à lui-même. Il est possible également qu'il soit trop loin d'un signal biologique réel pour pouvoir lui être comparé. La source obtenue par moyenne (`moy`) ne donne pas non plus de résultats satisfaisants. Nous avons vu que le décalage en phase entre la première et deuxième partie du signal n'est pas stable entre les différentes phrases. Cela implique que la deuxième partie, qui fait la moyenne de signaux affectés d'une phase à l'origine aléatoire, est très atténuée par rapport à la première partie. Comme nous l'avons vu dans la partie 6.2.5, la deuxième partie de cette source est faible par rapport aux signaux enregistrés. Cela peut expliquer que cette source ne constitue pas non plus un bon point de départ.

Enfin, nous constatons que la méthode de corrélation dans le domaine temporel ne donne pas non plus de résultats satisfaisants, ce qui pourrait être expliqué par le même type de phénomène : le déphasage entre la première et la deuxième partie du chant n'étant pas constant entre les différentes phrases produites, toute l'information contenue dans la deuxième partie (et dans la baisse en fréquence) est perdue dans la corrélation. Ce problème n'était pas mis en évidence dans les tests simulés puisque la source était corrélée à une version propagée d'elle-même, ce qui n'est pas le cas dans les tests sur le terrain.

La dernière méthode, utilisant la source reconstruite par retournement temporel, malgré ses

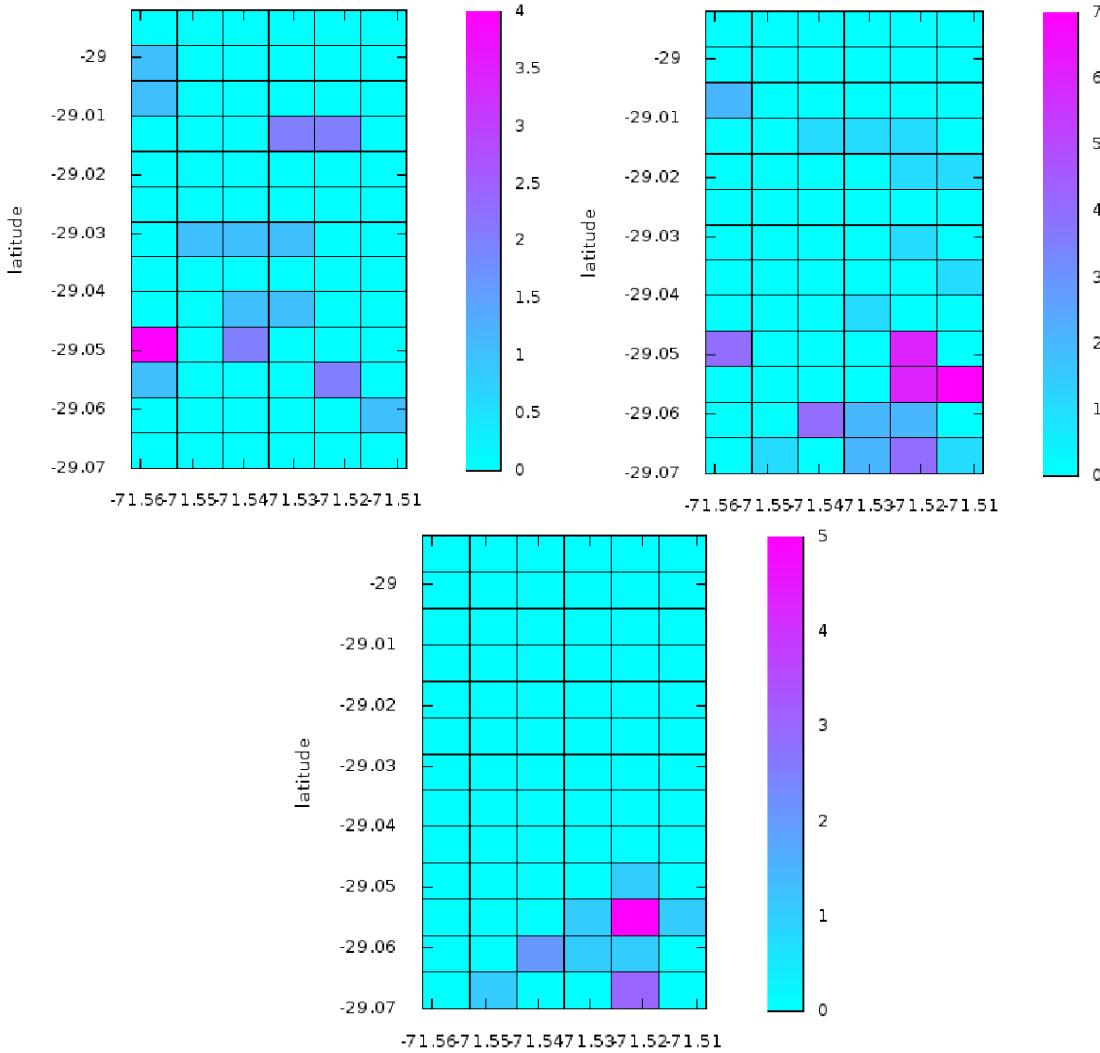


FIGURE 6.24 – Cartes de pics de présence obtenues pour trois des jeux de données sélectionnés. En haut à gauche : jeu 2 enregistré le 24 janvier, en matinée. En haut à droite : jeu 4, enregistré le 2 février, de nuit. En bas : jeu 5, enregistré le 22 février, de nuit. Les coordonnées sont en degrés (avec décimales).

défauts (que nous pointons dans la partie 6.2.5), donne des résultats intéressants. Le seul cas où nous avons une correspondance entre les observations visuelles menées par l'équipe de biologistes et nos enregistrement est correctement résolue. Les deux autres jeux de données présentant un signal fort pointent vers des positions proches de la sortie de la Caleta (petit port de pêche), une zone où des animaux sont souvent observés le matin, avant la sortie des bateaux de tourisme (observation personnelle, corroborée par des témoignages des résidents, et notamment du patron pêcheur Patricio Ortiz, en général le premier à sortir du port le matin). Les deux cas où la méthode ne donne pas de résultats sont ceux qui comportent des signaux faibles, ce qui peut être interprété comme concernant des animaux se trouvant hors de la boîte où la simulation a été conduite. En effet le dernier jeu de données concerne des phrases ayant un signal sur bruit relativement faible,

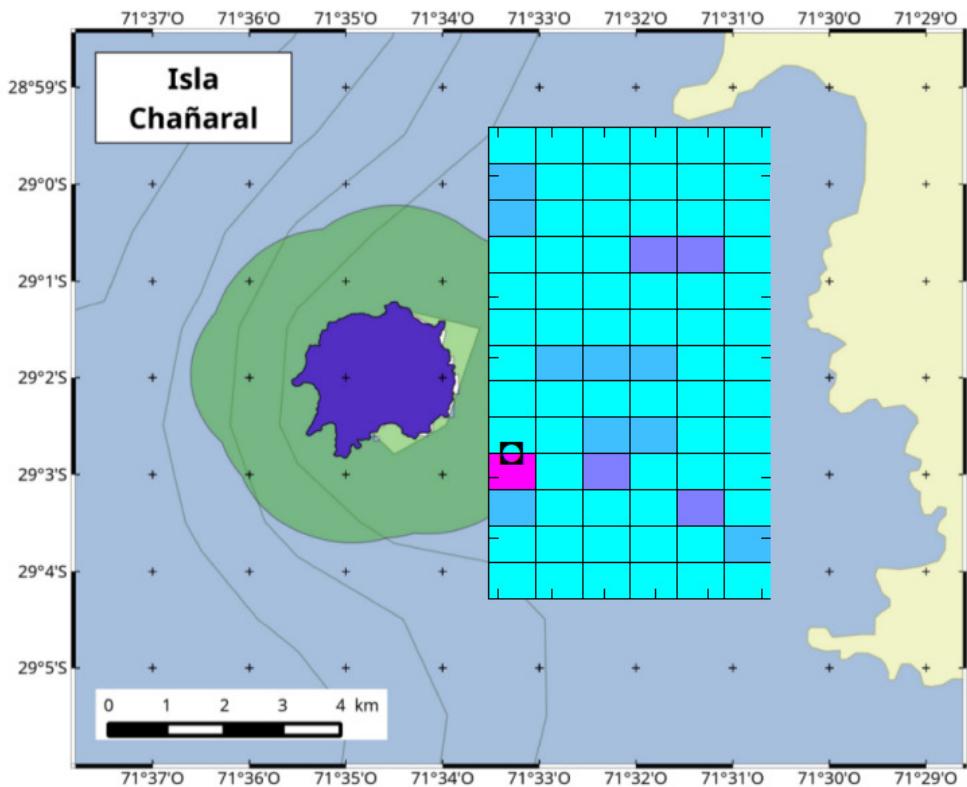


FIGURE 6.25 – La carte de pic de présence obtenue pour le jeu 2 insérée dans la carte géographique de la zone. Le point noir correspond à la localisation visuelle d'une baleine bleue dans la zone de temps concernée. Les coordonnées ont été ramenées en degrés et minutes pour en faciliter la lisibilité.

mais où le signal est en lui-même fort, bien qu'il soit superposé à des bruits forts eux aussi. Ce jeu permet d'obtenir une localisation, bien que son rapport signal sur bruit soit faible. Dans ce cas, on peut imaginer que ce n'est pas tant la faiblesse du signal sur bruit qui rend la méthode inopérante, mais bien la position de la baleine, qui se trouve hors de la zone étudiée. Cette constatation est positive car elle permet d'imaginer d'étendre la taille de la boîte de simulation : la qualité du signal pourrait être suffisante pour retrouver l'animal, même si celui-ci est un peu loin.

La conclusion la plus évidente est qu'un résultat encourageant a été obtenu, mais que beaucoup de travail reste à faire pour délimiter les possibilités de la méthode avant de la valider. Des tests sur les simulations pour vérifier la robustesse du modèle à des variations de paramètres physiques sont nécessaires, dans la mesure où ceux-ci ne sont qu'imparfaitement connus. Ces tests permettraient de vérifier la solidité de l'ensemble même en l'absence d'autres données terrains, qui sont naturellement beaucoup plus difficiles à obtenir. De même, un travail de fond est en cours pour vérifier la robustesse à la source - ce travail est un peu trop long pour pouvoir figurer au sein de ce premier bilan, mais il est en cours d'élaboration. Il consiste à vérifier sur des tests simulés les statistiques obtenues pour deux variations du signal d'entrée par rapport à celui des baleines simulées :

- lorsque la phase entre la première et la deuxième partie est légèrement changée. Cela nécessite un peu de travail pour modifier un signal sans le déformer, en lui gardant sa régularité spectrale.

- lorsque le signal d'entrée est bruité par rapport au signal “émis” par les baleines simulées. Dans ce cas, il s'agit de rajouter un bruit prélevé sur un morceau d'enregistrement sans signal, affecté d'un certain facteur multiplicatif. Ce facteur augmentant, on cherchera à voir l'évolution des statistiques de réponses de la méthode.

Nous notons par ailleurs que la méthode une fois construite nécessite relativement peu d'efforts pour être appliquée à d'autres données. En particulier, des données historiques peuvent être exploitées, ce qui ouvre un champ plus important et ne suppose pas la mise en place de tout le protocole développé ici. La méthode nécessite, pour être validée, des données acoustiques et visuelles, une connaissance de la bathymétrie et de l'océanologie de la zone concernée (cela peut être déterminé a posteriori, ce ne sont pas des paramètres très variables), et une simulation un peu lourde. Tout le travail d'adaptation du logiciel, et de dégrossir les méthodes à employer, peut être utilisé en l'état. Une fois validée, la méthode ne nécessiterait plus qu'un jeu de données de bonne qualité acoustique, une connaissance du lieu et une grosse simulation informatique, tout à fait accessible avec les moyens actuels.

6.5 Article publié par la conférence MTS/IEEE Océans 2019

Mono-hydrophone localization of baleen whales: a study of propagation using a spectral element method applied in Northern Chile

Julie Patris

*Université d'Aix Marseille,
Université de Toulon,
CNRS, LIS*

Marseille, France

julie.patris@univ-amu.fr

Dimitri Komatitsch

*Université d'Aix Marseille,
Centrale Marseille,
CNRS, LMA*

Marseille, France

Maritza Sepúlveda

*Universidad de Valparaíso
Valparaíso, Chile*

Macarena Santos

*Centro de investigación Eutropia
Santiago, Chile*

Hervé Glotin

*Université d'Aix Marseille,
Université de Toulon,
CNRS, LIS*

Toulon, France

Franck Malige

*Université d'Aix Marseille,
Université de Toulon,
CNRS, LIS*

Toulon, France

Susannah Buchan

*Centro de Estudios Avanzados
en Zonas Aridas, COPAS Sur-Austral
Universidad de Concepción
Concepción, Chile*

Mark Asch

*Université de Picardie
CNRS, LAMFA
Amiens, France*

Abstract—In the context of passive acoustic monitoring of large whales, we propose a new method for localizing blue whales (*Balaenoptera musculus*) from the acoustic recordings of only one sensor. We use a precise modelling of the sound propagation thanks to SPECFEM, a spectral element code for solving wave propagation equations. Based on field measurements in Northern Chile, we ran a simulation on a large supercomputer. We also exploited a recording device, Bombyx II, for one and a half months, with visual monitoring of the zone by a group of experts. We find that the method applied to the south east Pacific song of blue whales gives theoretical results of about 50% success in position recovery. Since we have redundancy in our data, we were able to locate the whale with a precision of 500 m over a box of 10 km by 5 km in the case when we have both visual detection and a strong acoustic signal. More tests should be performed before validating this method, but these first results are encouraging.

Index Terms—bioacoustics, acoustic propagation, underwater acoustics, source localization

I. INTRODUCTION

The conservation of cetaceans has been a major environmental concern for the last 50 years. The population of most large whales probably went down to the verge of extinction during the XXth century (Handbook of the mammals of the world, vol. 4 [1]), due to non sustainable whaling. Since then, new dangers are arising for large and small cetaceans, such as the general level of man-made noise in the oceans (see Boyd et al. 2011 [2], for an international quiet ocean experiment).

One of the first and the most difficult tasks for cetacean preservation is to estimate their actual number (see for instance Branch et al. 2004 [3] for the difficulty of estimating whale populations).

In this context, passive acoustic monitoring has been increasingly used to estimate cetacean populations (Mc Donald

and Fox 1999 [4]), although it is still a challenging technique for most species. Among other difficulties, estimating population numbers usually requires evaluating the distance of the emitter (see distance sampling methods, Marques et al. 2013 [5]). This is usually done with an array of hydrophones, by the computation of time delays of arrival (Giraudet et al. 2008 [6]) or matched-field processing (Kuperman et al. 2004 [7]). However, installing an array of hydrophones means complicated field work that is not always possible. Although it is rather common to measure with towed hydrophones, for small cetaceans for instance (see Andriolo 2018 [8]), it remains difficult for fixed instruments and large wavelength measurements.

Several authors have proposed methods for mono-hydrophone localization, as early as in 1987 (Li and Clay [9]). Most of these works concern theoretical studies coupled with active experiments (Lee 1998 [10], Kuperman et al. 2001 [11], Le Touzé et al. 2008 [12]) on short, broadband, known sounds (typically gunshots). Some studies also permit the recovery of a whale's position or range based on short signals with multiple arrivals, such as the works of Mc Donald et al. 1999 [4] with fin whales (*Balaenoptera physalus*), Tiemann et al. 2006 [13] for sperm whales (*Physeter macrocephalus*) and Bonnel et al. 2014 [14] for bowhead whales (*Balaena mysticetus*). One very interesting attempt is proposed by Harris et al. 2013 [15] and Matias et al. 2015 [16]. In their study they use seismic accelerometers where the 3-component signal recorded by the accelerometer allows to find the range (distance from sensor) of the emitting baleen whale up to 3 km more or less. What is more, numerous studies have shown that ‘naive’ methods based on sound intensity are very tricky and usually not reliable. For instance, Stimpert et al. 2015 [17]

compare the intensity of the received signal on a hydrophone on a tagged whale. The received level is not significantly different between the tagged whale and its neighbours.

To our knowledge, no attempt has been made towards recovering the position of the source for a long harmonic signal. Blue whales (*Balaenoptera musculus*) emit such long and complicated signals at very low frequency (see McDonald et al. 2006 [18]) with different patterns depending on the geographical zone. These songs also are remarkably auto-similar, with no perceptible difference between calls emitted by different individuals on intermediate time scales (see Mallige et al. 2019, [19]). An interesting case is the Chilean blue whale, with a song recently characterized by Buchan et al. in 2014 [20], presenting a high degree of complexity and regularity, and with animals repeatedly seen close to the shore in southern and northern Chile (Toro et al. [21]).

In this paper, we build a highly precise model of the sound propagation with spectral element methods (section II). This allows us to take advantage of the breaking of symmetry due to complex coastal environments and retrieve in 50% of the cases an approximate position of the emitter in laboratory tests (section IV). We also describe a field experiment conducted to test our method on blue whales' songs (section III) and its results (section IV).

II. COMPUTATIONAL METHOD

A. General description

A fixed hydrophone is a common tool for oceanographers and biologists studying whales: it is not expensive, and it allows long term surveys of acoustical signals (see for instance Martinelli et al. 2016 [22] in Latin America). As stressed by Martinelli, such hydrophones have been used by many authors throughout the world to explore the presence of cetaceans, or study the patterns of emission of songs, or the characteristics of these songs.

However, it is very difficult now to recover the emitter's position with only one hydrophone, especially for long calls. Thus, the amount of historical data recorded with a single fixed hydrophone cannot be used for the estimation of population density.

To achieve monohydrophone localization of long, low frequency signals, we propose using highly precise computational methods such as finite elements. These simulation techniques are time consuming but very precise, adapted both to transitory and harmonic signals. Time domain simulation allows us to work on an input signal that is closer to a phenomenon of reverberation than simple separable echos.

B. Simulation techniques and software

Because sound is the primary method of communication in the ocean, the physics of sound propagation have been intensively studied, involving large scale simulation with various methods (Jensen et al. 2011 [23]). Most of the efforts however have been focused on modelling active acoustics, which implies sending an artificial signal and analyzing its propagation through water and (or) ground (oil industry

prospecting, fisheries or military sonars). The most frequently used methods include ray propagation and parabolic methods (Etter 2012 [24]). Also, most methods assume the source of the sound to be a standard signal (a Gaussian or its derivative usually). In our case, the entry signal will be a complex biological signal.

Since we need high precision on the modelled form of the signal, we first need to develop fast and accurate computational methods for wave propagation problems based on state-of-the-art techniques such as the finite element method (FEM). This method presents a high degree of accuracy but requires large computing resources.

The method that we use for this study is SPECFEM open-source software (Tromp et al. 2008 [25]). SPECFEM was first developed for the simulation of seismic wave propagation at large scales in full wave forms. The method combines finite element methods and spectral elements, using a weak formulation of the equation of propagation, which is solved on a mesh of hexahedral elements (Komatsch et al. 2005 [26]). The software and user manual can be found at the following web site: <https://geodynamics.org/cig/software/specfem3d/>.

The software accepts as an entry both the environment box and the signal to be propagated. The box is a 3D domain meshed with hexahedral elements. A mesher is included in the SPECFEM package so a meshing of the geographical environment can be performed by the software with information of the properties of the medium. In our case, the meshed domain is implemented mainly with information of a bathymetry, expressed as the coordinates of the interface between two media (ocean floor and water).

As a very accurate software, SPECFEM is however very time-consuming. Computational time for a single simulation depends mainly on the size of the box in terms of wavelengths. Traditionally, these tools are used in boxes up to around 100 wavelengths. Because both the sampling distance and time step depend on the frequency, the total computing time is highly dependent on the frequency and for the 3D version of SPECFEM, we usually have a dependency on the power of four (meaning that an augmentation of 20% of the frequency implies a doubling of the computing time). As a consequence, this modelling method can only be acceptable for either low frequencies or small boxes. Hence our idea of applying them to large baleen whales sounds, since large mysticetes are among the loudest and lowest-frequency sound producers in the sea.

We found that modelling the sound propagation in our box, which is 10 km wide in latitude and longitude, and 500 m deep, for frequencies up to 50 Hz, we need around 10 000 hours of computation time. As we see, parallel algorithms of computation are extremely important for such methods, and this is also one of the important achievements of the SPECFEM package.

One of the problems of this family of numerical methods is to model 'open' box frontiers. We used Stacey [27] absorbing conditions, proposed by the software. At the same time, with the help of Alexis Bottero and Vadim Monteiller at the LMA in Marseilles, we worked on the inclusion of a depth-dependant

sound velocity inside the water. This function was already present in the code, but incompatible with the internal mesher. It is now possible to use both in a simulation.

Our project involves not only the simulation of the wave propagation, but also an inverse problem to find the position where our simulated signal is closer to the measured one. Having an order of 10 000 hours for one simulation prohibits a classical inverse method, so we propose an original idea to solve our inverse problem with only one simulation. Our modelling is based on the reciprocity principle of the Green's function (see for instance the book *Computational Ocean Acoustics* by Jensen et al. [23]), which is the acoustical expression of the Helmholtz principle in optics (simply characterized by the general principle: if I can see you, you can see me). In a static, linear medium, the Helmholtz principle states that if one was able to swap the sensor and wave source, the measurement of flux would remain equal. Tests with SPECFEM simulations show that the differences between the two signals are less than numerical noise.

Instead of modelling the propagation from every given point of the box towards the hydrophone, we are thus going to model the propagation *from* the hydrophone towards the possible position of the whale. This is incomparably more efficient for our problem, since we will only have to execute one simulation and just look at the simulated signal at a number of points (which is easily done by adding 'receiver' points in SPECFEM).

C. Laboratory tests

Before ground-truthing our method, we performed a series of 'laboratory tests'. These tests are done by simulating the position of several randomly placed whales in our model and correlating the output to find the best grid position for each simulated whale.

We thus constructed a three-dimensional grid of $4 \times 1040 = 4260$ points. This grid is used as the receiver positions in a SPECFEM simulation, and as possible emitter positions in our test.

Figure 1 shows the aspect of the grid in a horizontal plane. The step between two consecutive points is 200 meters. Thus, it won't be possible to retrieve the position of the whale at a precision higher than 100 meters, a very optimistic precision given our context. Our grid does not cover the entire domain of simulation: to prevent potential side effects at the frontier, we began our grid 1 km away from the borders of our simulation box. The grid has four layers in vertical position, with depths of 10, 25, 50 and 90 m. From the work of Oleson et al. 2007 [28], we expect our singing whales to be at a depth of 10 to 40 meters.

Added to these receivers, for our test we introduced 100 random points representing the 'whales'. Thus, the signal 'received' by each of these 'whales' is considered in our test as the original measured signal, and will be correlated to the signals obtained on each point of the grid. The 100 simulated whales' positions are random in longitude, latitude and depth, within our modelled box.

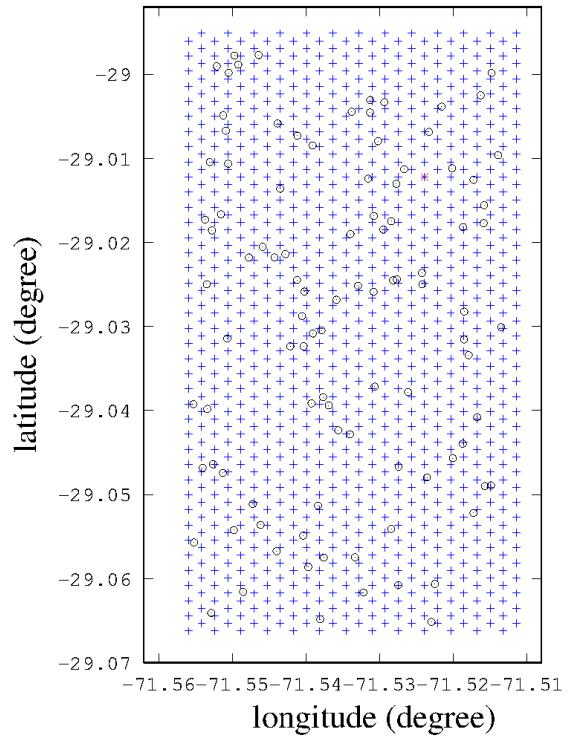


Fig. 1. 2D view of our simulation grid. Circles represent one hundred randomly placed 'whales', i.e. positions from which a signal is emitted. Star is the hydrophone position.

