



HAL
open science

Surveillance acoustique des baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien austral : traitement, analyse et interprétation

Emmanuelle Leroy

► **To cite this version:**

Emmanuelle Leroy. Surveillance acoustique des baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien austral : traitement, analyse et interprétation. Autre [q-bio.OT]. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2017. Français. NNT : 2017BRES0069 . tel-01686443

HAL Id: tel-01686443

<https://theses.hal.science/tel-01686443v1>

Submitted on 17 Jan 2018

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

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

UBO

université de bretagne
occidentale

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : Acoustique sous-marine et Traitement du signal

École Doctorale des Sciences de la Mer et du Littoral

présentée par

Emmanuelle Leroy

Préparée à

L'Unité Mixte de Recherche 6538

Géosciences Océan

Institut Universitaire Européen de la Mer

Surveillance acoustique des baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien austral : traitement, analyse et interprétation

Thèse soutenue le 25 septembre 2017

devant le jury composé de :

Kathleen STAFFORD

Docteur, University of Washington / *rapporteur*

Olivier ADAM

Professeur, Université Paris Sud / *rapporteur*

Anne LEBOURGES-DHAUSSY

Ingénieure de Recherche, IRD Brest / *examinatrice*

Vincent RIDOUX

Professeur, Observatoire PELAGIS / *examineur*

Jean-Yves ROYER

Directeur de Recherche CNRS, LGO / *directeur de thèse*

Julien BONNEL

Enseignant Chercheur, ENSTA Bretagne / *co-directeur de thèse*

Flore SAMARAN

Enseignant Chercheur, ENSTA Bretagne / *invitée*



L'océan Indien enfante les poissons les plus divers et les plus grands qui soient, dont les cétacés et les tourbillons d'eau dits baleines dont la longueur atteint quatre acres ou arpents de terre.

PLUTARQUE

Résumé

Surveillance acoustique des baleines bleues Antarctique dans l’océan Indien austral : traitement, analyse et interprétation des signaux

Menée au bord de l’extinction par la chasse industrielle, la baleine bleue Antarctique, *Balaenoptera musculus intermedia*, est aujourd’hui classée sur la liste des espèces en danger critique d’extinction. Les connaissances sur l’état de la population depuis l’arrêt de la chasse, ou encore sur son écologie (*e.g.* route de migration, aires de reproduction) sont toutefois encore très limitées. En raison de la taille et de l’éloignement de ses aires de distribution, ainsi que des conditions climatiques souvent défavorables qui y règnent, les observations visuelles sont difficiles à entreprendre et peu efficaces. La surveillance par acoustique passive est alors une méthode alternative parfaitement adaptée à l’étude de ces animaux vocalement très actifs. Ce travail de thèse porte sur l’analyse de 6 ans de surveillance acoustique passive dans l’océan Indien austral qui s’avère une région d’habitat et de migration particulièrement importante pour la baleine bleue Antarctique et donc propice pour caractériser la répartition géographique et temporelle de cette espèce sur plusieurs cycles saisonniers.

Depuis 2010, le réseau d’hydrophones OHASISBIO enregistre en continu les sons basse-fréquence de l’océan Indien austral (0-120 Hz) sur une région de près de 9 000 000 km^2 . Les baleines bleues et le rorqual commun, par leurs vocalisations, contribuent de façon majeure à ce paysage acoustique. Afin d’analyser ce volume important de données, nous avons d’abord testé et validé une méthode de détection automatique des vocalisations de baleines bleues Antarctique, appelées cris en Z ou “Z-calls”. L’analyse systématique des données OHASISBIO a ensuite révélé une fréquentation annuelle de la zone d’écoute par les baleines bleues Antarctique. Cette fréquentation présente de forts patrons saisonniers avec une présence accrue de l’automne au printemps, variables selon les sites mais stables d’une année à l’autre. Cette saisonnalité reflète une migration saisonnière entre une région d’hivernage au nord et une région d’alimentation au sud, bien que certains individus soient présents toute l’année dans le réseau. L’émission des vocalisations suit aussi un rythme nyctéméral, avec une plus forte occurrence pendant le jour.