The simulation was performed on the OCCIGEN supercomputer of CINES (Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur), on 600 cores during 21 hours. We obtained 4260 files of propagated sound, on our grid of 1040 points and 4 horizontal layers (10m, 25m, 50 m and 90m), plus 100 randomly chosen 'whale' positions for the theoretical tests.

Each file is a waveform of 19.5 seconds total duration, with 650 000 steps of 0.00003 seconds. The simulation box has a size of 5.2 km by 8.7 km, for a total depth of 500 meters. The minimum length of a meshed element is 0.57 m, the maximum length is 17.3 m. With these parameters, the predicted maximum frequency admitted by the simulation is 69 Hz, which is remarkably high for a finite element modelling of this size.

We used an impulsion ('Dirac peak' truncated to the maximum frequency) as the entrance signal in the time domain. Thus, we can convolve later on by an appropriate source function. This allows more freedom in the choice of a source, and we can apply the same simulation to different tests.

If this method is to be made available for biologists studying whale populations, it is important to notice that only one large simulation will be necessary for one location. After the simulation is completed, the inversion is done by correlating every resulting signal with the original one (in the case of

our test, with one of the ‘whales’ signals). This correlation does not need special computer resources. We performed the correlation for fifty examples in about 6 hours on a small personal computer.

To find which position is closer to our ‘test’ signal, we have to compare two signals. However, the comparison must not take into account the intensity of the signal, because, though the emitted songs are very similar in shape, they can differ a lot in intensity (see Stimpert et al. 2015 [17]). The comparison cannot be tuned on the time of arrival, because of course this data is not known in real conditions.

The correlation is computed through a little Octave [29] routine with two complementary methods:

- First, we compute the normalized correlation function between our ‘whale’ signal (S_w) and each of the signals corresponding to a point in the grid S_i . Then, we find the maximum of each of these correlation functions (MaxCor_i). MaxCor_i is a value affected to each point of the grid, giving the information of how close the ‘whale’ signal is to the signal ‘emitted’ on this point. We can then transform this variable into a map which will be called the Maxima of Correlation functions map (MaxCor map). The maximum of this map gives the point where the whale is supposed to be (MaxCor best position).
- As a second method, we compute a correlation coefficient FFTCor_i between the modulus of the Fourier transform of the ‘whale’ signal and the modulus of the Fourier transform of each of our signals on the grid’s points. This variable is transformed into a map (FFTCor map). The maximum of this map gives the point where the whale is according to this method (FFTCor best position).

III. FIELD EXPERIMENT

In order to ground-truth our method, we set up a field experiment close to Chañaral Island Natural Reserve, 600 km North of Santiago de Chile. This field experiment comprises:

- the mooring of a fixed hydrophone for one and a half months during the summer of 2017,
- a visual follow-up of the zone between the island and the shore,
- measures of physical and biological properties to run an adapted simulation.

A. Acoustic device

The hydrophone and recording package ’BOMBYX II’ was deployed at 15/20 meters below the surface on a mooring where water column depth was 70 meters-depth. It was set in the northern coast of Chile, $29^{\circ}00'44''$ south and $71^{\circ}31'26''$ west, during the austral summer of 2016/2017, between the 16th of January 2017 and the 27th of February 2017. Data were collected during three periods of two weeks in January and February [30]. The hydrophone package ’BOMBYX II’ was mounted by the University of Toulon and comprises a Cetacean Research C57 hydrophone (very high sensibility, flat response down to 20 Hz, omnidirectional at low frequencies

and listening in a plane orthogonal to its axis in high frequencies), alimented by 9 V through a high-pass filter ($C=47\text{F}$, frequency cut 0.15 Hz) and a commercial SONY PCM-M10 recording device (gain 6, $R_{in} = 22 \text{ k}\Omega$) equipped with a 256 GB memory card, set up in a specialized tube made by Osean able to resist high pressure. Recording was done at a sample rate of 48 kHz and a dynamical range of 16 bits.

B. Visual follow-up

The visual observations were carried out by a team of experts that were posted for two 12-day long missions on the island of Chañaral, by special permit of the CONAF since the whole island is a protected area (Maritza Sepulveda and Macarena Santos were in charge of this part of the project, see Sepulveda et al. 2017 [31]). The team was equipped with two theodolites. From 9 am to 6 pm, when the wind was lower than 4 Beaufort, they looked for cetaceans in the channel between the island and the coast. During this period of time, and every hour, they scanned the whole area for animals and noted their positions and species.

The data collected in two rounds of 12 days of observation in 2017 is shown on figure 2. Observations are from the 17/01/2017 to the 28/01/2017 and from the 15/02/2017 to the 26/02/2017. Three species of large baleen whales are commonly found around the Isla de Chañaral reserve: fin whales (*Balaenoptera physalus*), the most frequent, blue whales (*Balaenoptera musculus*) and humpback whales (*Megaptera novaeangliae*). This figure however does not reflect the number of animals in the zone, since the same animal can be marked several times.

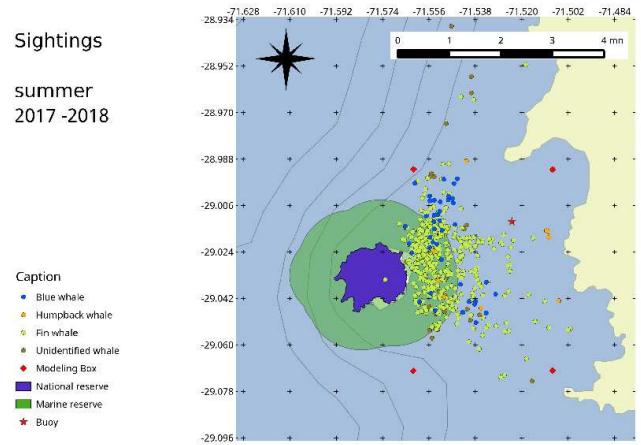


Fig. 2. Large whales sighting from the island of Chañaral by the team of Sepulveda and Santos (see [31]). Star is the recording hydrophone, and squares mark the limit of the modelled box.

The area covered by visual scanning is more or less the same as the box used for modelling.

We are specifically interested in blue whales since their song is our chosen signal. However, the blue whales are not the most frequent marine mammals here. Approximately 40 out of 500 sightings concern blue whales, spotted on 9 different days.

Some animals have been spotted during the whole day (for instance, the first detection of a blue whale on the 18/01/2017 was annotated 17 times during the whole day), others have been seen only once.

What's more, all blue whales do not produce songs: according to Oleson et al. 2007 [28] only males emit this type of vocalization. These vocalizations are thus supposed to be linked to sexual display and play a role in reproduction. The Humboldt archipelago zone, to which the channel belongs, is confirmed as a feeding zone for the large rorquals (see for instance Toro et al. 2016 [21]). However, the continuous recording of blue whale songs in our experiment (see Buchan et al. 2019, in prep. [32]) as in other feeding zones seem to show that blue whales emit songs even in feeding grounds, though maybe not as frequently as in other types of habitats.

C. Physical and biological parameters of the model

a) *Bathymetry*: Official maps proving to be highly imprecise for our zone of interest, we measured a few hundred depths with a simple echo sounder during several campaigns in 2016, 2017 and 2018. We joined our measures to those of the technical base-line report of Gayer 2008 [33] and interpolated a bathymetry surface of a zone including our modelled box.

b) *Sound profile*: For the variation of the velocity of sound in water, we used both base-line information on temperature and salinity from Gayer 2008 [33] and our own opportunistic measurements of temperature, performed each time the recording device was changed for maintenance and during diving campaigns in the same geographical zone. The summary of this data leads to two averaged curves, one for winter and one for summer. Only the summer profile, show in figure 3 was used in our simulation since recording was done in summer.

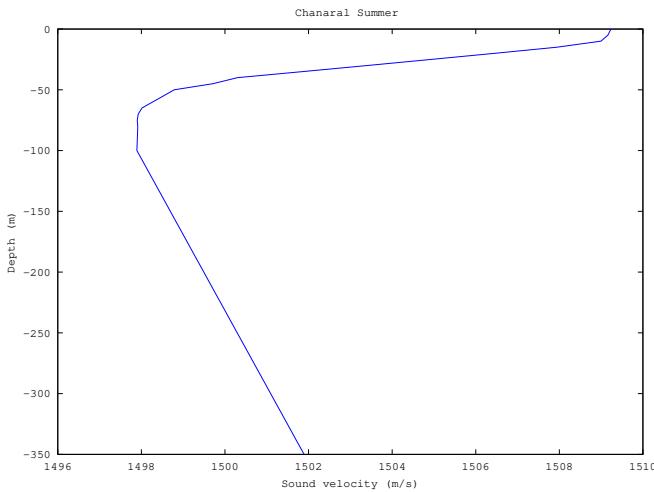


Fig. 3. Sound profile in Chanaral (data computed from Gayer's report, 2008 [33] and our own measurements).

c) *Ground properties*: The ground properties were set consulting Gayer's report, 2008 [33] and information from local fishermen, showing that most of the canal between the

island and the shore is covered with sand and sediments. Of course, this is a rather crude estimation since the uneven bathymetry is probably due to some rocky surfaces and asperities. However, we could not measure details of the ground properties, so we checked that our simulations were relatively robust to a change in the value of the ground sound velocity and density. It is worth noting, however, that the simulation leads to very different results if we imagine a purely rocky ground (hard surface), inducing strong echos (probably Scholte waves due to shear waves velocity in a solid) that are not seen in our data. Thus we chose to characterize our ground layer as a fluid sediment with a sound velocity of 1650 m/s and a density of 1800 kg/m³.

d) *Source signal*: The source signal issue was addressed in detail after the simulation was done. The blue whale song is a very stable signal. However, the source signal serving as an input to our simulation has to be an 'emitted' signal, whereas we of course only have 'received' signals (signals received after an unknown process of propagation). Three methods of constructing a source signal were explored, they are described in our research report 'Reflexions sur le signal source' (LIS, Santiago, April 2018 [34]). Basically, one is obtained through a mathematical model (hereafter called `mod`), another through a time reversal inversion method (hereafter called `inv`) and the last one performing an average over several recorded signals (`moy`). For each of these three methods, we convolved the input signal with the impulse response of the propagation model on the 4160 points of the grid.

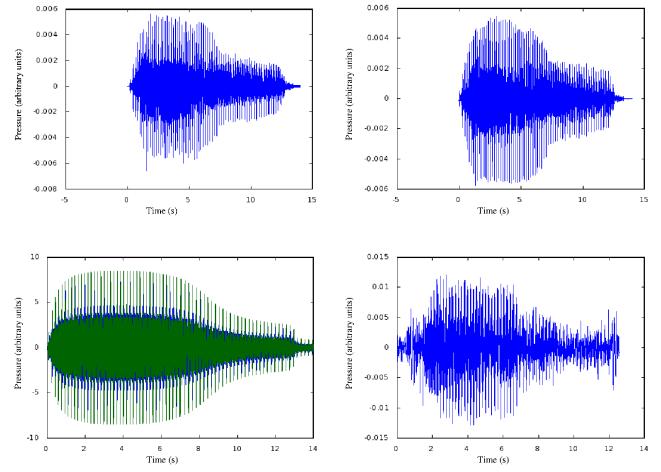


Fig. 4. Input signal for the simulation in time domain. Upper left: example of received signal. Upper right: signal reconstructed from a time reversal method (`inv`). Lower left: signal modelled with a mathematical function (`mod`). Lower right: signal averaged over five examples of received signals (`moy`).

D. Choice of the set of data

The blue whale recordings found in the first year of recording are described in Buchan et al. 2019 ([32], in prep.). More than 2000 song units have been detected by a visual inspection,

meaning song detections almost every day for this period of time.

However, the signal to noise ratio of these detections is highly variable. Blue whales are known to be among the strongest sources of biological sound: a song intensity can be measured up to 180 dB ref 1 μ Pa at 1 m (Samaran et al. 2010 [35]). They are also very low frequency sounds (usually between 15 Hz and 100 Hz, McDonald et al. 2006 [18]), propagating in a very efficient manner in the ocean. It is probable that we can perceive sounds emitted by a very far away animal, the detection range reaching 100 km in known experiments (Dreo et al. 2018 [36]).

The detections we obtain in our data, range from a very high signal-to-noise ratio to very faint signals. Figure 5 shows the difference of time/frequency representation of two detections.

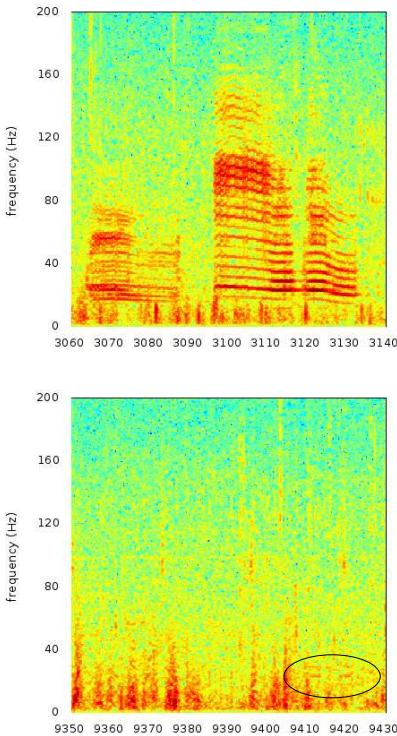


Fig. 5. Time-frequency representation of two blue whale's song detections. Top: extract from a recording on February, 2nd 2017 with high signal to noise ratio, every detail of the song appears. Bottom: extract from a recording on February, the 11th 2017, low signal to noise ratio, only the louder part of the song, two 23-Hz tonal sounds, around 5 s long are visible in the representation. Both images are 80 s-long extracts, and FFT was computed on Hanning windows of 2^{12} points.

As shown in section , our method is sensitive to the richness of the input signal. Thus, a very faint signal such as the one represented in the right part of the figure 5 is not a good candidate for our method. What's more, it is probable that such a faint signal comes from a distant animal. Indeed, though signal intensity is not a good indicator of source distance, in this case, where these songs are remarkable for their stability, we can infer that such a drastic change in signal to noise ratio

(around 30 dB of difference in SNR) is at least partly an effect of distance or masking. Thus, there is very little probability that the whale was present in our modelled box when emitting this signal.

We cannot expect a matching ratio better than 50% of the signals, as this is what we have with a 'perfect' modelling, that is the theoretical tests explained in the previous section. Thus, we need a redundancy of data to ascertain the position of the whale. Since Isla de Chañaral reserve is a feeding ground, the whales usually do not move much, doing slow loops around the food source. Fortunately, the song of a blue whale is usually the repetition (for hours) of the same unit, repeated every 2 minutes. We thus have long series of signals in our data, probably emitted by the same individual.

To test our method of localizing animals in a 10 km wide box, we will thus need to select series of high signal-to-noise ratio songs. These are not so frequent in our recording, matching the rather scarce visual detection from the island.

Selecting detections with a series of at least 10 song's units with signal-to-noise ratio better than 25 dB, we found the following useful data:

- recording of the 19/01/2017: 16 units, spanning 1 hour, in the night, rather low signal to noise ratio (set 1);
- recording of the 24/01/2017: 21 units, spanning 1 hour in the morning (set 2);
- recording of the 24/01/2017: 20 units, spanning 2 hours in the afternoon, rather low signal to noise ratios (set 3);
- recording of the 02/02/2017: 52 units with very high signal-to-noise ratio, spanning 3 hours during the night (set 4);
- recording of the 22/02/2017: 16 units with loud signal but also a lot of noise, spanning 1 hour during the night (set 5);

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Results of the laboratory tests

As described in section II, a first way of testing our method is through 100 simulated whales. These are randomly chosen positions, that we try to recover by correlating the received signal with all received signals in the grid. This test does not allow a check of the consistency between the model's physical and biological parameters and the ground reality. However, it shows the possibilities of the inversion method for the specific bathymetry and source signal. In each test, we tried two different correlation methods: one correlates the waveforms (MaxCor), the other the spectra (FFTCor); and three methods for constructing the source signal described in section II: modelled source (mod), signal from an inversion process (inv) and source averaged over several received signals (moy).

Some correlation maps in 2D, showing only the chosen depth layer, are shown in figure 6. In this example we see a good match for 4 maps out of 6: the two upper maps are from a wrong layer, which coincides with a bad guess in horizontal position.

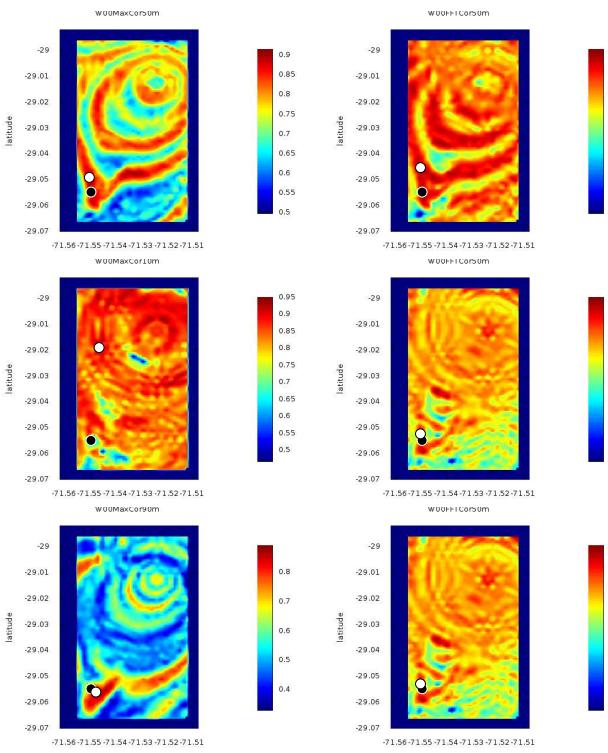


Fig. 6. Correlation maps from Chaifaral simulation: example of the 100th simulated whale, situated at 64 m depth. On each map, the real position is marked with a black dot and the one recovered by the method is marked by a white dot. From top to bottom: mod, inv and moy methods for the sources. Left column: method of temporal correlation (MaxCor), right column: method of frequency-domain correlation (FFTCor). All maps are on the 50 m layer, except the MaxCor methods with sources inv (first column, second row) which is 10 m layer and moy (first column, third row) which is 90 m layer.

General results are presented in table I.

TABLE I

RESULTS FOR LABORATORY TESTS. EACH TEST WAS PERFORMED OVER 100 ‘SIMULATED’ WHALES PLACED RANDOMLY. TWO CORRELATION METHODS AND THREE TYPES OF SOURCE SIGNAL ARE COMPARED. .

Simulation results	Method for the source		
	mod	inv	moy
found at less than 200m	MaxCor	34	36
	FFTCor	19	24
found at less than 500m	MaxCor	50	60
	FFTCor	32	45
range at less than 500m	MaxCor	78	87
	FFTCor	57	68
depth	MaxCor	79	68
	FFTCor	70	66

On average over all methods, the whale’s position is recovered in 50% of the cases and the range in 75%, with a precision of 500 meters. These are not very high numbers, especially considering this is a test with simulated whales, so that the quality of our physical and biological model is not tested. Thus, a redundancy of data will be necessary: one cannot expect to find the position of a whale without several signals being used. Another remark is that range is

easier to recover than position (which is range plus azimuth). This is to be expected since the main symmetry of shallow water is cylindrical around the vertical line passing through the sensor. It is interesting to note, however, because range is often sufficient for statistical purposes (density estimation).

Overall, for all tests, the correlation in waveform gives better results, probably because it includes more information (the phase information is preserved, whereas in the FFTCor method we use only the modulus of the FFT).

There are significant differences between the three methods for the source that we tested, which is surprising if we consider that for this simulated test, strictly the same source is used for the pseudo-received and the simulated signals. The first of the three methods, the one using a mathematical source, is clearly less efficient than the other two, directly derived from observed signals. The probable cause is the richness of a real signal as compared with a mathematical one. Thus, it is important to have a lot of information in the input signal, so as to see the effect of propagation better.

B. Field experiment results

When we cross the visual observation results with the high signal to noise selected acoustic songs, we find only one intersection. This is the only one of our 5 testing sets of data that was recorded in day time, on January 24th, 2017. Thus, this is the only example where we have a very strong acoustic recording and a visual detection at the same moment.

For this set of data, we then correlated the received signal with the 4160 points of our grid, for each of the 3 methods. We also did the same for the other sets of data, even though we do not have a visual match for them.

For each unit, a ‘best’ position is computed. Then, we cut our horizontal box in 78 rectangles of approximately 0.5 by 0.4 nautical miles. We then counted the number of positions found in each of these rectangles. Thus, we constructed a coarse ‘probability of presence’, or density map.

Both the mathematical modelling method (mod) and the average method (moy) lead to incoherent results: either the density is uniformly distributed, or the results point to an impossible place (below the ground). The correlation in the time domain does not give results either.

In the case of the source obtained by the inversion method (inv), however, and for the frequency domain correlation, we find that in 3 out of the 5 sets, the density map shows a plausible maximum. The two sets that do not present a plausible result are the sets with the lowest signal-to-noise ratio.

We show in figure 7 the three maps corresponding to plausible results. These are the set 2 (January, the 24th), 4 (February, the 2nd) and 5 (February, the 22nd). For the set 2, we have a visual confirmation of the position, and this corresponds to the position found. For the two other sets, we find the animal close to a rocky peninsula. Interestingly, a citizen science project led by the national park service CONAF found two blue whales in this zone on the morning of Feb, 2nd, so just after our recording and localizing it in the same

zone (Susannah Buchan and Marinella Maldonado, private communication).

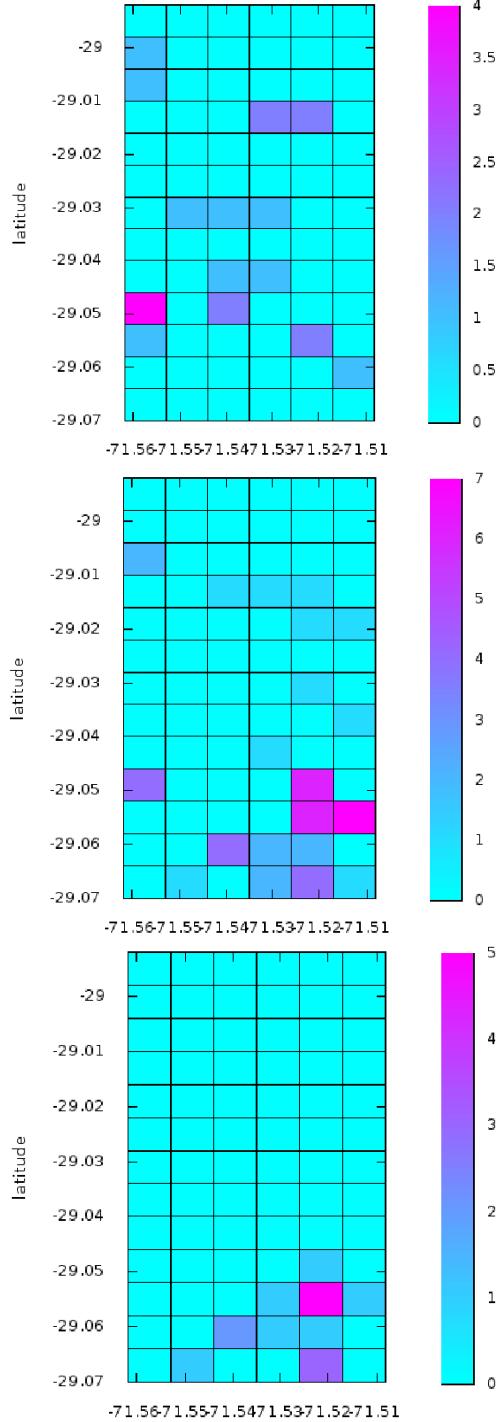


Fig. 7. Density maps for three of our data sets. Left: set 2,(January, the 24th), middle: set 4 (February, the 2nd) right: set 5 (February, the 22nd).

C. Discussion

In this section we comment on the possible interpretation of these results and on future works.

Let's consider first the reason why only one source gave plausible results. The mathematical model (`mod`) did show a poor efficiency in the theoretical tests. It seems probable that this model is not rich enough in harmonics, basically, that it is not similar enough to a biological signal. The averaged source did not work either: when we examine this source, we see that though the first part of the unit is well reproduced, thanks to the very high stability in frequency of the songs, the second part is not well reproduced. This is due to the fact that the phase difference between the first tonal sound and the second one (slightly lower in frequency) is not randomly distributed in different songs. Thus, the averaging reduces the second part (see figure 4). The poor efficiency of the time domain correlation method (`MaxCor`) compared to the frequency domain (`FFTCor`) can be explained by the same phenomenon: the correlation in time domain is efficient for the first part, but the slight shift between the first and second part of the song blurs the correlation in this second part. For the theoretical test, this was not a problem since the signal was correlated with a source that has the same phase difference, thus explaining the good results in theoretical tests of the time domain correlation.

The last method, with the source obtained by inversion (`inv`), gives interesting results. The only case were we have a visual identification is recovered correctly. Two other cases show animals close to a zone where a lot of animals have been seen in the morning, before the tourists boats are out (personal observation, communication from residents). The two cases without plausible results can be interpreted as concerning animals that were out of the model box, since the signal-to-noise ratios were low in both cases.

The most obvious conclusion of this study is that one encouraging result has been found, but a lot more has to be done before validating the method. More data is needed, but this is a very long and difficult prospect, since coupled visual and acoustic data are not very frequent. However, this method could be adapted with comparatively little effort to another coastal place and other types of signals, opening various possibilities.

ACKNOWLEDGMENT

This work was written in memory of Dimitri, who left us just before the end of our common study. We stay with his wonderful tool SPECFEM and the memory of his energy, eternal goodwill and deep competence that helped us to go on. Thanks to Paul Cristini for discussions on acoustics, to Vadim Monteiller for technical support and especially to Alexis Bottero for hours of working on SPECFEM together... Many thanks to all the friends in 'la caleta', and especially Cesar Villaroel and everyone at the ExploraSub diving center, and Marinella Maldonado and her colleagues from the CONAF. We acknowledge the help of STIC-Am Sud funding via the project BRILAM 17-STIC-01. Partly funded by FUI 22 Abyssound, ANR-18-CE40-0014 SMILES, and ANR-17-MRS5-0023 NanoSpike. We thank SABIOD.org, and EADM MADICS CNRS scaled bioacoustic groups for their support.

REFERENCES

- [1] D. Wilson and R. Mittermeier, Eds., *Handbook of the mammals of the world*. Lynx Edicions, 2014, vol. 4.
- [2] I. L. Boyd, G. Frisk, E. Urban, P. Tyack, J. Ausubel, S. Seeyave, D. Cato, B. Southall, M. Weise, R. Andrew, T. Akamatsu, R. Dekeling, C. Erbe, D. Farmer, R. Gentry, T. Gross, A. Hawkins, F. Li, K. Metcalf, J. Miller, D. Moretti, C. Rodrigo, and T. Shinke, “An international quiet ocean experiment,” *Oceanography*, vol. 24, no. 2, p. 174181, 2011.
- [3] T. A. Branch, K. Matsuoka, and T. Miyashita, “Evidence for increases in antarctic blue whales based on bayesian modelling,” *Marine Mammal Science*, vol. 20, no. 4, pp. 726–754, 2004.
- [4] M. McDonald and C. Fox, “Passive acoustic methods applied to fin whale population density estimation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 105, no. 5, pp. 2643–2651, May 1999.
- [5] T. A. Marques, L. Thomas, S. W. Martin, D. K. Mellinger, J. A. Ward, D. J. Moretti, D. Harris, and P. L. Tyack, “Estimating animal population density using passive acoustics,” *Biol. Rev.*, vol. 88, pp. 287–309, 2013.
- [6] P. Giraudet and H. Glotin, “Real-time 3d tracking of whales by echo-robust precise tdoa estimates with a widely-spaced hydrophone array,” *Applied Acoustics*, vol. 67, no. 11, pp. 1106–1117, 2008.
- [7] W. A. Kuperman and J. F. Lynch, “Shallow-water acoustics,” *Physics Today*, pp. 55–61, october 2004.
- [8] A. Andriolo, F. R. de Castro, T. Amorim, G. Miranda, J. D. Tullio, J. Moron, B. Ribeiro, G. Ramos, and R. R. Mendes, *Advances in Marine Vertebrate Research in Latin America*. Springer International Publishing AG 2018, 2018, ch. Marine Mammal Bioacoustics Using Towed Array Systems in the Western South Atlantic Ocean, pp. 113–147.
- [9] S. Li and C. Clay, “Optimum time domain signal transmission and source location in a waveguide: Experiments in an ideal wedge waveguide,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 82, no. 4, pp. 1409–1417, 1987.
- [10] Y. P. Lee, “Time-domain single hydrophone localization in a real shallow water environment,” *IEEE*, pp. 1074–1077, 1998.
- [11] W. A. Kuperman, G. L. DSpain, and K. D. Heaney, “Long range source localization from single hydrophone spectrograms,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, no. 5, pp. 1935–1943, 2001.
- [12] G. L. Touzé, J. Torras, B. Nicolas, and J. Mars, “Source localization on a single hydrophone,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 337–343, 2000.
- [13] C. O. Tiemann, A. M. Thode, J. Straley, V. OConnell, and K. Folkert, “Three-dimensional localization of sperm whales using a single hydrophone,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 120, no. 4, pp. 2355–2365, 2006.
- [14] J. Bonnel, A. M. Thode, S. B. Blackwell, K. Kim, and A. M. Macrander, “Range estimation of bowhead whale (*balaena mysticetus*) calls in the arctic using a single hydrophone,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 136, no. 1, pp. 145–155, 2014.
- [15] D. Harris, L. Matias, L. Thomas, J. Harwood, and W. H. Geisser, “Applying distance sampling to fin whale calls recorded by single seismic instruments in the northeast atlantic,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 134, no. 5, pp. 3522 – 3535, 2013.
- [16] L. Matias and D. Harris, “A single-station method for the detection, classification and location of fin whale calls using ocean-bottom seismic stations,” *J. Acoust. Soc. Am. 138 (1)*, vol. 138, pp. 504–520, 2015.
- [17] A. K. Stimpert, S. L. DeRuiter, E. A. Falcone, J. Joseph, A. B. Douglas, and D. J. More, “Sound production and associated behavior of tagged fin whales (*balaenoptera physalus*) in the southern california bight,” *Anim Biotelemetry (2015) 3:23*, vol. 3, no. 23, 2015.
- [18] M. McDonald, S. L. Mesnik, and J. A. Hildebrand, “Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: using song to identify populations,” *J. Cetacean Res. Manage.*, 2006.
- [19] F. Malige, J. Patris, S. J. Buchan, K. M. Stafford, L. E. Rendell, F. W. Shabangu, K. P. Findlay, R. Hucke-Gaete, S. Neira, C. W. Clark, , and H. Glotin, “Joint analysis of year decline in pulsation and peak frequency of the sep2 blue whale song type with the help of a new mathematical model of pulsed sound,” *unpublished submitted to J. Acoust. Soc. Am.*, 2019.
- [20] S. Buchan, R. Hucke-Gaete, L. Rendell, and K. Stafford, “A new song recorded from blue whales in the corcovado gulf, southern chile, and an acoustic link to the eastern tropical pacific,” *Endang Species Res*, vol. 23, pp. 241–252, 2014.
- [21] F. Toro, Y. A. Vilina, J. J. Capella, and J. Gibbons, “Novel coastal feeding area for eastern south pacific fin whales (*balaenoptera physalus*) in mid-latitude humboldt current waters off chile,” *Aquatic Mammals*, vol. 42, no. 1, pp. 47–55, 2016.
- [22] A. Martinelli, M. Nery, and J. Torres-Florez, “Forty four years of using bioacoustics to study aquatic mammals in latin america : state of the art of a growing research area,” in *2nd Listening for Aquatic Mammals in Latin America Workshop (LAMLA 2)*, Valparaso, Chile, 2016.
- [23] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmid, *Computational Ocean Acoustics*, 2nd ed., W. W.Hartmann, Ed. Springer, 2011.
- [24] P. C. Etter, “Advanced applications for underwater acoustic modeling,” *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012.
- [25] J. Tromp, D. Komatitsch, and Q. Liu, “Spectral-element and adjoint methods in seismology,” *Communication in Computational Physics*, vol. 3, no. 1, pp. 1–32, 2008.
- [26] D. Komatitsch, S. Tsuboi, and J. Tromp, “The spectral-element method in seismology,” in *Seismic Earth: Array Analysis of Broadband Seismograms*, ser. Geophysical Monograph, A. Levander and G. Nolet, Eds. American Geophysical Union, 2005, vol. 157, pp. 205–228.
- [27] R. Stacey, “Improved transparent boundary formulations for the elastic-wave equation,” *B.S.S.A*, vol. 78, pp. 2089–2097, 1988.
- [28] E. M. Oleson, J. Calambokidis, W. C. Burgess, M. A. McDonald, C. A. LeDuc, and J. A. Hildebrand, “Behavioral context of call production by eastern north pacific blue whales,” *Mar Ecol Prog Ser*, vol. 330, pp. 269–284, 2007.
- [29] J. W. Eaton, D. Bateman, and S. Hauberg, *GNU Octave version 3.0.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2009, ISBN 1441413006. [Online]. Available: <http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter>
- [30] J. Patris, F. Malige, and H. Glotin, “Construction et mise en place d’un système fixe d’enregistrement large bande pour les cétacés “bombyx 2” îsla de chaaral, été austral 2017,” LSIS CNRS, Tech. Rep. 2017-03, march 2017.
- [31] M. Sepúlveda, M. Santos, and G. Pavez, *Whale-watching en la reserva marina Isla Chañaral : manejo y planificación para una actividad sustentable*. Universidad de Valparaíso, 2017.
- [32] S. Buchan, J. Patris, F. Malige, N. Balcazar-Cabrera, G. Alosilla, and H. Glotin, “Southeast pacific blue whale song recorded off isla chaaral, northern chile,” *unpublished*, 2019.
- [33] C. Gayer, “Evaluación de la base de las reservas marinas “isla chaaral” e “isla choros-damas”,” Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Tech. Rep., 2008.
- [34] J. Patris, F. Malige, and H. Glotin, “Reflexions sur le signal source,” LSIS CNRS, Tech. Rep. 2018-04, april 2018.
- [35] F. Samaran, C. Guinet, O. Adam, J.-F. Motsch, and Y. Cansi, “Source level estimation of two blue whale subspecies in southwestern indian ocean,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127, no. 6, pp. 3800–3808, 2010.
- [36] R. Dreø, L. Bouffaut, E. Leroy, G. Barruel, and F. Samaran, “Baleen whale distribution and seasonal occurrence revealed by an ocean bottom seismometer network in the western indian ocean,” *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 04 2018.

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

Le travail réalisé lors de cette thèse s'est centré sur des aspects complémentaires. A une partie assez technique concernant l'obtention d'un nouveau corpus nécessaire pour l'étude, ont succédé plusieurs modélisations et analyses relativement théoriques, notamment validées sur une partie des données de ce corpus.

Une méthode physique de localisation de source a ensuite été proposée, modélisée et testée sur ce même corpus. L'ensemble nécessitant la convergence de compétences multidisciplinaires ainsi que de nombreuses collaborations internationales dans ou en dehors du domaine académique.

Sur chacun de ces thèmes, ce chapitre se propose de conclure sur les points apportés dans cette thèse, et d'en souligner les aspects qui mériteraient d'être perfectionnés ou développés.

7.1 Un corpus fondamental

Nous avons produit durant ces trois années de recherches un nouveau corpus de données bioacoustiques sur les baleines bleues. Il nous semble important ici de rappeler l'importance des observatoires pionniers dans des zones peu étudiées et mal connues. Nous avons montré qu'un dispositif expérimental simple mais robuste et de bonne qualité, élaboré par notre équipe, construit et mis en place avec un budget réduit, permet d'obtenir un corpus de référence fondamental. En effet, cette côte chilienne, pour être immense et très riche en cétacés, n'avait jamais été étudiée en cette zone sur le volet bioacoustique marine. Nous avons recueilli des données nouvelles, de bonne qualité, ouvrant la porte à de nombreuses études.

Notre thèse a incité nos collègues chiliens à poursuivre ce genre d'étude : le CEAZA (Institut des Sciences de l'Environnement basé à La Serena, la ville la plus proche de notre lieu d'étude) a ainsi posé un nouvel hydrophone fixe dans la zone de l'archipel de Humboldt, dont les travaux de cette thèse a révélé la grande importance au point de vue bioacoustique. Ces données à long terme doivent permettre le suivi des chants de la baleine bleue chilienne et d'établir des schémas d'activité acoustique pour cette espèce encore méconnue (Carlos Olavarria, communication privée).

Par ailleurs, l'exploration de notre corpus de données ne fait que commencer. L'apprentissage par réseau profond et apprentissage de forme d'onde, d'un détecteur automatique de "downsweep" (ou signal modulé descendant) de grands rorquals est en cours d'élaboration en collaboration avec Franck Malige, Hervé Glotin et Randall Balestrieri [51]. Ce détecteur devrait permettre de mieux comprendre ces unités vocales. Il s'agira aussi d'en saisir les similarités et dissemblances entre différentes espèces de rorquals (voir chapitre 3).

Pour aider à l'identification de certains signaux remarquables de notre corpus, nous avons mené quelques campagnes d'écoute opportunistes sur la zone, consistant à aller enregistrer *in situ*

plusieurs espèces emblématiques avec un hydrophone mobile. Ces études complètent le corpus et l'enrichissent, permettant plusieurs autres travaux. Nous avons ainsi commencé des études sur les vocalisations d'autres espèces, telle que le grand dauphin (*Tursiops truncatus*) pour lequel on trouve une richesse d'expressions impressionnante, ou l'otarie à fourrure australe (*Arctocephalus australis*) dont nous trouvons des manifestations sonores sous-marines qui n'ont à notre connaissance pas encore été décrites.

7.2 L'analyse et la compréhension des chants

La question de l'analyse des chants du sud-est Pacifique s'est posée par le constat que ces chants avaient été peu étudiés, leur structure était peu connue. La classification des chants pulsés, en fonction de leur caractéristique spectrale, en "chants harmoniques" ou non permet de les appréhender de façon plus simple, puisqu'elle remet au centre du signal la fréquence fondamentale, que nous considérons comme le meilleur outil pour caractériser le chant. D'ailleurs, nous avons montré que notre méthode permet de caractériser de façon précise la baisse en fréquence de ce chant du sud est Pacifique, mais aussi de comparer cette baisse avec les études menées internationalement sur les différents "dialectes" de baleines bleues.

Au-delà de notre étude, il serait intéressant d'appliquer notre méthode à d'autres types de chants de baleines bleues. En particulier, quelques signaux apparus dans différents océans sont difficiles à identifier : s'agit-il d'un nouveau chant de baleine ? Ou bien d'un chant déjà répertorié, déformé par la distance et enregistré loin de sa zone de préférence (voir à ce sujet le rapport de Širović et al. 2017 [158]) ? Les deux sous-espèces de baleines bleues présentent-elles des différences systématiques dans leurs manifestations vocales ? Nous pensons que les méthodes d'analyse et de classification des sons pulsés peuvent aider à répondre à ces questions, à condition bien-sûr de les systématiser sur les différents chants mondiaux. Des discussions ont commencé avec des spécialistes des baleines bleues de l'océan indien (notamment Emmanuelle Leroy, voir par exemple Leroy et al. 2018 [72]) dans le but de réfléchir à la structure pulsée d'autres types de chants.

La question de l'évolution de ces chants (et notamment leur baisse en fréquence) est d'une difficulté frustrante pour toute la communauté. Notre étude, si elle a pu montrer que cette baisse en fréquence concerne également la baleine bleue 'chilienne', n'avait pas pour but d'apporter d'élément d'explication de ce phénomène. Un travail en cours en collaboration avec Constanza Rojas Cerdá et Susannah Buchan ouvre une perspective intéressante grâce à l'étude des chants d'un individu errant, une baleine 'chilienne' entendue près des îles de Géorgie du Sud. Se pose aussi la question des deux chants 'chiliens' (le SEP1 et le SEP2, voir chapitre 4). Pourquoi cette population est-elle caractérisée par deux types de chants, contrairement aux autres ? Pourquoi le chant historiquement enregistré (par Cummings, 1971 [32]) n'est-il pratiquement plus entendu dans les données récentes ? Peut-on quantifier la proximité entre ces deux chants ? Nous travaillons actuellement sur la mesure de distance entre chants de baleine à bosse par matrices de distance de Levenshtein (Patris et al. 2018 [107]). Nous pourrons en tester l'intérêt sur les chants de baleine bleue.

7.3 Faisabilité de la localisation monohydrophone en zone complexe

Des différents aspects abordés par cette thèse en bioacoustique, la localisation monohydrophone est sans doute celui qui présente le plus de difficultés et nécessitera le plus de travail pour le compléter et le consolider.

Notre travail représente la première tentative de dérivation de méthodes d'éléments spectraux pour l'analyse de signaux bioacoustiques. Ces méthodes qui jusqu'à récemment n'étaient pas en-

visageables pour les échelles de bioacoustique océanique (ici, une cinquantaine de Hertz pour une zone de quelques kilomètres de côté et quelques centaines de mètres de profondeur), sont rendues utilisables par la performance des grands centres de calcul parallèle. La finesse de ces méthodes est importante pour modéliser des signaux dans des zones complexes, proches des sources, c'est-à-dire la configuration typique des zones côtières ou des archipels. Ainsi, nous avançons vers la localisation d'animaux chanteurs grâce à un seul récepteur dans des zones qui sont aussi celles où il est relativement facile d'installer un hydrophone.

Les tests théoriques ont certes montré certaines limites de la méthode. Tout d'abord, elle nécessite des données de bonne qualité avec un certain degré de redondance. En effet nous avons montré par les tests effectués, que l'information provenant de l'environnement, même en connaissant parfaitement bien les paramètres physiques qui le caractérisent, n'est pas suffisamment discriminante dans de nombreux cas. D'autre part, étant données nos possibilités de calculs, nous avons pu pousser les calculs que jusqu'à la fréquence maximale de 70 Hertz, ce qui nous limite à des chants de grands mysticètes. De même nous nous sommes limités à une zone d'une dizaine de km de côté, ce qui est un peu faible étant donné la puissance des sources émises, qui permet de percevoir les signaux à plusieurs dizaines de kilomètres. Cette limite cependant peut sans doute être nettement améliorée par l'utilisation d'un meilleur plus perfectionné que celui que nous avons utilisé. Nous estimons qu'en gardant le même ordre de grandeur sur la profondeur, la taille de la boîte de simulation pourrait sans grande difficulté être doublée avec quelques efforts supplémentaires sur son maillage.

Par ailleurs, bien que nos premiers résultats soient encourageants, la validation de notre méthode nécessite de nouveaux tests, comme nous le mentionnons à la fin du chapitre 6.3. Cet aspect est actuellement à l'étude, notamment pour tester, sur des émissions simulées, la robustesse de la méthode vis-à-vis d'imprécisions sur la source (bruits, déformations) ainsi que vis-à-vis des paramètres physiques du modèles. Les paramètres physiques (ou environnementaux), notamment les caractéristiques du fond, ne sont jamais connus très précisément et on sait qu'ils peuvent influer de façon importante sur la propagation. Nous avons effectué des tests pour justifier le choix de nos paramètres, mais uniquement à basse fréquence, pour des raisons de temps de calcul. A posteriori, étant donné que nous disposons de peu de résultats terrain pour valider la méthode, il nous semble nécessaire de mener ces vérifications aux fréquences que nous utilisons. Néanmoins, ces tests nécessitent de lancer de nouvelles simulations et ne peuvent être faits que dans une deuxième phase, hors de notre travail pionnier que rapporte ce manuscrit.

Enfin, il serait naturellement très positif de faire de nouveaux tests de terrain. Nous avons montré qu'il est très compliqué d'avoir en même temps des données acoustiques et des détections visuelles. La mise en place de ce protocole a nécessité la collaboration avec une équipe de biologistes spécialistes des mammifères marins qui ont donc passé plusieurs semaines en autonomie totale confinée sur une île vierge interdite à toute circulation, sans eau ni électricité. Ce n'est pas un contexte très facilement reproductible.

Comme solution alternative, nous envisageons la mise en place d'un système multicapteurs qui pourrait fournir une vérité terrain, la localisation à l'aide de plusieurs hydrophones étant mathématiquement plus simple que la localisation mono-hydrophone. Notre équipe DYNI est experte en localisation par petite base d'hydrophones pour des fréquences au delà de la centaine de Hertz. Hervé Glotin a conçu avec la plateforme technologique SMIoT de l'université de Toulon, une solution techniquement simple (voir figure 7.1). Dans le cas de la baleine bleue, il est possible que cette approche se heurte aux difficultés liées aux basses fréquences. En effet, cette zone du spectre est très affectée par les bruits de mer et il serait donc délicat de poser une antenne de ce type proche de la côte (solution adoptée lors de la mission à Orcalab en 2019, voir Poupart et al. 2019 [114]). Or ce matériel doit être placé directement sur le sol pour une orientation contrôlée de façon à pouvoir correctement localiser la source. Une mise en eau au milieu de la baie serait possible en utilisant des mesures d'accéléromètre, gyroscope et compas 3D (MPU) qui équipe la carte son JASON

(carte développée par la plateforme SMiot et l'équipe DYNI, décrite notamment dans Fourniol et al. 2018 [43]). Cela reste relativement complexe. En revanche, les travaux actuels de SMIoT pour synchroniser par satellite deux cartes JASON posées à quelques kilomètres de distance l'une de l'autre (ou sur des drones, voir projet Sphyrna, Poupard et al 2019b [113]), fournit des pistes intéressantes pour la mise en place de grandes bases d'hydrophones. Nous pourrions envisager plusieurs récepteurs comparables à celui que nous avons déjà utilisé, placés à quelques kilomètres les uns des autres mais très précisément synchronisés entre eux par une petite antenne GPS étanche en surface. Cela offrirait un cadre pour une étude de type champ adapté (MFP) classique.

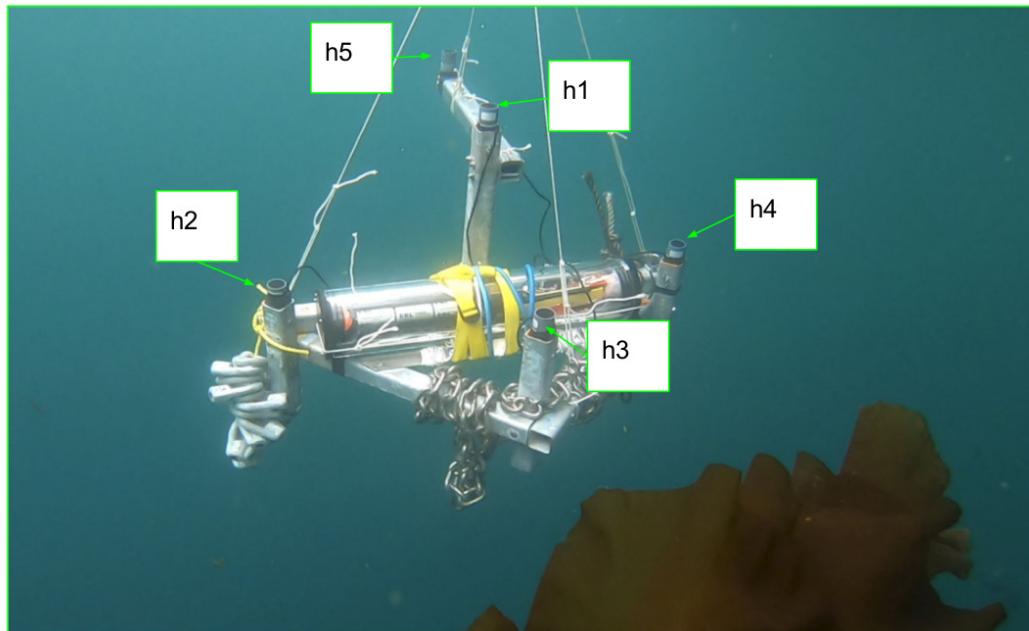


FIGURE 7.1 – L'antenne déposée dans les canaux de l'île Vancouver, au Canada, dans le cadre de la collaboration entre DYNI et OrcaLab établie depuis 6 ans. L'antenne est déposée par 20 mètres de fond par des plongeurs, et permet une séparation des vocalises des groupes d'orques pour le projet DYNI en identification vocale.