Cette analyse systématique précise aussi la diminution long-terme de la fréquence (*i.e.* hauteur) des Z-calls, de l'ordre de 0.13 Hz/an, qui est aussi observée, à partir d'une analyse plus sommaire, sur les signatures vocales de baleines bleues pygmées (*B. m. breviceauda*) et de rorquals communs (*B. physalus*). A cette variation inter-annuelle se superpose une modulation intra-annuelle de fréquence d'environ ± 0.1 Hz. Cette variation saisonnière de fréquence apparait corrélée à la variation intra-annuelle du bruit ambiant basse-fréquence. Ces changements de fréquence traduiraient des changements de l'intensité vocale d'émission, qui diminuerait sur le long terme en raison de l'accroissement de la densité de population depuis l'arrêt de la chasse, et varierait sur le court-terme selon l'intensité du bruit ambiant, elle-même modulée en grande partie par le bruit résultant de la dislocation des icebergs durant l'été austral.

L'océan Indien austral est connu comme étant une zone de sympatrie fréquentée par les baleines bleues Antarctique, trois populations acoustiquement distinctes de baleines bleues pygmées et les rorquals communs. L'analyse préliminaire de leurs vocalisations montre aussi une fréquentation saisonnière de tout ou partie de l'aire d'écoute par ces différentes (sous-)espèces et populations, confirmant l'intérêt écologique de cette région. Notre analyse systématique des données a enfin révélé la présence de deux nouvelles vocalisations : le "M-call", tonalité d'environ 22 Hz identifiée dans des données enregistrées en 2007 dans la même zone (réseau DEFLOHYDRO), et le "P-call", tonalité d'environ 27 Hz, présente dans les enregistrements de 2007 ainsi que dans ceux collectés depuis 2010. L'occurrence de ces signaux, aux caractéristiques proches des vocalisations de baleines bleues, est fortement saisonnière. Ici encore, cette saisonnalité varie selon les sites, mais présente une stabilité inter-annuelle (de 2010 à 2015). L'identification de leur source, probablement un rorqual, nécessitera des observations visuelles et acoustiques conjointes.

Tous ces enseignements démontrent que l'écoute acoustique passive est un outil puissant pour la surveillance long-terme des grandes baleines, en particulier dans les régions éloignées et peu hospitalières des océans. Ils soulignent aussi l'intérêt de maintenir des réseaux d'écoute continue sur plusieurs années et sur plusieurs sites. L'exploitation des données bioacoustiques, à la croisée du traitement du signal, de l'acoustique, de la statistique et de l'écologie, ne saurait progresser sans une approche pluridisciplinaire.

Mots clés : baleine bleue Antarctique, bioacoustique, acoustique passive, détection automatique, distribution géographique, saisonnalité, migration, variations de fréquence, océan Indien austral

Abstract

Acoustic monitoring of Antarctic blue whales in the Southern Indian Ocean : data processing, analysis and interpretation

Brought to the brink of extinction by commercial whaling in the 20th century, the Antarctic blue whale, *Balaenoptera musculus intermedia*, is currently listed as a critically endangered species. However, our knowledge of the population recovery since the whaling ban and of the species ecology (*e.g.* migration path, breeding grounds) is still limited. Antarctic blue whales inhabit large and remote areas, where rough climatic conditions prevail. Visual observations are thus difficult to undertake, and often poorly efficient. Hence, passive acoustic monitoring is an alternative method, perfectly adapted to the study of such highly vocal animals. This dissertation presents an analysis of 6 years of passive acoustic monitoring in the southern Indian Ocean, known to be a particularly important area of habitat and migration for the Antarctic blue whale and thus favorable for characterizing the geographic and temporal distribution of this species over several season cycles.