En plus des projets pour affiner et consolider notre méthode monohydrophone, une des pistes ouvertes par notre travail est l'utilisation des simulations par éléments spectraux à d'autres échelles, notamment pour étudier la production du son. En effet, il est possible de modéliser finement les tissus et les os de certains cétacés et, l'échelle spatiale étant réduite, nous pourrons monter beaucoup plus haut en fréquence. Maxence Ferrari, en thèse à DYNI, a déjà mis en place une simulation simple, ainsi que des méthodes de traitement du signal lui permettant d'obtenir un corpus de données concernant des cachalot *Physeter macrocephalus* (voir Ferrari et al. 2019, [41]) et se propose de tester l'application des méthodes de résolution par éléments spectraux à ce problème.

7.4 Collaborations transdisciplinaires et internationales

En conclusion, il nous paraît important de souligner un aspect fondamental de la bioacoustique sous-marine : le fait que c'est un domaine transdisciplinaire, qui nécessite la collaboration de

chercheurs d'horizons différents. D'autant plus, lorsqu'on travaille sur la baleine bleue, une espèce répartie dans tous les océans du monde, il est inévitable de chercher la collaboration de collègues de tous les continents.

Notre participation au projet BRILAAM¹ (Bioacoustical Research In LAtin AMerica), co-financé par le STIC AmSud CNRS et les centres nationaux de recherche du Pérou et du Chili, projet coordonné par H. Glotin, a renforcé depuis trois ans ce cadre unificateur. Ceci a concerné autant des observatoires acoustiques marins et fluviaux, la pose de Bombyx II à Chañaral de Aceituno au Chili ainsi que les travaux effectués à Iquitos dans l'Amazonie péruvienne. Ce projet d'une durée de deux ans, mais qui reste fédérateur, a déjà permis de rapprocher des partenaires amazoniens, chiliens et français.

De plus le groupe de recherche LAMLA [69] que nous avons contribué à monter et qui a aujourd'hui toute sa place dans la communauté bioacoustique marine, fait partie de ces structures nécessaires à l'obtention de nouvelles connaissances, en unifiant les partenaires d'un continent qui présente d'incroyables atouts (unité relative de langue, grande complicité entre les acteurs, zone marine immense et pour l'instant très peu explorée).

A côté des ces collaborations entre acteurs académiques, d'autres interactions sont à nos yeux fondamentales. Il s'agit des échanges avec les institutions nationales ou internationales d'une part, et avec le monde dit de la société civile d'autre part.

En ce qui concerne les relations avec nos partenaires institutionnels, nous continuons nos collaborations avec l'IFOP (institut chargé du suivi de la pêche) et la SERNAPESCA (organisme de gestion des zones marines protégées), commencées à l'occasion de la détection des explosions proches de la réserve de Chañaral (voir chapitre 3).

Suite à nos recherches, nous avons en effet été contactés par différents acteurs locaux de la gestion de zones protégées. La Sernapesca, organisme gestionnaire de la réserve marine de l'île Chañaral et de l'archipel de Humbolt, nous a proposé la rédaction d'un projet pour lequel une demande de financement a été lancée. En effet, suite à notre alerte concernant les explosions détectées aux environs de la réserve, nous avons été sollicités pour concevoir un système qui permettrait la localisation de ce type de signaux (projet déposé auprès de la Sernapesca en janvier 2019). Il s'agit de signaux à des fréquences plus élevées que les chants de baleines, et les conditions de simulation de la propagation sont différentes et justifient l'utilisation d'autres outils de simulations (simulation par rayons par exemple). Puisque le but spécifique est la localisation du bateau à l'origine des explosions, une antenne avec plusieurs hydrophones est envisagée. Etant donnée la nature complexe de la bathymétrie que nous avons constatée, une simulation en trois dimensions sera néanmoins nécessaire et un modèle en deux dimensions n'est pas envisageable. Dans cette ligne, nous avons également été sollicités par le ministère de l'environnement chilien pour participer à la rédaction un guide scientifique de référence sur le bruit dans l'océan, et sur les recommandations à suivre pour réduire ses effets [17].

Des développements de SPECFEM sur le milieu marin ont récemment été lancés, notamment au sein du projet FUI ABYSOUND [1] (NavalGroup, LIS DYNI, OSEAN, LMA, SemanticTS, CREATIS, MicrodB, GIPSALAB). De plus une étude d'impact des effets d'explosions contrôlées d'origine militaire (destruction de mines) est en cours dans la zone de Toulon, usant notamment via des signaux enregistrés par la bouée acoustique BOMBYX I de DYNI posée entre Porquerolles et Port-Cros, équipée de l'enregistreur d'OSEAN. La propagation de l'onde est étudiée et comparée à des mesures faites sur terre (voir Wang et al. 2019 [150]) via SPECFEM. La modélisation du champ acoustique produit par l'explosion pourra ainsi être couplée à l'activité acoustique biologique pour travailler sur l'impact des explosions sur la macrofaune locale (cachalots, rorqual commun) et la microfaune (via le paysage acoustique global). D'autres modèles plus stochastiques, ou en traitement neuronaux profonds pourraient aboutir à des traitements joints de reconnaissance et

1. <http://sabiod.org/brilaam>

localisation bioacoustique monohydrophone notamment sur les pistes de Niu et al., 2019 [94].

Comme nous le mentionnons en introduction, le but de ces recherches, outre la production de connaissances, est aussi de participer à la préservation de la biodiversité et à une meilleure protection des systèmes océaniques. Dans cette démarche, la diffusion scientifique est un aspect indissociable de la production scientifique. Ainsi, nous avons participé à la diffusion de nos données aussi bien de façon locale (dans la “caleta”, à Santiago ou d’autres villes chiliennes) que de façon plus générale (publications vidéo et audio sur la toile).

J’espère que mes recherches renforceront l’intérêt scientifique du sujet d’étude (la baleine bleue), et que ce rapport transcrit mon enthousiasme vis à vis des méthodes pour les étudier. La physique, le traitement du signal, l’informatique sont des sciences fascinantes. Espérons que des travaux tels que cette thèse pourront aider à les populariser auprès de nos jeunes scientifiques.

Appendices

Annexe A

Rapport sur des explosions détectées près de la “reserva marina Isla Chañaral” à destination des organismes de gestion du site (Sernapesca, CONAF)

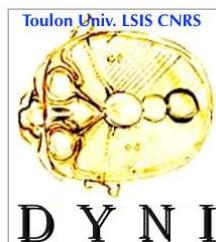
Research report

Franck MALIGE, Université d'Aix Marseille

Julie PATRIS, Université d'Aix Marseille, Université de Toulon, LSIS équipe DYNI

December 2017

Report on the submarine explosions in the Chañaral de aceituno zone last austral summer



We thank Universities of Toulon, Valparaiso and Concepción, COPAS SUR Austral, BQR UMR LSIS, Ceaza and STICAM Sud BRILAAM project for their support to this research.

Report on the submarine explosions in the Chañaral de aceituno zone last austral summer

1 Problem

In the recordings done by the device called Bombyx II in january february 2017 in the Chañaral de Aceituno zone (Chile, Atacama region), we can hear strong explosions.



Figure 1: Example of explosion in wave form (17th of january)

We wonder if we can know what kind of explosions it is (ground or submarine explosions), what is the power of such explosions (the charge of the explosion), where are they situated and who made them. In this report, we try to answer these questions.

2 Analysis

2.1 Number of explosions

We did a visual inspection of waveforms of many of the recordings of january and february 2017 in the morning, using audacity. We counted the explosions with their date and hour.

Day	Hour	Saturated (yes / no)	Day	Hour	Saturated (yes / no)
17/01/2017	6:08	no	26/01/2017	7:56	yes
	6:13	no		7:57	yes
	6:14	no		7:09	yes
	6:18	no		7:10	no
	6:41	no		7:11	yes
	6:43	no		8:22	yes
	7:47	yes		8:23	no
18/01/2017	8:42	yes	28/01/2017	7:39	yes
	9:21	yes		8:11	yes
	8:23	yes		7:45	yes
20/01/2017	7:08	yes	05/02/2017	8:08	yes
	7:54	yes		8:06	no
25/01/2017	8:55	no	13/02/2017	7:21	yes
	7:21	yes		7:37	yes
	7:46	yes		8:27	yes
	8:53	yes		8:53	yes

We can make several remarks :

* There are many explosions from mid january to mid february (30 in total), rather regularly spaced in time. They seem to stop after the 13th of february.

* Day of the explosions : there are days without explosions and days with many of them (until 7 explosions on tuesday 17th of january). There are no special days for explosion during the week. Every day of the week explosions happened.

* Hours of the explosions : all the explosions happened by day, in the early morning, between 6:08 and 9:21 am. It's worth noting that it is a period of the day in which, generally, we have many SEP2 blue whale songs and that the frequencies containing most energy are of the same order for the SEP2 and the explosions.

The majority of the explosions (19 on 30) are saturated when recorded which tend to prove that the explosions are strong ones or that they were situated not very far from our device.

2.2 Type of explosions

We can see in the figure 2 that there are replicas of the first strong signal. These are of different types :

* there are replicas happening just after the first signal (about 0.1 s after), called "first replicas". In a good part of the recordings we can see at least two of them.

* there are replicas happening some seconds after the explosion, called "second replicas". Usually there are several of them, with much less energy than the first ones.

The figure 2 presents these replicas in one of the explosions we recorded and another one from Mitchell et al. 1976 [10].

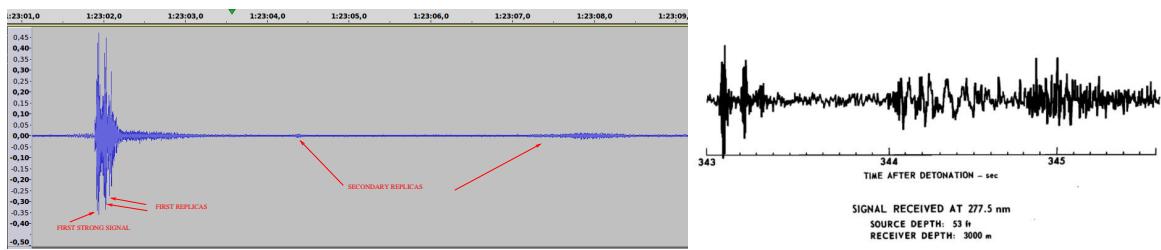


Figure 2: Explosion in wave form and its replicas (left) and a recording from [10] (right)

We noted that the first replicas are very consistent with the typical waveform of a submarine explosion and in particular with the formation of an oscillating "bubble of gas". See for example the comparison between our waveform and the model presented in Hanna et al. 1974 [4] in the figure 3. Other information can be found in Cole 1948 [2] and Mitchell et al. 1976 [10]. Another presentation of a explosion sound, very similar to ours, is available at <http://dosits.org/galleries/audio-gallery/anthropogenic-sounds/explosive-sound-sources/>.

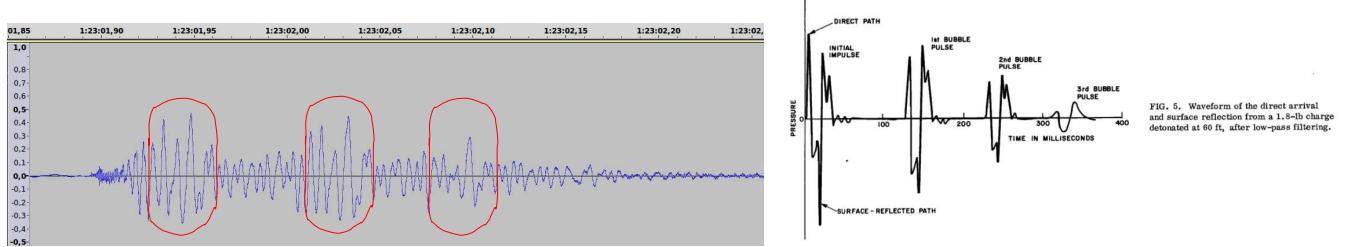


Figure 3: Explosions recorded in Chañaral in wave form (left) and a model of submarine explosion presented in [4] (right)

If we look the explosion by means of a time-frequency diagram, we can also see the different similar signals corresponding to the bubble pulse. It seems that these signals are mostly the same (with decreasing energy) and that they passed by a similar process of propagation. It can be noted that the bubble pulse period of our signals decrease with time as predicted in theory.

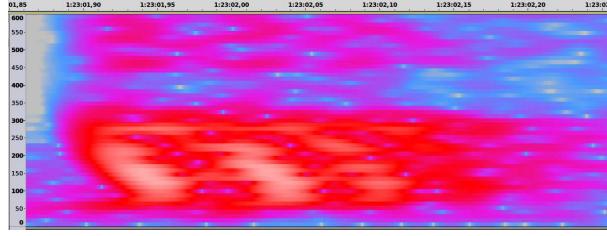


Figure 4: Signal of an explosion in time-frequency diagram

After analysis, we think that the duration between the signal and the following replicas does not correspond neither to time delays of arrival that can come from bounces in the bottom or the surface of the ocean. We made this analysis considering the depth of the sea in the location of the hydrophone (around 70m at most) that would give TDOA much smaller.

The second replicas are much more extended in time than the first ones and are weaker in intensity. They may correspond to bounces of the signal on the coasts during the propagation.

For all these reasons, we assume that the explosion didn't happen in the ground : **the explosions are submarine explosions.**

2.3 Analysis of the charge and position of the explosions

2.3.1 The bubble pulse periods

As already said, in the waveform of the explosions (figure 3 and 4), we can spot replicas of the signal. We will call (following the literature on the subject) the time between the signal and its first replica as T_1 and the second replica and the third as T_2 , and so on. These times are called “bubble pulse period” because they correspond to the time elapsed between two contractions of the gas bubble engendered by the explosion (see Cole 1948 [2] for details).

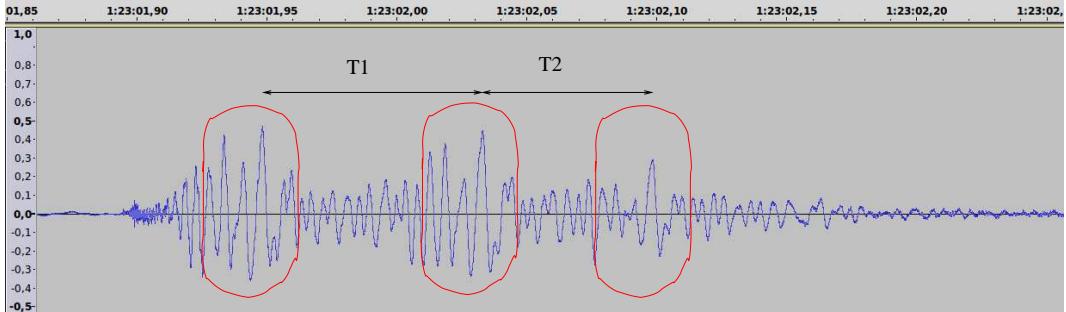


Figure 5: Explosions recorded in Chañaral in wave form and bubble pulse period T_i

The values of the bubble pulse periods T_i are strongly linked to the depth and charge of the explosion. For our data, the measure of T_1 and T_2 was done by cross-correlation of the signal, using OCTAVE. It was possible for all but one explosions to measure T_1 but we could measure T_2 for only 12 explosions. When we cannot measure T_2 , the explosion could happen to be too close to the surface so that the bubble doesn't remain spherical after the first pulse (see end of the appendix for more explanations). We could not calculate the bubble pulse periods T_3, T_4 , etc in our signal due to the mixing of the signal due to each replica. The results are presented in the figure 6.

In Hecht 1978 [5], they made statistics of the bubble pulse period for standard charges of 0.8 kg, programmed to explode at depths of 18m and 90m. There is a variation that can be until 10% between two values of T_1 . So for our explosions and considering that the depth can vary also it's normal to have the values presented in the histogram of figure 6.

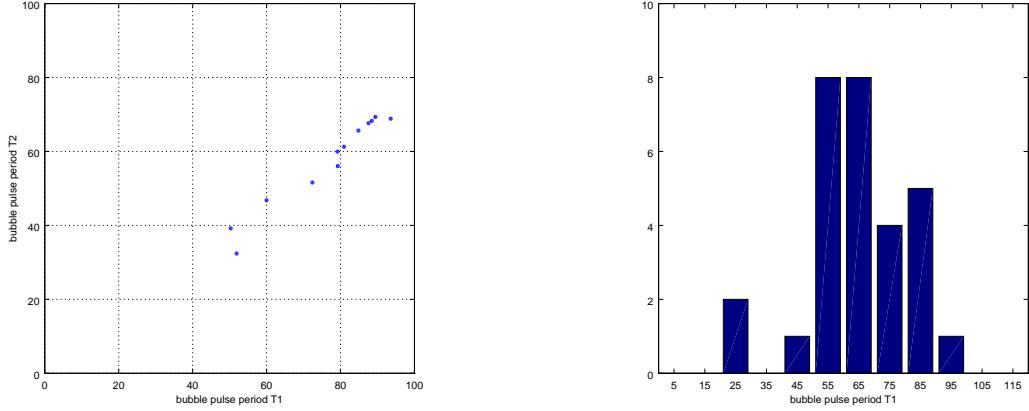


Figure 6: Representation of T_2 versus T_1 (left) and histogram of measures of T_1 (right)

2.3.2 Estimation of depth and charge by means of the bubble pulse periods

The bubble pulse periods T_i depend strongly on the charge and the depth of the explosion. The empiric law for T_1 is given in Prior 2010 [11] : $T_1 = K \times \frac{w^{1/3}}{(10,1+z_1)^{5/6}} \times (1 - \frac{R_1}{5z_1})$ where T_1 is in seconds, $K = 2.11$, R_1 is the maximum radius of the bubble in the first pulse, z_1 is the depth in meters of and w is the charge of the explosion, in kg of TNT. In the appendix, we recall the method given in Prior 2010 [11] to compute the values of w and z_1 using the values of T_1 and T_2 . As an example, we give the results of this method for the explosions of january 17th :

Hour	T_1	T_2	T_2/T_1	z_1	w
1h17	87,58	67,64	0,772	19.2	0.39
1h22	79,19	59,96	0,757	23.4	0.35
1h23	84,85	65,65	0,774	17.8	0.27
1h27	88,45	68,27	0,772	19.6	0.36
1h50	80,98	61,27	0,757	24.6	0.41
1h52	89,46	69,35	0,775	18.7	0.35
2h56	79,27	56,04	0,707	1105.9	2211

TABLE I. Effect of migration on the bubble pulse periods. The ratios of bubble pulse periods are listed for all the charge depths. The values derived by Slifko⁷ using deep charges are given for comparison.

Depth (m)	T_2/T_1	T_3/T_1	T_3/T_2
23.5	0.76 ± 0.01	0.63 ± 0.01	0.83 ± 0.01
49.0	0.75 ± 0.01	0.62 ± 0.01	0.83 ± 0.01
99.6	0.72 ± 0.01	0.58 ± 0.01	0.81 ± 0.01
194.5	0.70 ± 0.01	0.56 ± 0.01	0.81 ± 0.01
Slifko	0.72	0.58	0.81

Figure 7: Measured values of T_1 and T_2 for the explosions of the 17th of january and estimated values of z_1 and w (left). Empiric values of T_i/T_j in Chapman 1985 [1] (right)

The values of the ratio given in Chapman 1985 [1] and our values are very consistant. This is another confirmation of the fact that explosions are submarine.

The six firsts explosions seem to happen at little depth (around 20 m) and with small charges (around 0.35 kg), which is very compatible with fish-bombing (see following section). We checked that the conditions of the method presented in the appendix apply : the radius of the first bubble is around 0.8m and the value of Z_L around 50m. But we have to be careful with these computations because of the uncertainty of the method see Prior 2010 [11].

The estimation of z_1 and w for the seventh measure is very different and the results are not in the range of application of our method (see appendix). In this case, the value of Z_L is 977m less than the value of z_1 computed (1105m). The recording of the seventh explosion is saturated and the estimation of T_1 and T_2 is surely not so precise as to apply the method presented in Prior 2010 [11].

The time frequency representation of these 7 explosions during 10 seconds show that the six firsts are very different from the seventh (for example if we compare the second replicas) :



Figure 8: Time frequency domains of the 7 explosions of the 17th of january

It seems that the boat used to carry the explosives moved between them (as seen in the figure 12). There was apparently no movements of the boat during the six first explosions.

In the following table we give the values of T_1 , T_2 (when available) and the computed values of z_1 and w :

Day	17/01	17/01	17/01	17/01	17/01	17/01	17/01	18/01	18/01	25/01	26/01	04/02
Number in the day	1	2	3	4	5	6	7	1	2	2	1	1
T_1 (ms)	87.58	79.19	84.85	88.45	80.98	89.46	79.27	93.58	72.4	50.3	60	51.9
T_2 (ms)	67.64	59.96	65.65	68.27	61.27	69.35	56.04	68.86	51.6	39.2	46.8	32.4
saturated	No	No	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
z_1 (m)	19.1	23.4	17.8	19.6	24.6	18.7	1105	66.6	283.6	7.9	9.8	8.5
w (kg of TNT)	0.34	0.35	0.27	0.36	0.41	0.35	2211	4.55	60.0	0.02	0.04	0.02

The results above indicate that when the signal is saturated, it is not very easy to compute the values of w and z_1 .

2.3.3 Analysis of the type of charge

In Woodman et al. 2003 [13], is made a study of the propagation of explosions from classical charge (0.5 kg of ammonium nitrate/fuel oil (ANFO) explosive) used in fish bombing. This chemical component has a RE of 0.74 (see https://en.wikipedia.org/wiki/TNT_equivalent) which means that it is equivalent to 0.37 kg of TNT. So we may assume that the classical charge in fish bombing is around this value. Its is very compatible with the values of the charges found in the precedent section for the six first explosions of january 17th. IFOP and SERNAPESCA confirmed us that fish bombing is used in Chile.

Conclusion : The charge and depth of the six first explosions of january 17th seem very compatible with **fish bombing**. The irregularity of the explosions days and the regularity of the hours of explosions reinforce the presumption than all the explosions of january and february are from fish bombing even when we couldn't measure the depth and charge because the signal was saturated.

2.4 Analysis of the distance between the hydrophone and the explosions

2.4.1 Waveform type

The theoretical waveform from an underwater explosion is displayed in the figure 9.

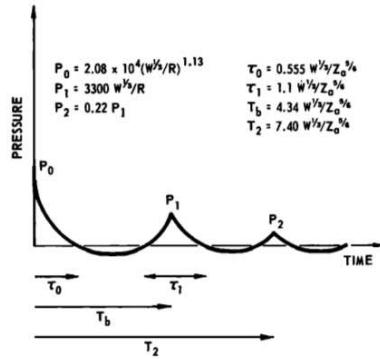


FIG. 1. Sketch of pressure versus time waveform of an explosive source at short ranges. Formulae are from Gaspin and Shuler.³ W is source weight in pounds of TNT; Z_0 is depth in feet, plus 33; pressures are in psi; times are in seconds.

Figure 9: Theoretical explosion's waveform (In Mitchell 1976 [10])

Nevertheless, the received waveform is generally more complex due to propagation. In this section, we quickly analyse the received waveform to precise the distance between the hydrophone and the explosions.

The waveform that we recorded is quite different from the theoretical one (see figure 10). So it had surely been modified during the propagation by several bounces on the surface and bottom of the ocean, on the coasts. The same process acts on each replica of the signal so we have similar waveform (although their amplitude decrease with time).

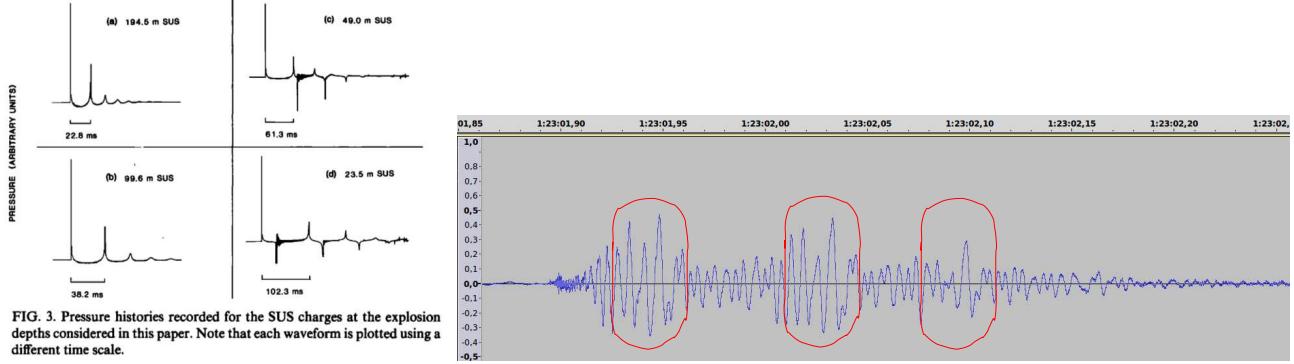


Figure 10: Theoretical waveform of an explosion (from Chapman 1985 [1] and the waveform of one of the recorded explosion in Chañaral (right)

In Woodman et al. 2013 [13], there is an analysis of the propagation of fish bombing charges in shallow waters (20-30m). Our waveform seems nearer to the waveform of “long range” type (compare the figures 10 and 11).

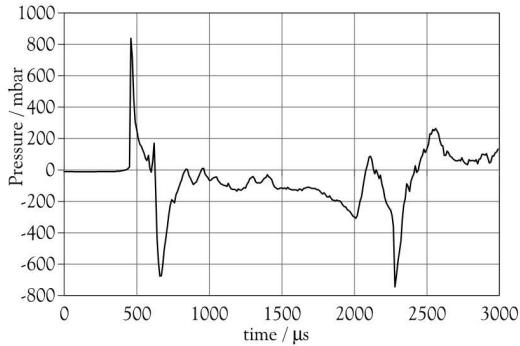


Fig. 2. Blast signal at 250 m.

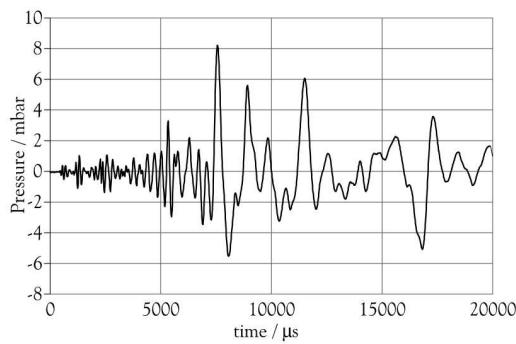


Fig. 6. Blast signal at 12,000 m.

Figure 11: Two waveform of fish bombing short range (left) and long range (right) in Woodman et Al. 2003 [13]

In this paper, for their sea-depth of 20-30m and an explosion between 7 and 12m, the transition between short and long range type of waveform is around 2-3km. In Chañaral, we have an ocean depth of 66m where the hydrophone is placed and explosions in a typical depth of 20m so we can expect to have a similar transition range of few kms between the short range waveform and long range waveform. So the explosions are probably situated at some kilometers of the hydrophone (compare figures 10 and 11).

2.4.2 Analysis of the energy received

To evaluate the range of the explosions, we evaluate roughly the received energy, assuming that we know the charge.

Our device is saturated for a 1V tension, which correspond to an acoustic pressure of 165 dB ref $1\mu Pa$. For a fish bombing charge (0.3 kg of TNT equivalent), it corresponds to a distance around 5 km (Woodman et Al. 2003, [13]).

This estimation is consistant with the estimation of the previous paragraph : we have a distance around few kilometers between the explosion and the hydrophone.

2.5 Boat sound

Assuming that the explosions are submarine explosions, we must have a boat that brings the explosive charge to the ocean.

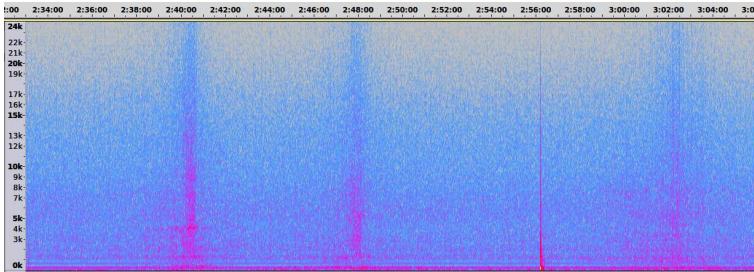


Figure 12: Sounds of the boat (at 2h40, 2h48 and 3h02) around an explosion (at 2h56)

In every of the recordings in which there is an explosion, we have recorded boat sound which have an energy in frequencies around 3-4 kHz. We analysed the sound of the fisher's or turistic boats of the Caleta. they have usually their energy in much lower frequencies (around 100 Hz). So the boat linked to the explosions seems not to be a boat from the Caleta.

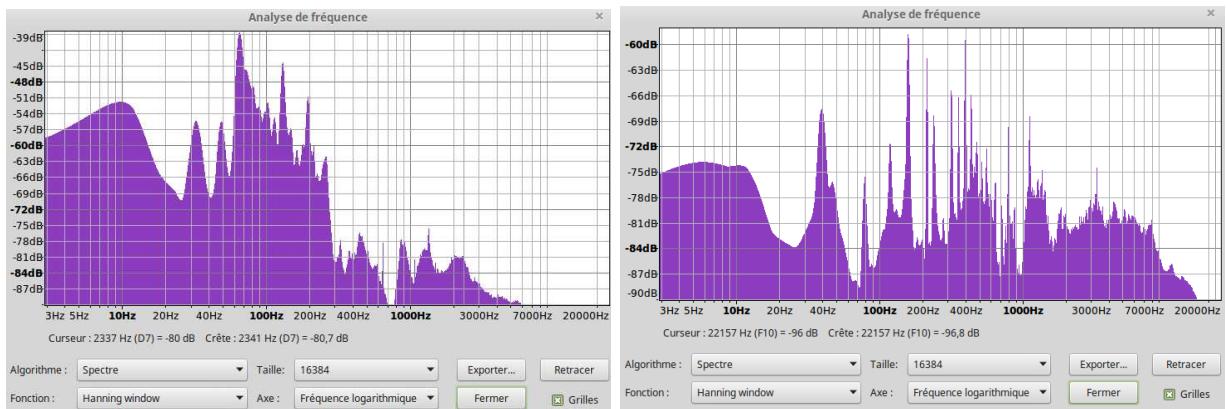


Figure 13: Frequency analysis (spectra) of two different boats : a boat from the caleta (left) and the boat linked to the explosions (right)

Nevertheless, little boats can produce energy in rather high frequencies. As high as 6kHz for a zodiac with an outboard engine due to the cavitation noise (see <http://dosits.org/galleries/audio-gallery/anthropogenic-sounds/outboard-motor/>). For these reason a more precise study of the boats' sound is needed.

3 Conclusions

With the analysis we made we are confident in saying that :

- Explosions were submarine.
- The depth and charge of the explosions are **compatible with fish bombing**.
- The distance between explosions and hydrophone are around **few kilometers**.
- There is a boat linked to them and it has a frequency signature different from boats from the caleta, with energy in higher frequencies.

We still are working on the subject and the next step could be to build a propagation model (a simple 2D ray model for example) to precise the place where explosions happened.

There is an evident risk of injury for the animals of the marine reserve. The effects of underwater explosions on life is described for example in Yelverton et Al. 1973 [7], Yelverton et Al. 1976 [8], Goertner 1982 [6] and Lewis 1996 [9]. Thus, it is very important to know as much as possible about these explosions to try to prevent new ones.

4 Appendix : Method of calculation of depth and charge using the two first bubble pulse period

Prior et al. 2010 [11] describes a method to estimate the charge w (in kg of TNT) and the depth z (in meters) of an explosion knowing the values of the two first bubble pulse period T_1 and T_2 (in seconds). This method is based on the following semi-empirical formulas ([11]) :

$$T_1 = K \frac{w^{1/3}}{(z_1 + 10.1)^{5/6}} \left(1 - \frac{R_1}{5z_1}\right) \quad (1) \quad \text{and} \quad R_1 = 3.4 \left(\frac{w}{z_1 + 10.1}\right)^{1/3} \quad (2)$$

where R_1 is the maximum radius of the first bubble (in meters) and the value of K is estimated empirically to be 2.11.

First step : by means of the empirical charts provided in Prior et al. 2010 [11] and Snay et al. 1963 [12], we estimate the value of $u = \frac{R_1}{z_1}$, knowing the value of the ratio $\frac{T_2}{T_1}$

Second step : We have $T_1 = K \frac{w^{1/3}}{(z_1 + 10.1)^{5/6}} \left(1 - \frac{u}{5}\right)$ by equation (1)

$$\text{Thus } \frac{T_1}{K(1-u/5)} = \frac{w^{1/3}}{(z_1 + 10.1)^{5/6}}$$

$$\text{By equation (2), we have } w^{1/3} = \frac{R_1}{3.4} (z_1 + 10.1)^{1/3} \quad \text{and thus} \quad w^{1/3} = \frac{uz_1}{3.4} (z_1 + 10.1)^{1/3}$$

$$\text{So inserting this expression of } w^{1/3} \text{ in } \frac{T_1}{K(1-u/5)} = \frac{w^{1/3}}{(z_1 + 10.1)^{5/6}}, \text{ we obtain :}$$

$$\frac{T_1}{K(1-u/5)} = \frac{uz_1}{3.4} \frac{(z_1 + 10.1)^{1/3}}{(z_1 + 10.1)^{5/6}} \quad \text{so} \quad \frac{3.4 T_1}{u K(1-u/5)} = \frac{z_1}{(z_1 + 10.1)^{1/2}}$$

$$\text{If we name } \lambda = \left(\frac{u K(1-u/5)}{3.4 T_1}\right)^2, \text{ thus } z_1 \text{ satisfy the following second degree equation : } \lambda z_1^2 - z_1 - 10.1 = 0$$

$$\text{The value of } \lambda \text{ is known and the solution of the second degree equation gives the value of } z_1 = \frac{1 + \sqrt{1 + 40.4\lambda}}{2\lambda}$$

Third step :

$$\text{As } \frac{T_1}{K(1-u/5)} = \frac{w^{1/3}}{(z_1 + 10.1)^{5/6}}, \text{ we can compute } w = \left(\frac{T_1}{K(1-u/5)}\right)^3 \times (z_1 + 10.1)^{5/2}$$

So this method enables us to give an estimation of the values of z_1 and w . These formulas are accurate only in the following limits (that has to be checked) : $2R_1 \leq z_1 \leq 75w^{1/3}$

The condition $2R_1 \leq z_1$ correspond to the fact that the explosion has to be sufficiently far from the ocean surface so that the bubble remains spherical during the pulsations phase (see for example [3]). Practically, this condition is not satisfied if the bubble doesn't remain spherical and, in this case, we cannot measure the second bubble pulse period T_2 .

The condition $z_1 \leq 75w^{1/3}$ correspond to the fact that if z_1 is too high (a deep explosion), the ratio T_2/T_1 is near the value 0.7, we have too much uncertainty on the estimation of w and z_1 by this method.

References

- [1] N.R. Chapman. Measurement of the waveform parameters of shallow explosive charge. *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(2), August 1985.
- [2] R.H. Cole. *Underwater explosions*. Princeton university press, 1948.
- [3] H. E. Edgerton. Underwater explosion phenomena video, 1943. Available: <http://techtv.mit.edu/tags/937-orb/videos/289-under-water-explosion-phenomena>.
- [4] J. S. Hanna and B. E. Parkins. Some considerations in choosing an explosive source and processing filter for the measurement of transmission loss. *J. Acoust. Soc. Am.*, 56(2), August 1974.
- [5] R.S. Hecht and L.A. Mole. An analysis of the distribution of measured bubble pulse periods of explosive sources. Technical report, Underwater Systems, Inc., 1978.
- [6] Goertner J.F. Prediction of underwater explosion safe ranges for sea mammals. Technical report, Research and technology department, Naval surface weapons center, august 1982.

- [7] Yelverton J.T. Safe distances from underwater explosions for mammals and birds. Technical report, Lovelace Foundation for Medical Education and Research, 1973.
- [8] Yelverton J.T., Richmond D.R., Jones R.K., and Fletcher E.R. A review of the treatment of underwater blast injuries. Technical report, Inhalation Toxicology Research Institute, Lovelace Foundation for Medical Education and Research, P. O. Box 5890, Albuquerque, New Mexico 87115, September 1976.
- [9] J.A. Lewis. Effect of underwater explosions on life in the sea. Technical report, Ship structures and materials division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Australia, 1996.
- [10] S.K. Mitchell, N.R. Bedford, and M.S. Weinstein. Determination of source depth from the spectra of small explosions observed at long ranges. *J. Acoust. Soc. Am.*, 60(4), October 1976.
- [11] M.K. Prior and D.J. Brown. Estimation of depth and yield of underwater explosions from first and second bubble-oscillation periods. *IEEE, journal of oceanic engineering*, 35(1), January 2010.
- [12] H.G. Snay and R.V. Tipcon. Charts for the parameters of migrating explosions bubbles. Technical report, Explosions research department U.S. naval ordnance laboratory, 1963.
- [13] G.H. Woodman, S.C. Wilson, V.Y.F Li, and R. Renneberg. Acoustic characteristics of fish bombing: potential to develop an automated blast detector. *Marine Pollution Bulletin*, 46:99–106, 2003.

Annexe B

Rapport sur la localisation monohydrophone d'un dauphin grâce aux sons brefs basse fréquence

Utilisation de sons brefs basse fréquence enregistrés dans la zone de l'île de Chañaral pour localiser un odontocète

Rapport de recherche, Juillet 2017
Franck Malige et Julie Patris
Pour l'équipe DYNI du LIS

Lors des études sur la localisation de baleines bleues grâce au sons qu'elles produisent, nous avons repéré des sons brefs émis régulièrement à basse-moyenne fréquence. Ces sons ont été enregistrés par l'appareil "bombyx II" installé en mer près de l'île Chañaral au nord du Chili (3ème région). Ils sont de courte durée (quelques millisecondes) et de fréquence relativement basse (entre 300 et 2000 Hz) comparée aux clics d'écholocalisation des dauphins.

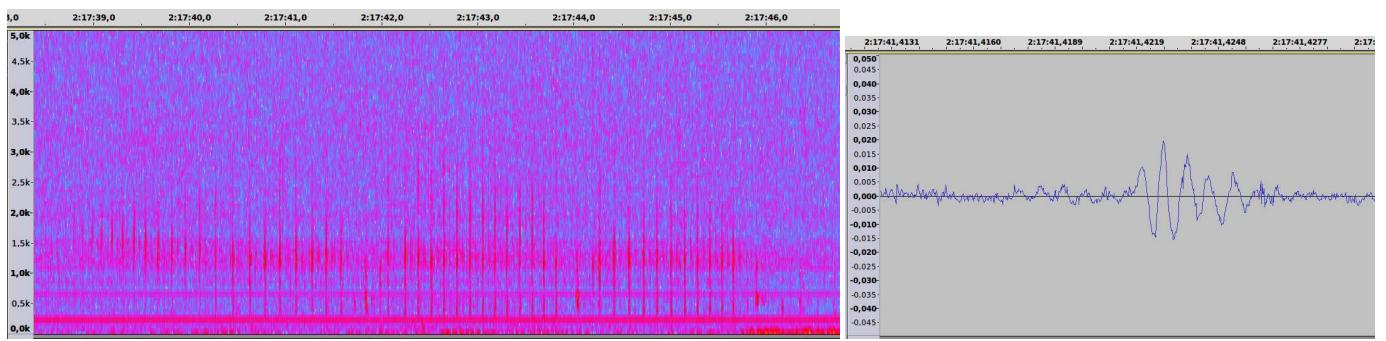


Figure 1: Sons brefs basse fréquence, fichier 170206_03 de 2h17min38 à 2h17min48, audacity, FFT de 1024 points, fenêtre Blackman (à gauche) Zoom, en forme d'onde, sur un son bref basse fréquence, fichier 170206_03 autour de 2h17min41.42s (à droite)

Si on fait un zoom sur un de ces "clics", en forme d'onde (figure 1, à droite), on voit que le signal émis a une longueur d'environ 5ms et, avec une FFT, que l'énergie maximale est autour de 1kHz.

1 Quels sont les animaux qui produisent ces sons?

Ces sons brefs à basse fréquence se trouvent à des moments pendant lesquels s'écoutent aussi de nombreux autres sons : des clics haute fréquence (au delà de 10 kHz), des sifflements (autour de 10kHz et d'une durée de l'ordre de la seconde) et des trains très rapides de clics. Ces sons ont été identifiés comme des vocalisations de grands dauphins (*Tursiops truncatus*) par des enregistrements similaires couplés à des observations visuelles dans la zone de l'île Chañaral. De plus, ils sont de même nature que les sons de cette espèce décrits dans la littérature ([12], [13], [11] et [5]). Dans l'annexe, on donne une représentation temps-fréquence de ces différents sons, similaires à ceux que l'on a dans le lien suivant : <http://cetus.ucsd.edu/voicesinthesea.org/species/dolphins/bottlenose.html>. Nous avons analysé 4 séquences de sons où se trouvent ces sons brefs à basse fréquence (fichiers 170126_01, 170202_05, 170203_06, 170206_03). Dans toutes ces séquences, on retrouve de façon concomitante les clicks de haute fréquence, les sifflements et les trains rapides de clics. Les grands dauphins sont par ailleurs l'espèce de dauphins la plus commune dans cette zone et une population résidente y est présente toute l'année [4]. Toutes ces remarques appuient fortement l'hypothèse que ces séries de clics basse fréquence sont produites par les grands dauphins (*Tursiops truncatus*).

Dans tous les fichiers son, les clics brefs à basse fréquence sont émis en même temps que les clics de haute fréquence. Par contre, ils sont peu émis en même temps que les sifflements. Cependant, dans le fichier "170206_03" (qui va servir de base à notre étude de localisation), on entend tous les sons mêlés dans une séquence d'un peu moins de 20s (de 2h18m13s à 2h18min30s) où vraisemblablement plusieurs dauphins émettent des sons ensemble.

Nous avons comparé les sons brefs à basse fréquence avec les sons de grands dauphins décrits dans la littérature. Il y a des sons émis par les grands dauphins appelés LFN pour "low frequency narrow band harmonic sounds" et qui ressemblent à ceux que nous avons enregistrés (voir surtout [14] mais aussi [9] et [8]) en particulier pour le nombre de clics répétés par seconde (de l'ordre de 5 à 10). Mais quand on compare ces deux sons, on voit des différences en

fréquence (figure 2) : Les sons enregistrés à Chañaral sont plus à large bande qu'harmoniques. Ainsi, dans le reste de notre étude, on appellera ces sons des "LFB" (pour "low frequency broadband sounds").

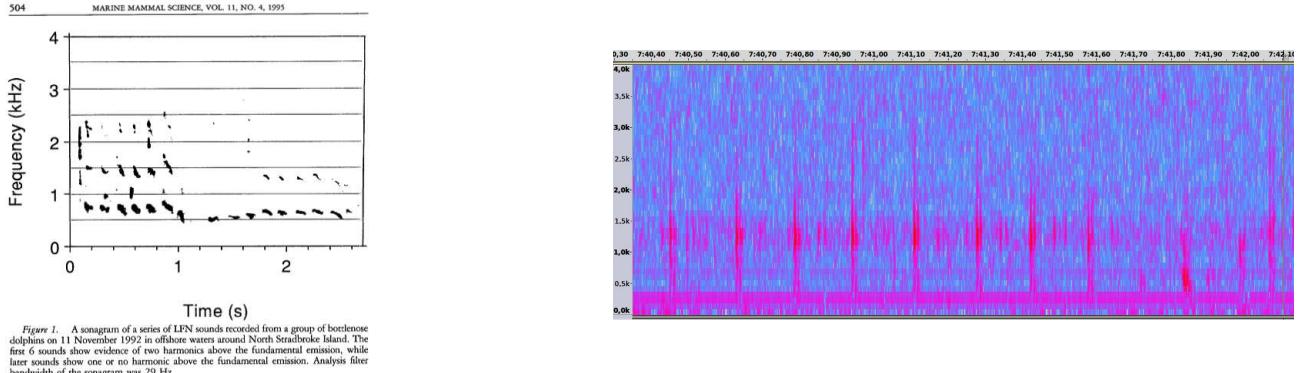


Figure 2: Figure de l'article de Schultz et Al. [14] où sont présentés les LFN (à gauche), série de LFB enregistrés à Chañaral (à droite). La plus grande différence est la durée d'émission de chaque son (plus grande pour les LFN) et le fait que les LFN ont des harmoniques alors que les LFB sont à bande de fréquence large.

Il y a beaucoup moins de références sur les LFN que sur les clics d'écholocation ou les sifflements. Le rôle de ces sons n'est pas clair mais pourrait être lié à une attitude agressive.

2 Comment localiser un animal grâce aux LFB?

2.1 Le principe des TDOA (time delay of arrival)

Quand on fait un zoom sur la figure 1, on voit que le premier son est suivi de quelques répliques (figure 3). En forme d'onde, c'est encore plus clair. Dans l'exemple du fichier 170206_03 ci-dessous, la première réplique arrive environ 9ms, la deuxième réplique environ 63ms et la troisième environ 78ms après le premier son. Ces intervalles varient peu durant toute la séquence d'émission mais dans d'autres moments de ce fichier ou dans d'autres fichiers ces intervalles sont distincts.

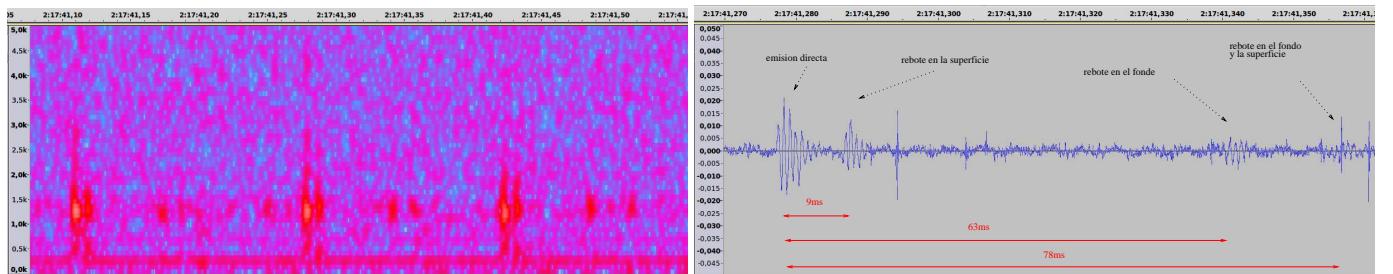


Figure 3: Clics bref à basse fréquence (LFB), fichier 170206_03 autour de 2h17min41s (à gauche, FFT 512 et fenêtre Blackman)

Deux explications sont possibles à la présence de ces répliques. La première c'est que l'odontocète émet à chaque fois 3 ou 4 sons courts, avec une structure égale d'un LFB au suivant. Le fait que les intervalles varient entre deux séries de LFB va contre cette hypothèse. La seconde hypothèse est que ces répliques viennent de réflexions du signal acoustique sur la surface de la mer, sur le fond de la mer ou sur une composition des deux (par exemple en premier sur le fond de la mer et ensuite sur la surface), comme dans le modèle présenté dans la figure 4. Dans ce cas, la position seule de l'émetteur peut expliquer les intervalles cohérents lors d'une série de LFB et différents lors d'une autre série. Les fréquences des LFB sont assez hautes et on peut faire une approximation par rayon (voir [10]). Nous sommes dans le cas où la longueur d'onde ($\lambda = c/f \simeq 1,5m$ est petite comparée à la taille des surfaces où l'onde rebondit (voir [6] page 77).

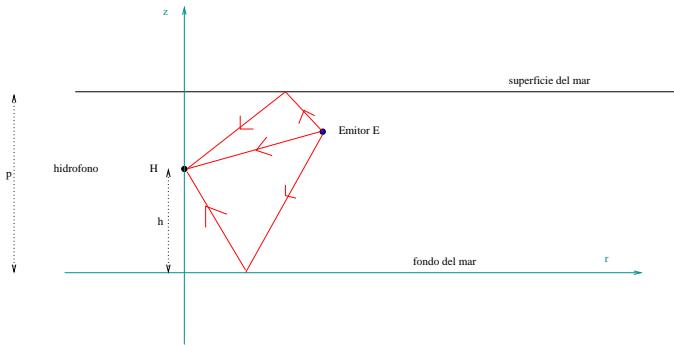


Figure 4: Schéma de propagation d'un signal direct et deux rebonds, un sur le fond de la mer et un sur la superficie

L'hypothèse de rebond du signal est renforcée aussi par la forme d'onde des répliques. En effet la théorie dit qu'après un rebond sur la surface de la mer, le signal est multiplié par -1 (ou présente un déphasage de 180° , voir les références [6], [10] et [1]). Au fond, au contraire, le signal est atténué par un coefficient inconnu R qui dépend de la composition du sol et de l'angle d'incidence. Dans la figure 5 on voit des exemples de signal et de répliques opposées et cela accrédite fortement l'hypothèse d'avoir un signal rebondissant sur la surface de la mer.

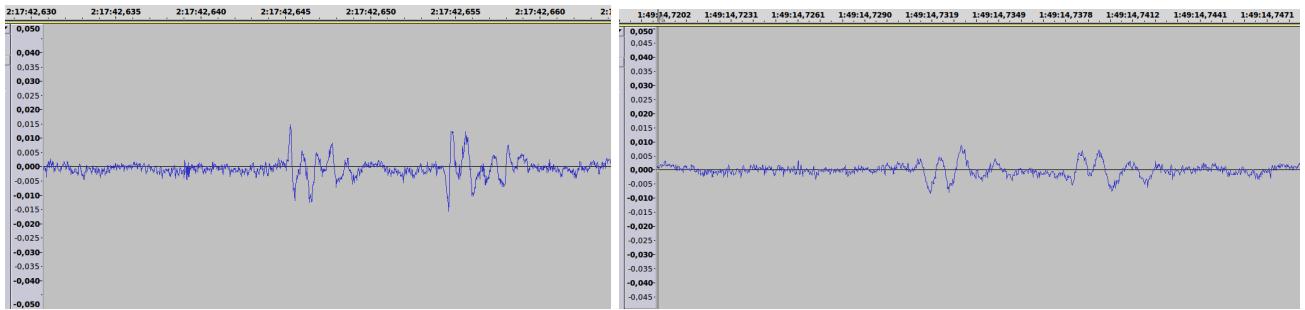


Figure 5: Deux signaux multiplié par -1 après un rebond sur la surface de la mer (fichier 170206_03 à gauche, et fichier 170202_05 à droite)

Ainsi, en considérant ces rebonds, on peut utiliser une méthode de calcul de la position basée sur les TDOA (Time Delays Of Arrival) sur des émetteurs fantômes. Cette méthode est présentée dans l'annexe 2 et est basée sur l'idée suivante : la différence d'arrivée entre le signal et ses rebonds dépend de la position de l'émetteur et du récepteur. En mesurant ces différences, on peut calculer la position. Généralement cette méthode s'utilise en enregistrant des sons brefs par plusieurs hydrophones (voir [2], chapitre 5.7 ou pour une utilisation plus récente pour des clics de cachalot [7]). Mais dans cette étude, on tire partie de la présence des rebonds pour faire le même type de localisation avec un seul hydrophone, comme dans [3]. Il est à noter que, par la méthode des émetteurs fantômes, on ne peut calculer que certaines coordonnées de la position de l'émetteur, une indécision sur l'azimuth provenant de la symétrie sphérique de ce modèle. Finalement, on a pu calculer, pour la série de LFB présentés dans la figure 1, la position de l'émetteur (voir figure 6).

Il y a des incertitudes lors du calcul de la position dues à la connaissance partielle des variables en jeu : la profondeur de la mer (qui change de façon non négligeable à cause de la houle qui est fréquemment de l'ordre de 2m de hauteur dans cette zone), la hauteur de l'hydrophone (qui dépend des courants, qui peuvent être également forts). Le modèle est aussi une approximation de la réalité, le fond de la mer et sa surface pouvant avoir une pente non négligeable. Pour toutes ces raisons, le calcul de position n'est pas extrêmement précis (figure 6 à droite). On présente une analyse de l'incertitude dans l'annexe 3. Dans le cas de la figure 6, l'incertitude sur la position de r et z sont de l'ordre de quelques mètres, ce qui empêche la reconstruction précise de la trajectoire durant les 7 secondes de durée de l'émission.

On peut noter qu'il suffit de deux rebonds pour estimer la position de l'émetteur. Mais quand il y a une troisième réplique, on peut vérifier la cohérence de son TDOA avec les autres (voir annexe 2). Pour tous les calculs de la figure 6, comme la hauteur de l'émetteur et de l'hydrophone sont comparables, les répliques 3 et 4 devraient arriver au même moment. C'est ce qu'on observe puisque nous avons seulement la présence d'une troisième réplique. En général la cohérence est très bonne entre le calcul et la mesure du TDOA de la troisième réplique (de l'ordre de 1ms). Cela

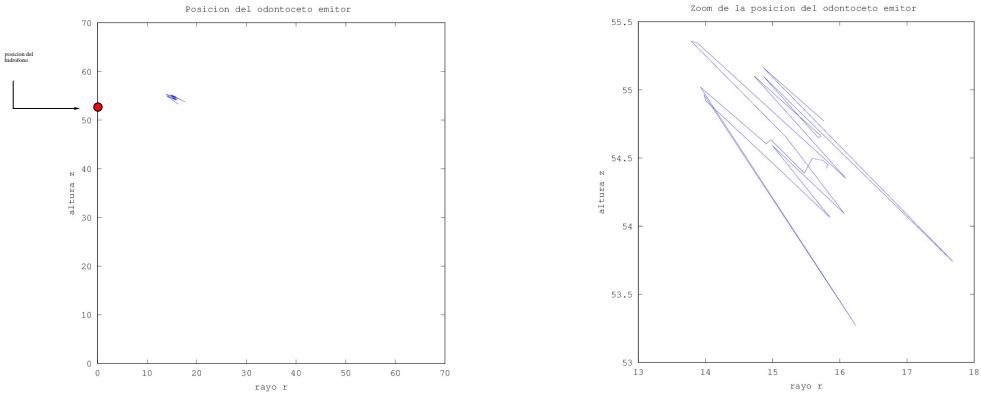


Figure 6: Calculs de la position en mètres de l'émetteur des LFB de la figure 1 (r est la distance horizontale à l'hydrophone et z la hauteur) (à gauche), Zoom sur la position (à droite)

renforce de nouveau l'hypothèse que les répliques viennent de rebonds du signal acoustique.

2.2 Comment mesurer les TDOA en pratique?

La première façon de mesurer les TDOA est de mesurer visuellement les temps entre le signal principal et ses répliques en utilisant la forme d'onde. Mais cette technique n'est pas très précise et, en plus, n'est pas toujours praticable.

2.2.1 Problèmes de mesure des TDOA

Un premier exemple de problème est le fait que parfois apparaissent seulement les deux premières répliques (la troisième se perd dans le bruit de fond). Dans ce cas, on ne peut pas vérifier la cohérence entre les calculs et les mesures. Un autre exemple, plus problématique, est le mélange de ces sons brefs, quand l'odontocète est près de la surface de la mer (le TDOA entre le signal et sa réplique est alors très faible) (voir figure 7, à gauche). Dans ce cas, on pourrait estimer les TDOA par un graphique en temps/fréquence mais ce n'est pas précis.

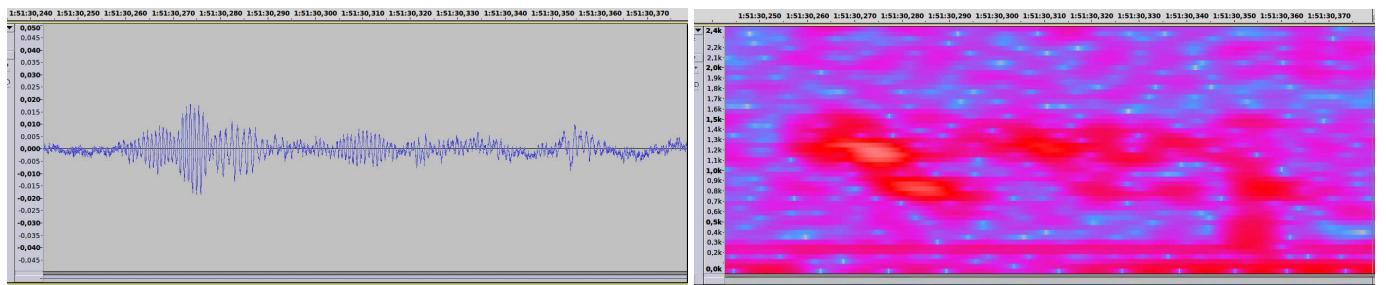


Figure 7: clics brefs à basse fréquence (LFB), fichier 170202_05. Sur cette figure, on voit le “mélange” entre le son reçu directement et la réplique sur la surface (à gauche) : c'est ainsi beaucoup plus difficile de mesurer le premier TDOA visuellement. En temps-fréquence, c'est plus facile de séparer le signal et les répliques mais on perd beaucoup en précision (à droite).

2.2.2 Méthode de cross-correlation

Pour mesurer précisément les TDOA, nous avons fait une cross-corrélation du signal, comme présenté en détail dans la référence [2], chapitre 5.7. Cette cross-corrélation agit comme un détecteur de répliques d'un signal choisi : on voit beaucoup mieux les répliques dans le graphique de cross-corrélation qu'en forme d'onde brute (voir figure 8). C'est un filtrage par filtre adapté. De plus, cette méthode nous permet de mesurer les TDOA dans les cas les plus difficiles présentés dans le paragraphe précédent.

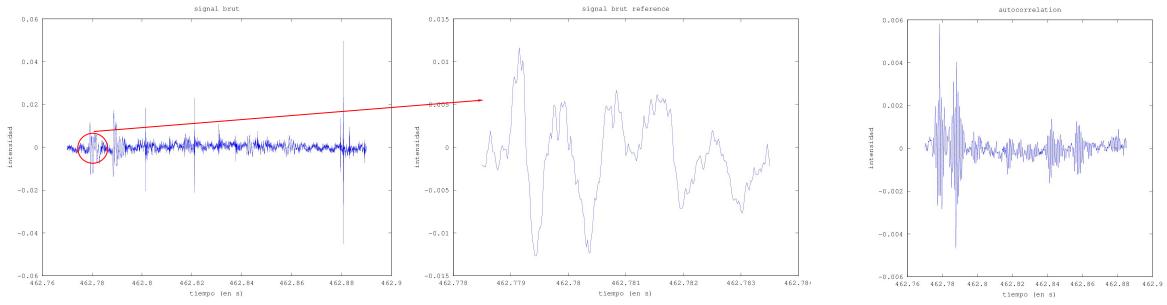


Figure 8: Signal reçu en forme d'onde (fichier 170206_03, commençant à 2h17min42.77s et d'une durée de 0.12s, à gauche), partie correspondant au signal direct, avec laquelle on fait une cross-corrélation du signal (centre), graphique de la cross-corrélation (à droite)

2.3 Perspectives

Utilisation Cette estimation de la position d'un odontocète pourrait permettre de connaître mieux le nombre d'animaux présents, leur comportement, les caractéristiques physiologiques de ces animaux (le lobe d'émission par exemple). Ce rapport pourrait aider pour de futures études des dauphins de cette zone où un suivi visuel et acoustique peut être envisagé.

Mesurer les TDOA des sifflements En temps-fréquence, on peut aussi voir des répliques du signal lors de l'émission d'un sifflement (figure 9).

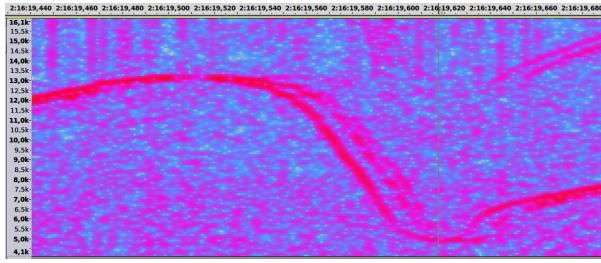


Figure 9: Siflements avec répliques, fichier 170206_03, FFT Blackman, fenêtre de 512 points

Il faudrait néanmoins mettre au point, dans ce cas, une méthode de mesure précise des TDOA.

3 Annexes

3.1 Sons accompagnants les LFB

Les sons accompagnant, dans les fichiers, les LFB sont de trois types : siflements, clics de haute fréquence et "bursts de clics" (figure 10). Ces sons sont des émissions typiques de grands dauphins.

3.2 Calcul de la position en connaissant les TDOA (time delays of arrival)

3.2.1 Description du modèle, variables

Pour notre modèle, nous faisons l'hypothèse d'être dans une zone de profondeur constante p , ce qui est assez vrai dans la zone de l'hydrophone (pente de moins de 2%), considérant les mesures de bathymétrie effectuées en mai 2017. Dans ce modèle, nous travaillerons dans un système de référence cylindrique où l'altitude est notée z (l'origine est le fond de la mer) et r est la distance horizontale à l'hydrophone. On note h l'altitude de l'hydrophone. Du à la symétrie du modèle nous ne pourrons pas calculer plus que ces deux variables (r, z) de l'émetteur : on ne peut calculer l'azimuth. De plus, nous faisons une hypothèse sur la propagation du son, cohérente avec les modèles physiques pour les hautes fréquences ([10] et [6]) : le son se propage en ligne droite avec des rebonds satisfaisants la loi de Snell-Descartes. Ainsi un son émis va rebondir plusieurs fois en surface et au fond de la mer. Dans la figure 11, on voit, dans notre système

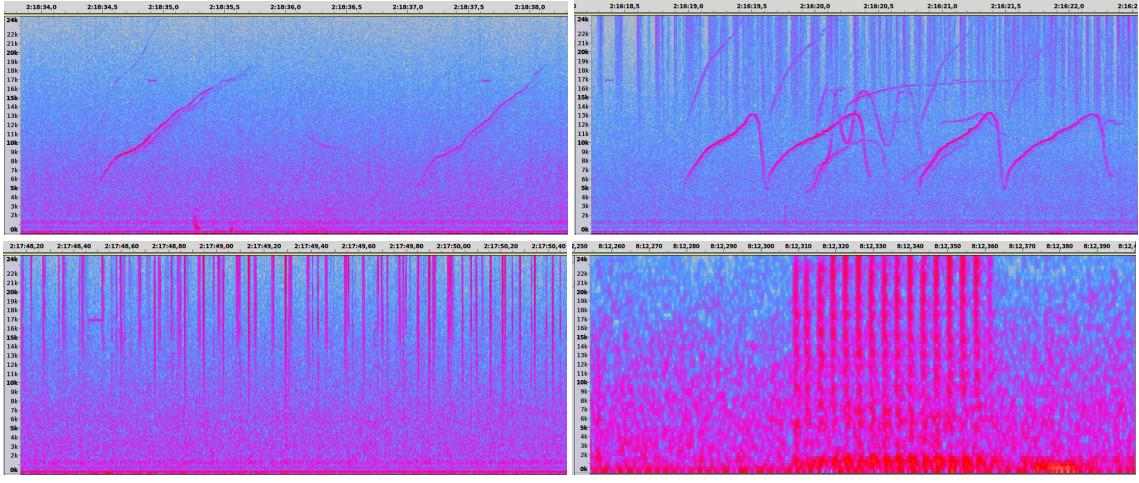


Figure 10: Siflements (a), Siflements de plusieurs dauphins (b), Clics de haute fréquence (c) Burst de clics (d), FFT fenêtre Blackman (a,b 1024) (c 512) (d 128), fichier 170206_03

de référence, la trajectoire directe et deux trajectoires comprenant un rebond. Pour ne pas surcharger la figure, nous n'avons pas tracé les trajectoires qui donnent les $t\text{doa}(sf)$ et $t\text{doa}(fs)$ et qui correspondent à deux réflexions (pour $t\text{doa}(sf)$ une réflexion sur la surface puis sur le fond et le contraire pour $t\text{doa}(fs)$).

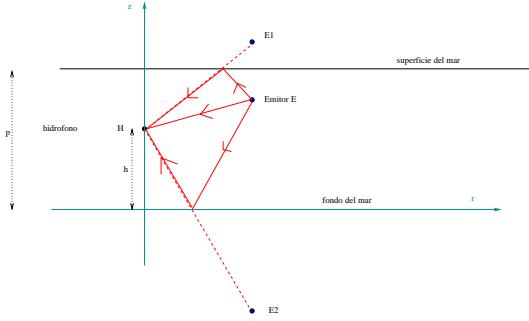


Figure 11: Principe de l'utilisation des TDOA. Le point E correspond à l'émetteur, le point E_1 est un “émetteur fantôme” et est son symétrique par rapport à la surface de la mer. Le point E_2 est un autre émetteur fantôme, le symétrique de E par rapport au fond.

Les constantes de notre modèle sont la vitesse du son dans l'eau $c_0 = 1480 \text{ m/s}$, la profondeur $p = 66 \text{ m}$, la hauteur de l'hydrophone $h = 53 \text{ m}$. Ces constantes ont une incertitude qui est analysée dans l'annexe 3.

On note $t\text{doa}(s)$ le temps (positif) qui correspond à la différence d'arrivée entre le signal direct et son rebond sur la surface de la mer. On a donc $t\text{doa}(s) = (HE_1 - HE)/c_0$.

On note $t\text{doa}(f)$ le temps (positif) qui correspond à la différence d'arrivée entre le signal direct et son rebond sur le fond de la mer. On a donc $t\text{doa}(f) = (HE_2 - HE)/c_0$.

On note $t\text{doa}(sf)$ le temps (positif) qui correspond à la différence d'arrivée entre le signal direct et son rebond sur la surface de la mer puis sur le fond. Si on note E_3 , le symétrique de E_1 par rapport au fond de la mer, on a $t\text{doa}(sf) = (HE_3 - HE)/c_0$.

On note $t\text{doa}(fs)$ le temps (positif) qui correspond à la différence d'arrivée entre le signal direct et son rebond sur le fond de la mer puis sur la surface. Si on note E_4 , le symétrique de E_2 par rapport à la surface de la mer, on a $t\text{doa}(fs) = (HE_4 - HE)/c_0$.

De manière générale, on note $c_0 \times t\text{doa}(x) = ct_x$ pour x une combinaison de lettres s et f .

3.2.2 Calculs

Les variables r et z vérifient les deux équations suivantes :

$$ct_s = \sqrt{r^2 + (z + h - 2p)^2} - \sqrt{r^2 + (z - h)^2} \quad ct_f = \sqrt{r^2 + (z + h)^2} - \sqrt{r^2 + (z - h)^2}$$

Alors

$$ct_s + \sqrt{r^2 + (z - h)^2} = \sqrt{r^2 + (z + h - 2p)^2} \quad ct_f + \sqrt{r^2 + (z - h)^2} = \sqrt{r^2 + (z + h)^2} \quad (\text{E1})$$

Au carré, cela donne :

$$ct_s^2 + 2ct_s\sqrt{r^2 + (z - h)^2} + r^2 + (z - h)^2 = r^2 + (z + h - 2p)^2$$

$$ct_f^2 + 2ct_f\sqrt{r^2 + (z - h)^2} + r^2 + (z - h)^2 = r^2 + (z + h)^2$$

Si on soustrait ces deux lignes, on obtient :

$$ct_s^2 - ct_f^2 + 2(ct_s - ct_f)\sqrt{r^2 + (z - h)^2} = -4p(z + h - p)$$

Et donc :

$$\sqrt{r^2 + (z - h)^2} = \frac{-2p(z+h-p)}{ct_s-ct_f} - \frac{ct_f+ct_s}{2} \quad (\text{E2})$$

$$r^2 + (z - h)^2 = \left(\frac{2p(z+h-p)}{ct_s-ct_f}\right)^2 + \frac{(ct_f+ct_s)^2}{4} + \frac{2p(z+h-p)(ct_s+ct_f)}{ct_s-ct_f}$$

$$r^2 + z^2 - 2zh + h^2 = \frac{4p^2}{(ct_s-ct_f)^2}[z^2 + 2z(h - p) + (h - p)^2] + \frac{(ct_f+ct_s)^2}{4} + \frac{2p(ct_s+ct_f)}{ct_s-ct_f}[z + h - p]$$

$$r^2 = \left(\frac{4p^2}{(ct_s-ct_f)^2} - 1\right)z^2 + \left(2h + \frac{8p^2(h-p)}{(ct_s-ct_f)^2} + \frac{2p(ct_s+ct_f)}{ct_s-ct_f}\right)z + \frac{4p^2(h-p)^2}{(ct_s-ct_f)^2} + \frac{(ct_f+ct_s)^2}{4} + \frac{2p(ct_s+ct_f)}{ct_s-ct_f}(h - p) - h^2$$

Cette équation, appelée équation A, est de la forme $r^2 = az^2 + bz + c$ où a , b et c dépendent seulement de valeurs connues. D'autre part, en remplaçant $\sqrt{r^2 + (z - h)^2}$ dans l'équation (E1) par l'expression donnée par (E2), on obtient :

$$ct_f + \frac{-2p(z+h-p)}{ct_s-ct_f} - \frac{ct_f+ct_s}{2} = \sqrt{r^2 + (z + h)^2}$$

Et ainsi :

$$r^2 + (z + h)^2 = \left(\frac{-2p(z+h-p)}{ct_s-ct_f} + \frac{ct_f-ct_s}{2}\right)^2$$

$$r^2 + z^2 + 2hz + h^2 = \frac{4p^2}{(ct_s-ct_f)^2}(z + h - p)^2 + 2p(z + h - p) + \frac{(ct_f-ct_s)^2}{4}$$

$$r^2 = \frac{4p^2}{(ct_s-ct_f)^2}z^2 + \frac{4p^2}{(ct_s-ct_f)^2}2z(h - p) + \frac{4p^2}{(ct_s-ct_f)^2}(h - p)^2 + 2pz + 2p(h - p) + \frac{(ct_f-ct_s)^2}{4} - z^2 - 2hz - h^2$$

$$r^2 = \left(\frac{4p^2}{(ct_s-ct_f)^2} - 1\right)z^2 + \left(\frac{8p^2(h-p)}{(ct_s-ct_f)^2} + 2p - 2h\right)z + \left(\frac{4p^2(h-p)^2}{(ct_s-ct_f)^2} + 2p(h - p) + \frac{(ct_f-ct_s)^2}{4} - h^2\right)$$

Cette équation, appelée B, est de la forme $r^2 = az^2 + b'z + c'$ où a , b' et c' dépendent seulement de valeurs connues.

Finalement, en soustrayant les équations A et B, on a :

$$(4h - 2p + \frac{2p(ct_s+ct_f)}{ct_s-ct_f})z + \frac{(ct_f+ct_s)^2}{4} + \frac{2p(ct_s+ct_f)}{ct_s-ct_f}(h - p) - 2p(h - p) - \frac{(ct_f-ct_s)^2}{4} = 0$$

$$(4h - 2p + \frac{2p(ct_s+ct_f)}{ct_s-ct_f})z + ct_s \times ct_f + \frac{4pct_f}{ct_s-ct_f}(h - p) = 0$$

$$\text{Au final, } z = \frac{ct_s \times ct_f + \frac{4pct_f}{ct_s-ct_f}(h - p)}{2p - 4h - \frac{2p(ct_s+ct_f)}{ct_s-ct_f}} = \frac{ct_s \times ct_f \times (ct_f - ct_s) + 4pct_f(p - h)}{4pct_f - 4h(ct_f - ct_s)}$$

Et la valeur de r se calcule avec $r = \sqrt{az^2 + bz + c}$

Vérification

Avec les valeurs de r et z , on peut calculer $tboa(sf)$ et $tboa(fs)$ et vérifier si ces valeurs coincident bien avec les $tboa$ mesurés (quand on peut les mesurer). On a $c_0 tboa(sf) = \sqrt{r^2 + (2p - z + h)^2}$ et aussi $c_0 tboa(fs) = \sqrt{r^2 + (2p + z - h)^2}$. Il faut noter que $tboa(sf) = tboa(fs)$ si $z = h$. Et, fréquemment, ces deux valeurs sont assez proches parce que les dauphins se trouvent près de la surface. Ainsi, en général, ce n'est pas facile de différencier les rebonds sf et fs (qui de plus sont d'intensité plus faible). Dans notre étude nous n'avons en général pas réussi à les différencier.

Deux bonnes références sur ce type de méthodes sont [2] et [3]. Nos calculs sont très proches de ceux présentés dans ce dernier article.

3.3 Calculs d'incertitude

Les mesures et constantes utilisées dans les calculs ne sont pas parfaitement connues. Par exemple, la hauteur de l'hydrophone h varie en fonction des courants et la profondeur p peut varier en fonction des marées et des vagues. La vitesse du son varie aussi et il y a une incertitude sur les mesures de TDOA. Tout ceci nous donne une incertitude globale sur la position calculée (r et z de l'odontocète).

3.3.1 Incertitude sur les variables

La vitesse du son c_0

Dans la référence [6], il y a une formule (empirique) qui donne la vitesse du son (en m/s) en fonction de la température T (en °C), la salinité S (en parts pour mille) et la profondeur z (en m) :

$$c_0 = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z$$

Dans cette formule, à basse profondeur, c'est la différence de température qui est le facteur le plus important de changement. Si on considère une variation possible de température de 15°C +- 5°C (c'est à dire que 95% des valeurs sont entre 10°C et 20°C) on obtient une vitesse moyenne à la superficie de 1480 m/s et un écart type de 5m/s.

La profondeur p

Les marées et les vagues sont assez grandes dans cette zone. Nous estimons que 90% des valeurs de profondeur sont entre 63m et 69m, ce qui donne un écarts type de 1.5m. De plus, la pente du fond de la mer peut modifier cette profondeur. Elle est de 2% et sur une zone de 50m, cela change la profondeur de 1m.

La distance h de l'hydrophone au fond de la mer

Cette distance semble plus constante que la profondeur p et on a décidé de lui attribuer un écart type de 0.5m

Les mesures de TDOA

Les TDOA, sont assez bien estimés par la méthode de cross-correlation. L'écart type est de moins de 0.5 ms.

En conclusion, on a la table suivante :

Variable	h	p	c_0	$tboa(s)$	$tboa(f)$
Moyenne μ	53m	66m	1480m/s	dépend de la position	dépend de la position
Ecart type σ	0.5 m	1.5 m	5 m/s	0.5 ms	0.5 ms

3.3.2 Incertitude sur les résultats

Avec ces estimations d'incertitude sur les variables, on a calculé des incertitudes sur les positions. Pour cela, on a fait une simulation du type Monte-Carlo, en faisant l'hypothèse que les variables aléatoires h , p , c_0 , $tboa(s)$ y $tboa(f)$ suivent une loi normale $N(\mu, \sigma^2)$ de paramètres donnés dans la table précédente. On a pris dix mille réalisations de ces cinq variables (avec les valeurs des TDOA de la figure 6) et on a calculé, pour chaque réalisation, les valeurs de r et z . La moyenne est de $r = 15.3$ m et $z = 54$ m et les écarts types sont autour de 2 m pour ces variables. C'est assez cohérent avec les variations de position vues dans la figure 6.

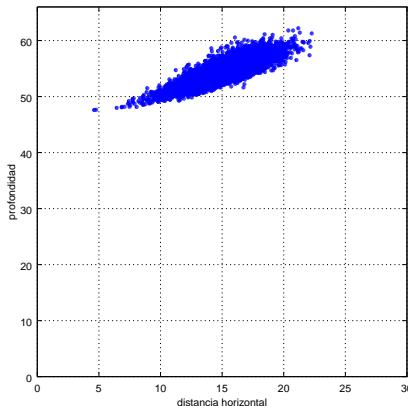


Figure 12: Simulation de Monte Carlo (avec 10.000 points) du calcul de la position de l'émetteur (r en abscisse, z en ordonnée) pour un $tboa(s)$ de 9ms et un $tboa(f)$ de 63ms.

References

- [1] W.W.L. Au. *The sonar of dolphin*. Springer, 1993.

- [2] W.W.L Au and M.C. Hastings. *Principles of marine bioacoustics*. Springer, 2008.
- [3] R. Aubauer, M.O. Lammers, and W.W.L. Au. One-hydrophone method of estimating distance and depth of phonating dolphins in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000.
- [4] M. Santos Carvallo, M-J. Perez Alvarez, V. Muniain, R. Moraga, D. Oliva, and M. Sepulveda. Trophic niche overlap between sympatric resident and transient populations of bottlenose dolphins in the humboldt current system off north-central chile. *Marine Mammal Science*, 2014.
- [5] H.C. Eskelinen, K.A. Winship, B.L. Jones, A.E.M. Ames, and S.A. Kuczaj. Acoustic behavior associated with co-operative task success in bottlenose dolphins (*tursiops truncatus*). *Animal Cognition*, 2016. DOI 10.1007/s10071-016-0978-1.
- [6] P. Filippi, A. Bergassoli, D. Habault, and J-P. Lefebvre. *Acoustics, Basic Physics, Theory, and Methods*. Academic press, 1998.
- [7] H. Glotin, F. Caudal, and P. Giraudeau. Whale cocktail party : real-time multiple tracking and signal analyses. *Canadian acoustics, acoustique canadienne*, 2008.
- [8] T. Gridley, A. Nastasi, H.J. Kriesell, and S.H. Elwen. The acoustic repertoire of wild common bottlenose dolphins (*tursiops truncatus*) in walvis bay, namibia. *Bioacoustics*, 2015.
- [9] D.L. Herzing. Vocalizations and associated underwater behavior of free-ranging atlantic spotted dolphins, *stenella frontalis* and bottlenose dolphins, *tursiops truncatus*. *Aquatic mammals*, pages 61–79, 1996.
- [10] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmid. *Computational Ocean Acoustics*. Springer, 2 edition, 2011.
- [11] S.L. King and V.M. Janik. Come dine with me: food-associated social signalling in wild bottlenose dolphins (*tursiops truncatus*). *Animal Cognition*, 18(4):969–974, 2015.
- [12] J.C. Lilly. Vocal behavior of the bottlenose dolphin. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6):520–529, 1962.
- [13] P.Tyack. Whistle repertoires of two bottlenosed dolphins, *tursiops truncatus* : mimicry of signature whistles? *Behav Ecol Sociobiol*, 18:251–257, 1986.
- [14] K.W. Schultz, D.H. Cato, P.J. Corkeron, and M.M. Bryde. Low frequency narrow-band sounds produced by bottlenose dolphins. *Marine mammal science*, 1995.

Bibliographie

- [1] ABYSOUND. Project : feasibility of the development of an underwater system which will be able to estimate noise generation by sea-floor mining in deep waters and to evaluate its impact on marine life. Naval group, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA), CNRS et Université d'Aix Marseille, Ifremer, Laboratoire Informatique et Systemes (LIS), Université de Toulon, OSEAN, MICRODB, SEMANTIC TS. <https://www.polemermediterranee.com/Activites-Projets/Ressources-energetiques-et-minieres-marines/ABYSOUND>.
- [2] O. Adam, D. Cazau, N. Gandalhon, B. Fabre, J.T. Laitman, and J.S. Reidenberg. New acoustic model for humpback whale sound production. *Applied Acoustics*, 74 :1182–1190, 2013.
- [3] M. A. Ainslie. *Principles of Sonar Performance Modelling*. Springer, 2010.
- [4] Mathias H Andersson, Sandra Andersson, Jimmy Ahlsén, Brodd Leif Andersson, Jonatan Hammar, Leif Kg Persson, Jörgen Pihl, Peter Sigray, and Andreas Wikström. A framework for regulating underwater noise during pile driving. Technical report, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden, 2017.
- [5] Artur Andriolo, Franciele Rezende de Castro, Thiago Amorim, Gustavo Miranda, Juliana Di Tullio, Juliana Moron, Bruna Ribeiro, Gabriela Ramos, and Raíssa Rodrigues Mendes. *Advances in Marine Vertebrate Research in Latin America*, chapter Marine Mammal Bioacoustics Using Towed Array Systems in the Western South Atlantic Ocean, pages 113–147. Springer International Publishing AG 2018, 2018.
- [6] James L. Aroyan, Mark A. McDonald, Spain C. Webb, John A. Hildebrand, David Clark, Jeffrey T. Laitman, and Joy S. Reidenberg. *Acoustic Models of Sound Production and Propagation*, chapter 10, pages 409–469. Springer-Verlag, 2000.
- [7] W. W. L. Au and M. C. Hastings. *Principles of marine bioacoustics*. Springer, 2008.
- [8] Whitlow W.L. Au, Arthur N. Popper, and Richard R. Fay. *Hearing by whales and dolphins*. Springer, 2000.
- [9] Naysa E. Balcazar, Holger Klinck, Sharon L. Nieukirk, David K. Mellinger, Karolin Klinck, Robert P. Dziak, and Tracey L. Rogers. Using calls as an indicator for antarctic blue whale occurrence and distribution across the southwest pacific and southeast indian oceans. *Marine Mammal Science*, 33(1) :172–186, 2017.
- [10] Mark Baumgartner, Sofie Van Parijs, Cara Hotchkin, Keenan Ball, and Jim Partan. Near real-time passive acoustic detection and reporting of marine mammals from mobile autonomous platforms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141 :3849–3850, 05 2017.
- [11] Julien Bonnel, Aaron M. Thode, Susanna B. Blackwell, Katherine Kim, and A. Michael Macrander. Range estimation of bowhead whale (*balaena mysticetus*) calls in the arctic using a single hydrophone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 136(1) :145–155, 2014.

- [12] Léa Bouffaut, Richard Dréo, Valérie Labat, Abdel-O. Boudraa, and Guilhem Barruol. Passive stochastic matched filter for antarctic blue whale call detection. *J. Acoust. Soc. Am.*, 144(2) :955–965, 2018.
- [13] T. A. Branch, K. M. Stafford, D. M. Palacios, J. L. Bannister C. Allison, C. L. K. Burton, E. Cabrera, C. A. Carlson, B. Galletti Vernazzani, P. C. Gill, R. Hucke-Gaete, K. C. S. Jenner, M.-N. M. Jenner, K. Matsuoka, Y. A. Mikhalev, T. Miyashita, M. G. Morrice, S. Ni-shiwaki, V. J. Sturrock, D. Tormosov, R. C. Anderson, A. N. Baker, P. B. Best, P. Borsa, R. L. Brownell Jr, S. Childerhouse, K. P. Findlay, T. Gerrodette, A. D. Ilangakoon, M. Joergensen, B. Kahn, D. K. Ljaungblad, B. Maughan, R. D. McCauley, S. MCKay, T. F. Norris, Oman Whale, Dolphin Research group, S. Rankin, F. Samaran, D. Thiele, K. Van Wae-rebeek, and R. M. Warneke. Past and present distribution, densities and movements of blue whales balaenoptera musculus in the southern hemisphere and northern indian ocean. *Mammal Rev.*, 37(2) :116–175, 2007.
- [14] S. Buchan, K. Stafford, R. Hucke-Gaete, C. Clark, N. Balcazar-Cabrera, L. Gutierrez, J. Patris, F. Malige, S. Neira, M. Sepulveda, M. Santos-Carvallo, and C. Olavarria. A review of blue and fin whale acoustically-inferred seasonal movements in the eastern south pacific. Poster in the 22nd Biennial Society for Marine Mammalogy Conference on the Biology of Marine Mammals, October 2017.
- [15] Susannah Buchan, Rodrigo Hucke-Gaete, Luke Rendell, and Kathleen Stafford. A new song recorded from blue whales in the corcovado gulf, southern chile, and an acoustic link to the eastern tropical pacific. *Endang Species Res*, 23 :241–252, 2014.
- [16] Susannah Buchan, Rodrigo Mahu, Jorge Wuth, Naysa Balcazar-Cabrera, Laura Gutiérrez, Sergio Neira, and Nestor Yoma. An unsupervised hidden markov model-based system for the detection and classification of blue whale vocalizations off chile. *Bioacoustics*, pages 1–28, 01 2019.
- [17] Susannah Buchan, Julie Patris, Ivan Hinojosa, and Marcelo Flores. Elaboracion de una guia técnica para la evaluación de impacto producido por ruido subacuatico. Technical report, Ministerio del medio Ambiente, Chile, diciembre 2018.
- [18] Susannah Buchan and Renato Quiñones. First insights into the oceanographic characteristics of a blue whale feeding ground in northern patagonia, chile. *Marine Ecology Progress Series*, 554 :183–199, 2016.
- [19] Susannah Buchan, Luke Rendell, and Rodrigo Hucke-Gaete. Preliminary recordings of blue whale (balaenoptera musculus) vocalizations in the gulf of corcovado, northern patagonia, chile. *Marine Mammal Science*, 26(2) :451–459, 2010.
- [20] Susannah Buchan, Kathleen Stafford, and Rodrigo Hucke-Gaete. Seasonal occurrence of southeast pacific blue whale songs in southern chile and the eastern tropical pacific. *Marine Mammal Science*, 31(2) :440–458, 2015.
- [21] Andrés Calderón and Camila Calderón. Ermitano. Illustrations de la vie sousmarine du Pacifique chilien. <https://www.facebook.com/ermitanobiobio/>.
- [22] A.G. Carroll, Rachel Przeslawski, Alec Duncan, M Gunning, and B Bruce. A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish invertebrates. *Marine Pollution Bulletin*, 114, 12 2016.
- [23] Frederic Caudal and Herve Glotin. Multiple real-time 3d tracking of simultaneous clicking whales using hydrophone array and linear sound speed profile. In *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 2441–2444. IEEE, 2008.
- [24] S. Cerchio, T. Collins, S. Mashburn, C. Clark, and H. Rosenbaum. Acoustic evidence of blue whales and other baleen whale vocalizations off northern angola. Technical report, International Whaling Commission Scientific Committee, Agadir, Morocco., 2010.

- [25] N.R. Chapman. Measurement of the waveform parameters of shallow explosive charge. *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(2), August 1985.
- [26] C. S. Clay. Optimum time domain signal transmission and source location in a waveguide. *J. Acoust. Soc. Am.*, 81(3) :660–664, 1987.
- [27] Michael Collins. A split-step padé solution for the parabolic equation method. *Journal of The Acoustical Society of America*, 93 :1736–1742, 04 1993.
- [28] UICN commission de survie des espèces. *Catégories et Critères de la Liste rouge de l’UICN : version 3.1, deuxième édition*. Gland and Cambridge, 2012.
- [29] Paul Cristini and Dimitri Komatitsch. Some illustrative examples of the use of a spectral-element method in ocean acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131 :EL229–35, 03 2012.
- [30] D. A. Croll, C. W. Clark, A. Acevedo, B. Tershy, S. Flores, J. Gedamke, and J. Urban. Bioacoustics : Only male fin whales sing loud songs. *Nature*, 417(6891) :809–809, 2002.
- [31] CTBTO. Comprehensive nuclear-test-ban treaty organization. <https://ctbto.org/>.
- [32] W.C. Cummings and P.O. Thompson. Underwater sounds from the blue whale, balaenoptera musculus. *Journal of the Acoustical Society of America*, 50 :1193–1198, 1971.
- [33] Organisation des Nations Unies. Première conférence internationale sur la préservation des océans 2017. <https://www.un.org/fr/conf/ocean/index.shtml>.
- [34] Yann Doh. *Nouveaux modèles d'estimation monophone de distance et d'analyse parcimonieuse : Applications sur signaux transitoires et stationnaires bioacoustiques à l'échelle*. PhD thesis, Université de Toulon, 2014.
- [35] Richard Dreо, Léa Bouffaut, Emmanuelle Leroy, Guilhem Barruol, and Flore Samaran. Baleen whale distribution and seasonal occurrence revealed by an ocean bottom seismometer network in the western indian ocean. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 04 2018.
- [36] Robert Dunn and Olga Hernandez. Tracking blue whales in the eastern tropical pacific with an ocean-bottom seismometer and hydrophone array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126 :1084–94, 10 2009.
- [37] John W. Eaton, David Bateman, and Soren Hauberg. *GNU Octave version 3.0.1 manual : a high-level interactive language for numerical computations*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2009. ISBN 1441413006.
- [38] Christine Erbe. Overview of animal bioacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143 :1734–1734, 03 2018.
- [39] H.C. Eskelinen, K.A. Winship, B.L. Jones, A.E.M. Ames, and S.A. Kuczaj. Acoustic behavior associated with cooperative task success in bottlenose dolphins (*tursiops truncatus*). *Animal Cognition*, 2016.
- [40] Paul C. Etter. Advanced applications for underwater acoustic modeling. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012.
- [41] Maxence Ferrari, Hervé Glotin, Ricard Marxer, Valentin Barchasz, Véronique Sarano, Valentin Giés, Mark Asch, and François Sarano. High-frequency near-field physeter macrocephalus monitoring by stereo-autoencoder and 3d model of sonar organ. In *OCEANS 2019- Let's seaA our future together*. IEEE, 2019.
- [42] NOAA fisheries. Marine mammal stock assessment reports by species/stock : Right whale, north atlantic. Technical report, National Oceanic and Atmospheric Administration, february 2019.

- [43] Manon Fourniol, Valentin Gies, Valentin Barchasz, Edith Kussener, Hervé Barthelemy, Remy Vauché, and Hervé Glotin. Analog ultra low-power acoustic wake-up system based on frequency detection. In *2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)*, pages 109–115. IEEE, 2018.
- [44] L. Neil Frazer and Peter I. Pecholcs. Singlehydrophone localization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(2) :995–1002, 1990.
- [45] A. Gannier and G. Marty. Sperm whales ability to avoid approaching vessels is affected by sound reception in stratified waters. *Mar. Pollut. Bull.*, 2015.
- [46] A. N. Gavrilov, R. D. McCauley, and J. Gedamke. Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of antarctic blue whales. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(6), June 2012.
- [47] A.N. Gavrilov, R.D. McCauley, C. Salgado-Kent, J. Tripovitch, and C. Burton Wester. Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time. . *Acoust. Soc. Am. 130 (6)*, December 2011, 130(6), December 2011.
- [48] Carlos Gayer. Evaluación de línea base de las reservas marinas "isla chañaral" e " isla choros-damas". Technical report, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, 2008.
- [49] P. Giraudet and H. Glotin. Real-time 3d tracking of whales by echo-robust precise tdoa estimates with a widely-spaced hydrophone array. *Applied Acoustics*, 67(11) :1106–1117, 2008.
- [50] Hervé Glotin, Frédéric Caudal, and Pascale Giraudet. Whales cocktail party : a real-time tracking of multiple whales. *International Journal Canadian Acoustics*, 36(1), 2008.
- [51] Hervé Glotin, Paul Spong, Helena Symonds, Vincent Roger, Randall Balestrieri, Maxence Ferrari, Marion Poupart, Jared Towers, Scott Veirs, Ricard Marxer, Pascale Giraudet, James pilkinton, Val Veirs, Jason Wood, John Ford, and Thomas Dakin. Deep learning for ethoacoustical mapping : Application to a single cachalot long term recording on joint observatories in vancouver island. In *176th Meeting Acoustical Society of America*, volume 144, pages 1776–1777, 09 2018.
- [52] GMRT. Global multi-resolution topography. Marine Geo-science Data System. <http://www.marine-geo.org/tools/GMRTMapTool/>.
- [53] T. Gridley, A. Nastasi, H.J. Kriesell, and S.H. Elwen. The acoustic repertoire of wild common bottlenose dolphins (*tursiops truncatus*) in walvis bay, namibia. *Bioacoustics*, 2015.
- [54] E. Hafla, E. Johnson, N. Johnson, L. Preston, D. Aldridge, and J. D. Roberts. Modeling underwater noise propagation from marine hydrokinetic power devices through a time-domain, velocity-pressure solution. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2018.
- [55] Danielle Harris, Luis Matias, Len Thomas, John Harwood, and Wolfram H. Geisser. Applying distance sampling to fin whale calls recorded by single seismic instruments in the northeast atlantic. *J. Acoust. Soc. Am.*, 134(5) :3522 – 3535, 2013.
- [56] Gordon D. Hastie, Deborah J.F. Russell, Bernie McConnell, Simon Moss, Dave Thompson, and Vincent M. Janik. Sound exposure in harbour seals during the installation of an offshore wind farm : predictions of auditory damage. *Journal of Applied Ecology*, 52 :631–640, 2015.
- [57] M. J. Hinich. Maximum-likelihood signal processing for a vertical array. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 54 :499–503, 1973.
- [58] IWC. International whaling commission. <https://iwc.int/home>.
- [59] Finn B. Jensen, William A. Kuperman, Michael B. Porter, and Henrik Schmid. *Computational Ocean Acoustics*. Springer, 2 edition, 2011.

- [60] Sérgio M. Jesus, Michael B. Porter, Yann Stéphan, Xavier Démoulin, Orlando C. Rodríguez, and Emanuel M. M. Ferreira Coelho. Single hydrophone source localization. *IEEE J. of Oceanic Engineering VOL. 25, NO. 3, JULY 2000*, 25(3) :337–346, 2000.
- [61] S.L. King and V.M. Janik. Come dine with me : food-associated social signalling in wild bottlenose dolphins (*tursiops truncatus*). *Animal Cognition*, 18(4) :969–974, 2015.
- [62] D. Komatitsch and J. Tromp. Introduction to the spectral-element method for 3-d seismic wave propagation. *Geophys. J. Int.*, 139 :806–822, 1999.
- [63] Dimitri Komatitsch and Jean-Pierre Vilotte. The spectral element method : an efficient tool to simulate the seismic response of 2d and 3d geological structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 :368–392, 04 1998.
- [64] W. A. Kuperman, G. L. D'Spain, and K. D. Heaney. Long range source localization from single hydrophone spectrograms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 109(5) :1935–1943, 2001.
- [65] W. A. Kuperman and J. F. Lynch. Shallow-water acoustics. *Physics Today*, pages 55–61, october 2004.
- [66] Line Kyhn, Jakob Tougaard, Len Thomas, Linda Rosager Duve, Joanna Stenback, Mats Amundin, Genevieve Desportes, and Jonas Teilmann. From echolocation clicks to animal density—acoustic sampling of harbor porpoises with static dataloggers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131 :550–60, 01 2012.
- [67] Elizabeth T. Küsel, David Mellinger, Len Thomas, Tiago Marques, David Moretti, and Jessica Shaffer. Cetacean population density from single fixed sensors using passive acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129 :3610–22, 06 2011.
- [68] Michael Ladegaard, Frants Havmand Jensen, Mafalda de Freitas, Vera Maria Ferreira da Silva, and Peter Teglberg Madsen. Amazon river dolphins (*inia geoffrensis*) use a high-frequency short-range biosonar. *Journal of Experimental Biology*, 218(19) :3091–3101, 2015.
- [69] LAMLA. Listening to aquatic mammals in latin america. <https://www.lamla2016.com>.
- [70] Yung P. Lee. Time-domain single hydrophone localization in a real shallow water environment. *IEEE*, pages 1074–1077, 1998.
- [71] E.C. Leroy, F. Samaran, J. Bonnel, and J-Y. Royer. Seasonal and diel vocalization patterns of antarctic blue whale (*balaenoptera musculus intermedia*) in the southern indian ocean : A multi-year and multi-site study. *PLoS ONE* 11(11) : e0163587. doi :10.1371/journal.pone.0163587, 2016.
- [72] Emmanuelle Leroy, Jean-Yves Royer, Julien Bonnel, and Flore Samaran. Long-term and seasonal changes of large whale call frequency in the southern indian ocean. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 11 2018.
- [73] S. Li and C.S. Clay. Optimum time domain signal transmission and source location in a waveguide : Experiments in an ideal wedge waveguide. *J. Acoust. Soc. Am.*, 82(4) :1409–1417, 1987.
- [74] J.C. Lilly. Vocal behavior of the bottlenose dolphin. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6) :520–529, 1962.
- [75] Ying-Tsong Lin, Arthur Newhall, James Miller, Gopu Potty, and Kathleen Vigness-Raposa. A three-dimensional underwater sound propagation model for offshore wind farm noise prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145 :EL335–EL340, 05 2019.
- [76] Anelio Lobo, Jorge Acevedo, José Luis Brito, Carlos Olavarria, Rodrigo Moraga, and Carlos Olave. La ballena franca del sur, *eubalaena australis* (desmoulins, 1822) en aguas chilenas : análisis de sus registros desde 1976 a 2008 southern right whales, *eubalaena australis* (desmoulins, 1822) off chile : analyses of records from 1976 to 2008. *Revista de biología marina y oceanografía*, 43, 12 2008.

- [77] N. A. Mackintosh. *The distribution of southern blue and fin whales.*, pages 125–144. Kenneth Stafford Norris, 1966.
- [78] F. Malige, J. Patris, S. Buchan, and H. Glotin. Acoustical analyses of submarine explosions in northern chile on long term continuous recordings. In *Detection, Classification, Localization and Density Estimation of marine mammals using passive acoustics*. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2018.
- [79] Franck Malige, Julie Patris, Susannah Buchan, Marie Trone, and Hervé Glotin. Advanced interdisciplinary bioacoustical analyses for cetacean observatories in chile and peru. In *1st Listening for Aquatic Mammals in Latin America Workshop (LAMLA 1)*, Natal, Brazil, 2016.
- [80] Tiago A. Marques, Len Thomas, Stephen W. Martin, David K. Mellinger, Jessica A. Ward, David J. Moretti, Danielle Harris, and Peter L. Tyack. Estimating animal population density using passive acoustics. *Biol. Rev.*, 88 :287–309, 2013.
- [81] Luis Matias and Danielle Harris. A single-station method for the detection, classification and location of fin whale calls using ocean-bottom seismic stations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(1) :504–520, 2015.
- [82] M.A. McDonald and C.G. Fox. Passive acoustic methods applied to fin whale population density estimation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 105(5) :2643–2651, May 1999.
- [83] M.A. McDonald, J.A. Hildebrand, and S.Mesnick. Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs. *Endangered species research*, 9 :13–21, 2009.
- [84] Mark McDonald, Sarah L. Mesnik, and John A. Hildebrand. Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide : using song to identify populations. *J. Cetacean Res. Manage.*, 2006.
- [85] H. Medwin. Speed of sound in water : A simple equation for realistic parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, 58 :1318–1319, 1975.
- [86] David Mellinger, Kathleen Stafford, Sue E. Moore, Bob Dziak, and Haru Matsumoto. An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20 :36–45, 12 2007.
- [87] J.L. Miksis-Olds and S. Nieuirkir. Relating the decreasing frequency of sri lankan pygmy blue whale calls to the local soundscape. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139, 2016.
- [88] B. S. Miller, K. Collins, J. Barlow, S. Calderan, R. Leaper, M. McDonald, P. Ensor, P.A. Olson, C. Olavarria, and M.C. Double. Blue whale vocalizations recorded around new zealand : 1964–2013. *J. Acoust. Soc. Am.*, 135(3) :1616–1623, March 2014.
- [89] S.K. Mitchell, N.R. Bedford, and M.S. Weinstein. Determination of source depth from the spectra of small explosions observed at long ranges. *J. Acoust. Soc. Am.*, 60(4), October 1976.
- [90] C. Morency and J. Tromp. Spectral-element simulations of wave propagation in poroelastic media. *Geophys. J. Int.*, 175 :301–345, 2008.
- [91] J. M. F. Moura and Y. Jin. Detection by time reversal : Single antenna. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(1) :187–201, 2006.
- [92] Peter Narins. Amphibian bioacoustics : From arch to zelick. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143 :1767–1767, 03 2018.
- [93] Sharon L. Nieuirkir, Selene Fregosi, David K. Mellinger, and Holger Klinck. A complex baleen whale call recorded in the mariana trench marine national monument. *The Journal of the Acoustical Society of America, express letter*, 140(3) :EL274–EL279, 2016.

- [94] Haiqiang Niu, Zaixiao Gong, Emma Ozanich, Peter Gerstoft, Haibin Wang, and Zhenglin Li. Deep-learning source localization using multi-frequency magnitude-only data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146 :211–222, 07 2019.
- [95] Thomas Norris, Kerry Dunleavy, Tina Yack, and Elizabeth Ferguson. Estimation of minke whale abundance from an acoustic line transect survey of the mariana islands. *Marine Mammal Science*, 33, 03 2017.
- [96] Eva-Marie Nosal and Neil Frazer. Track of a sperm whale from delays between direct and surface-reflected clicks. *Applied Acoustics*, 67 :1187–1201, 11 2006.
- [97] OALIB. On line acoustical librairy of propagation models. US Office of Naval Research. <https://oalib-acoustics.org/>.
- [98] Erin M. Oleson, John Calambokidis, William C. Burgess, Mark A. McDonald, Carrie A. LeDuc, and John A. Hildebrand. Behavioral context of call production by eastern north pacific blue whales. *Mar Ecol Prog Ser*, 330 :269–284, 2007.
- [99] Erin M. Oleson, Sean M. Wiggins, and John A . Hildebrand. Temporal separation of blue whale call types on a southern california feeding ground. *Animal Behaviour*, 74 :881–894, 2007.
- [100] Hui Ou, Whitlow W. L. Au, Sofie Van Parijs, and Erin M. Olesonand Shannon Rankin. Discrimination of frequency-modulated baleen whale downsweep calls with overlapping frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(6) :3024–3032, 2015.
- [101] Homer P. Bucker. Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water. *Journal of The Acoustical Society of America*, 59 :368–373, 02 1976.
- [102] Julie Patris, Mark Asch, Hervé Glotin, Dimitri Komatitsch, Elwin van’t Wout, Susannah Buchan, and Franck Malige. High performance modeling of the propagation of biological sounds in the ocean : new numerical tools in the study of cetaceans. In Berkowitz Héloïse and Dumez Hervé, editors, *Racket in the oceans : why underwater noise matters, how to measure and how to manage it*. Paris : Observatory for Responsible Innovation / Palaiseau (France) : i3-CRG (CNRS – École polytechnique), 2017.
- [103] Julie Patris, Pascale Giraudet, Franck Malige, Laurence Bachet, and Hervé Glotin. A l’écoute des cétacés. *Revue Espèces*, 15, 2015.
- [104] Julie Patris, Hervé Glotin, Dimitri Komatitsch, Elwin van ‘t Wout, Franck Malige, and Mark Asch. High-performance computing for whale sound propagation in south american oceans based on accurate numerical techniques. In *1st Listening for Aquatic Mammals in Latin America Workshop (LAMLA 1)*, Natal, Brazil, 2016.
- [105] Julie Patris, Dimitri Komatitsch, Hervé Glotin, Franck Malige, Susannah Buchan, and Mark Asch. Monohydrophone 3d localization of baleen whales. In *Detection, Classification, Localization and Density Estimation of marine mammals using passive acoustics*. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2018.
- [106] Julie Patris, Dimitri Komatitsch, Maritza Sepúlveda, Macarena Santos, Hervé Glotin, Franck Malige, Susannah Buchan, and Mark Asch. Monohydrophone localization of blue whales : results of an initial study in northern chile. In *XII Congreso de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Mamíferos Acuáticos, 05 – 08 Noviembre 2018 Lima, Perú*. Universidad peruana Cayetano Heredia, 2018.
- [107] Julie Patris, Franck Malige, Divna Djokić, Renata Sousa-Lima, and Hervé Glotin. Humpback whale songs and themes recognition tool. In *Detection, Classification, Localization and Density Estimation of marine mammals using passive acoustics (DCLDE)*. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2018.

- [108] Julie Patris, Franck Malige, and Hervé Glotin. Construction et mise en place d'un système fixe d'enregistrement à large bande pour les cétacés "bombyx 2" isla de chañaral, été austral 2017. Technical Report 2017-03, LSIS CNRS, march 2017.
- [109] Julie Patris, Franck Malige, Hervé Glotin, Mark Asch, and Susannah Buchan. A standardized method of classifying pulsed sounds : application to the blue whales southeast pacific song units. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019. Accepted Aug, 30th.
- [110] R. S. Payne and S. McVay. Songs of humpback whales. *Science*, 173 :585–597, 1971.
- [111] C.L. Pekeris. Theory of propagation of explosive sound in shallow water. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 27, 1948.
- [112] Maria-José Perez-Alvarez, Rodrigo Vásquez, Rodrigo Moraga, Macarena Santos, Sebastian Kraft, Valeria Sabaj, Juan Capella, Jorge Gibbons, Yerko Vilina, and Elie Poulin. Home sweet home : social dynamics and genetic variation of a long-term resident bottlenose dolphin population off the chilean coast. *Animal Behaviour*, 139 :81–89, 05 2018.
- [113] M Poupard, M Ferrari, J Schluter, R Marxer, P Giraudet, V Barchasz, V Gies, G Pavan, and H Glotin. Real-time passive acoustic 3d tracking of deep diving cetacean by small non-uniform mobile surface antenna. In *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 8251–8255. IEEE, 2019.
- [114] Marion Poupard, Paul Best, Jan Schlüter, Jean Marc Prevot, Helena Symonds, Paul Spong, and Hervé Glotin. Deep learning for ethoacoustics of orcas on three years pentaphonic continuous recording at orcalab revealing tide, moon and diel effects. In *OCEANS 2019-Let's seA our future together*. IEEE, 2019.
- [115] M.K. Prior and D.J. Brown. Estimation of depth and yield of underwater explosions from first and second bubble-oscillation periods. *IEEE, journal of oceanic engineering*, 35(1), January 2010.
- [116] N. Quieffin. *Etude du rayonnement acoustique de structures solides : vers un système d'imagerie haute résolution*. Physics, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2004.
- [117] J.S. Reidenberg. Terrestrial, semiaquatic, and fully aquatic mammal sound production mechanisms. *Acoustics Today*, 13(2), 2017.
- [118] Felipe Rivera and Rodrigo Díaz. *Los Changos del Borte Costero de la comuna de La Higuera : Resurgimiento de identidades, organización y reconocimiento*. in press, 2019.
- [119] T. D. Rossing. *The science of sound, 2nd Ed.* Addison-Wesley, Reading, MA, 1990.
- [120] Dan Russell. Acoustics and vibration animations. Pennsylvania State University. <https://www.acs.psu.edu/drussell/demos.html>.
- [121] C. Ji S. Tsuboi, D. Komatitsch and J. Tromp. Spectral-element simulations of the november 3, 2002, denali, alaska earthquake on the earth simulator. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 139 :305–313, 2003.
- [122] M.R. Saddler, A. Bocconcetti, L. S. Hickmott, G. Chiang, R. Landea-Briones, P. A. Bahamonde, G. Howes, P. S. Segre, and L. S. Sayigh. Characterizing chilean blue whale vocalizations with dtags : a test of using tag accelerometers for caller identification. *Journal of Experimental Biology*, 220 :4119–4129, 2017. doi :10.1242/jeb.151498.
- [123] Flore Samaran, Olivier Adam, and Christophe Guinet. Detection range modeling of blue whale calls in southwestern indian ocean. *Applied Acoustics*, 71, 11 2010.
- [124] Flore Samaran, Christophe Guinet, Olivier Adam, Jean-François Motsch, and Yves Cansi. Source level estimation of two blue whale subspecies in southwestern indian ocean. *J. Acoust. Soc. Am.*, 127(6) :3800–3808, 2010.

- [125] K.W. Schultz, D.H. Cato, P.J. Corkeron, and M.M. Bryde. Low frequency narrow-band sounds produced by bottlenose dolphins. *Marine mammal science*, 11 :503–509, 1995.
- [126] Maritza Sepúlveda, Doris Oliva, Macarena Santos, and Guido Pavez. *Caleta Chañaral de Aceituno : Destino turístico de alta calidad para el avistamiento de cetáceos, otros mamíferos y aves marinas*. Gobierno Regional de Atacama, 2016.
- [127] Maritza Sepúlveda, Macarena Santos, and Guido Pavez. *Whale-watching en la reserva marina Isla Chañaral : manejo y planificación para una actividad sustentable*. Universidad de Valparaíso, 2017.
- [128] F. Shabangu, K. Stafford, K. Findlay, S. Rankin, D. Ljungblad, Y. Tsuda, L. Morse, C. Clark, H. Kato, and P. Ensor. Overview of the iwc sower cruise circumpolar acoustic survey data and analyses of antarctic blue whale calls within the dataset. Technical report, International Whaling Commission, 2018.
- [129] Craig Smith and Amy R. Baco. Ecology of whale falls at the deep-sea floor. *Oceanogr. Mar. Biol.*, 41 :311–354, 01 2003.
- [130] Renata Sousa-Lima, Marcia H. Engel, Victor Sábato, Bianca Lima, Thiago Queiróz, Marcos de Brito, Deborah Fernandes, Cristiane Martins, Paula Hatum, Laura Honda, Maria Gonçalves, Julio Baumgarten, Artur Andriolo, Milton Ribeiro, and Christopher Clark. Acoustic ecology of humpback whales in brazilian waters investigated with basic and sophisticated passive acoustic technologies over 17 years. *WIO Journal of Marine Science Special Issue*, 1 :23–40, 2018.
- [131] SPECFEM. Software package specfem3d cartesian for simulating seismic wave propagation at the local or regional scale based upon the spectral-element method. Computational infrastructure for geodynamics (CIG), Princeton University, CNRS, Université d’Aix Marseille, ETH Zürich. <https://geodynamics.org/cig/software/specfem3d/>.
- [132] R. Stacey. Improved transparent boundary formulations for the elastic-wave equation. *B.S.S.A.*, 78 :2089–2097, 1988.
- [133] K. M. Stafford, C. Lydersen, O. Wiig 3, and K. M. Kovacs. Seasonal detection of three types of 'pygmy' blue whale calls in the indian ocean. *Biol. Lett.*, 14, 2018.
- [134] Kathleen Stafford, E Chapp, D Bohnenstiehl, and M Tolstoy. Seasonal detection of three types of 'pygmy' blue whale calls in the indian ocean. *Mar. Mammal Sci.*, 23 :751–765, 01 2011.
- [135] Kathleen M. Stafford, Sharon L. Nieukirk, and Christopher G. Fox. Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical pacific. *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(6) :3687–3698, 1999.
- [136] Alison K Stimpert, Stacy L DeRuiter, Erin A Falcone, John Joseph, Annie B Douglas, and David J More. Sound production and associated behavior of tagged fin whales (*balaenoptera physalus*) in the southern california bight. *Anim Biotelemetry (2015)* 3 :23, 3(23), 2015.
- [137] Jérôme Sueur, Sandrine Pavoine, Olivier Hamerlynck, and Stéphanie Duvail. Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLOS ONE*, 3(12) :1–9, 12 2009.
- [138] Martin Thiel, Erasmo Macaya, Enzo Acuna, Wolf Arntz, Horacio Bastias, Katherina Brokordt, Patricio Camus, Juan Carlos Castilla, Leonardo Castro, Maritza Cortes, Clenient P. Dumont, Ruben Escribano, Miriam Fernandez, Jhon A. Gajardo, Carlos Gaymer, Ivan Gomez, Andres E. Gonzalez, H.E. González, Pilar Haye, and J M Alonso Vega. The humboldt current system of northern and central chile. *Oceanography and marine biology*, 45 :195–345., 06 2007.

- [139] A. M. Thode, S. B. Blackwell, A. S. Conrad, K. H. Kim, and A. M. Macrander. Decadal-scale frequency shift of migrating bowhead whale calls in the shallow beaufort sea. *J. Acoust. Soc. Am.*, 142(3), September 2017.
- [140] A. M. Thode, G. L. D'Spain, and W. A. Kuperman. Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 107(3) :1286–1300, 2000.
- [141] Christopher O. Tiemann, Aaron M. Thode, Janice Straley, Victoria O’Connell, and Kendall Folkert. Three-dimensional localization of sperm whales using a single hydrophone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(4) :2355–2365, 2006.
- [142] Frederick Toro, Yerko A. Vilina, Juan J. Capella, and Jorge Gibbons. Novel coastal feeding area for eastern south pacific fin whales (*balaenoptera physalus*) in mid-latitude humboldt current waters off chile. *Aquatic Mammals*, 42(1) :47–55, 2016.
- [143] Grégoire Le Touzé. *Localisation de source par petits fonds en UBF (1-100 Hz) à l'aide d'outils temps- fréquence*. Traitement du signal et de l'image, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007.
- [144] J. Tromp, D. Komatitsch, and Q. Liu. Spectral-element and adjoint methods in seismology. *Communication in Computational Physics*, 3(1) :1–32, 2008.
- [145] Marie Trone, Hervé Glotin, Randall Balestrieri, and Bonnett David. Enhanced feature extraction using the morlet transform on 1 mhz recordings reveals the complex nature of amazon river dolphin (*inia geoffrensis*) clicks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138 :1904–1904, 09 2015.
- [146] P. Tyack. Whistle repertoires of two bottlenosed dolphins, *tursiops truncatus* : mimicry of signature whistles ? *Behav Ecol Sociobiol*, 18 :251–257, 1986.
- [147] Peter L. Tyack. *Functional aspects of cetacean communication*, chapter 11, pages 270–307. the University of Chicago Press, 2000.
- [148] UEABS. Unified european application benchmark suite. PRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe). http://www.prace-ri.eu/IMG/pdf/Selection_of_a_Unified_European_Application_Benchmark_Suite.pdf.
- [149] B. Galletti Vernazzani, J.A. Jackson, E. Cabrera, C.A. Carlson, and R.L.Jr. Brownell. Abundance and trend of chilean blue whales off isla de chiloe, chile. *PLoS ONE*, 12(1), 2017. doi :10.1371/journal.pone.0168646.
- [150] Fang Wang, Nathalie Favretto-Cristini, Paul Cristini, Thierry Garlan, Xavier Demoulin, Olivier Morio, Anne Deschamps, David Ambrois, and E. Beucler. Seismo-acoustic wave propagation in the rade of hyères (france) generated by counter-mining of explosive devices : comparison between numerical simulations and real experiments. In *OCEANS 2019- Let's sea our future together*. IEEE, 2019.
- [151] Xun Wang, Shahram Khazaie, Dimitri Komatitsch, and Pierre Sagaut. Sound-source localization in range-dependent shallow-water environments using a four-layer model. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 44 :220–228, 01 2019.
- [152] Jessica Ward, Len Thomas, Susan Jarvis, Nancy DiMarzio, David Moretti, Tiago Marques, Charlotte Dunn, Diane Claridge, Eva Hartvig, and Peter Tyack. Passive acoustic density estimation of sperm whales in the tongue of the ocean, bahamas. *Marine Mammal Science*, 28, 04 2012.
- [153] W.A. Watkins, editor. *The Harmonic interval fact or artifact in spectral analysis of pulse train*, volume 2, American Museum of Natural History, New York, April 13-15 1966. Pergamon Press-Oxford And New-York.

- [154] William Watkins. Activities and underwater sounds of fin whales. *Sci. Rep. Whales Res. Inst.*, 33 :83–117, 1981.
- [155] D.E. Wilson and R.A. Mittermeier, editors. *Handbook of the mammals of the world*, volume 4. Lynx Edicions, 2014.
- [156] H. E. Winn and L. K. Winn. The song of the humpback whale megaptera novaeangliae in the west indies. *Marine Biology*, 47(2) :97–114, 1978.
- [157] Walter M. X. Zimmer. *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans*. Cambridge University Press, 2011.
- [158] Ana Širović, Trevor Branch, Robert L. Brownell Jr, Salvatore Cerchio, Aimee Lang, Susanah Buchan ans Ken Findlay, Brian Miller, Paula Olson, Tracey Rogers, Flore Samaran, and Robert Suydam. Blue whale song occurrence in the southern hemisphere. Technical report, International Whaling Commission, 2017.
- [159] Ana Širović, John A. Hildebrand, and Sean M. Wiggins. Blue and fin whale call source levels and propagation range in the southern ocean. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122(2) :1208–1215, 2007.
- [160] Ana Širović, Lauren N. Williams, Sara M. Kerosky Sean M. Wiggins, and John A. Hildebrand. Temporal separation of two fin whale call types across the eastern north pacific. *Mar. Biol.*, 160 :47–57, 2013.

Contributions en méthodes pour le suivi de mysticètes par acoustique passive

Résumé en français

La surveillance par acoustique passive est un outil d'importance croissante pour l'étude des mammifères marins. Cette thèse pose des nouveaux modèles pour l'étude du plus grand d'entre eux, la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*). Pour ce faire, nous avons enregistré un corpus inédit dans l'archipel de Humboldt au nord du Chili. Nos données révèlent un chant caractéristique de la baleine bleue 'chilienne', dont nous étudions la structure pulsée et l'évolution au cours des dernières décennies. Le classement en signal tonal ou non-tonal nous permet, en nous focalisant sur la fréquence fondamentale mise à jour, de quantifier la baisse en fréquence des chants et d'effectuer une comparaison au niveau mondial. Notre troisième contribution est une méthode de localisation mono-hydrophone basée sur des simulations de propagation par éléments spectraux. C'est à notre connaissance le premier modèle de ce type, implémenté en milliers d'heures de calcul haute performance.

Mot clés : bioacoustique, mysticètes, baleine bleue (*Balaenoptera musculus*), localisation mono hydrophone, baisse de fréquence des chants, analyse de voisement, calcul haute performance, SPECFEM, propagation d'onde acoustique

Methods for passive acoustic monitoring of blue whales

Résumé en anglais

Passive acoustic monitoring has a growing importance in studies of marine mammals. This work is concerned with the largest of marine mammals, the blue whale (*Balaenoptera musculus*). We obtained a new corpus of acoustic data in the northern part of Chile, from the Humboldt archipelago. We show the presence of a song characteristic of the 'Chilean' blue whale, formerly described in southern Chile and Galapagos islands. Based on this song type, we propose new methods of analysing and classifying pulsed sounds. Using the fundamental frequency thus obtained, we analyse the blue whale's song, showing a general evolution of the frequency on a decadal scale. We also construct a method of mono-hydrophone source localisation based on high performance simulation of the acoustic wave field, by spectral element methods. To conclude, we emphasize the importance of bioacoustics for monitoring the marine world.

Keywords : bioacoustics, mysticetes, blue whale (*Balaenoptera musculus*), localisation mono-hydrophone, frequency shift, high performance computation, SPECFEM