Since 2010, the OHASISBIO hydrophone network continuously records the low-frequency sounds of the southern Indian Ocean (0-120 Hz) over an area of about 9,000,000 km^2 . Blue and fin whales, through their vocal activity, are one of the major components of this soundscape. For the analysis of this important database, we first tested and validated an automated detection method for Antarctic blue whale calls, known as Z-calls. Then, the systematic analysis of the OHASISBIO data unveils a year-round presence of the Antarctic blue whales. This attendance shows strong seasonal patterns with a greater presence in the fall and spring, varying with the site locations, but stable across the years. This seasonality reflects a seasonal migration between wintering areas in the north and feeding areas in the south, although some individuals seem to be present year-round in the network. The emission of vocalizations also shows a diel pattern, with a higher call occurrence during daytime.

This systematic analysis further documents the long-term decline of the frequency (*i.e.* pitch) of Z-calls, in the order of 0.13 Hz/yr, which also occurs in the vocal signatures of pygmy blue whales (*B. m. breviceauda*) and fin whales (*B. physa-*

lus), based on a preliminary analysis. This inter-annual variation is superimposed by an intra-annual modulation of frequency of about ± 0.1 Hz. This seasonal variation seems correlated with intra-annual variations in the low-frequency ambient noise level. These changes of frequency would reflect changes in the vocal intensity of the calls, which would decrease on the long-term due to a density increase of the species population since whale ban, and would vary on the short-term to adjust to the ambient noise level, in turn largely modulated by cryogenic noises due to the dislocation of icebergs in the austral summer.

The southern Indian Ocean is known to be a sympatric area for Antarctic blue whales, three acoustically distinct populations of pygmy blue whales, and fin whales. The preliminary analysis of their calls showed a seasonal attendance of the whole or a part of the monitored area by these (sub-)species and populations, and thus confirms the ecological importance of the region. Our systematic analysis of the data also unveiled two new vocalizations : the “M-call”, a tonal sound near 22 Hz found in data recorded in 2007 in the same area (DEFLOHYDRO hydrophone array), and the “P-call”, a tonal sound of about 27 Hz, recorded in 2007 and since 2010 onwards. These signals, with characteristics close to that of blue whale calls, occur with a strong seasonality. Here again, this seasonality depends on the site, but show an inter-annual stability (from 2010 to 2015). The identification of their source(s), probably a large baleen whale, will require a combination of visual and acoustic observations.

All these results demonstrate that passive acoustic monitoring is a powerful tool for the long-term surveillance of large baleen whales, particularly in remote and inhospitable areas of the world ocean. They also emphasize the importance of maintaining networks of hydrophones over several years and sites. The exploitation of bioacoustic data, at the crossroad of signal processing, acoustics, statistics and ecology, could not progress without a multidisciplinary approach.

Keywords : Antarctic blue whale, bioacoustic, passive acoustic monitoring, automated detection, spatial distribution, seasonality, migration, frequency variations, southern Indian Ocean

Remerciements

On m'avait dit que les remerciements étaient la partie la plus difficile dans la rédaction de la thèse, et la rumeur est vraie! Même en ayant attendu la fin, et en étant finalement docteur, la tâche n'en est pas plus aisée. Si j'avais cédé à la facilité, j'aurais rédigé ces remerciements en baleine bleue Antarctique : une jolie page remplie de “Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z”, et le tour aurait été joué! Mais cela n'aurait pas été très juste.

Alors dans un premier temps, il me faut bien évidemment remercier ceux qui m'ont offert la possibilité d'entamer et de mener à bien cette grande aventure de la vie qu'est la thèse : **Jean-Yves Royer** et **Julien Bonnel**, mes directeurs. **Jean-Yves**, merci beaucoup d'avoir fait le pari de me prendre en thèse, malgré mon bagage de biologiste. Merci pour ta patience, ton écoute, tes encouragements dans les moments un peu plus compliqués, et pour ces discussions parfois hautement scientifiques (et toujours inspiratrices) sur ce que peuvent bien faire ou se raconter les baleines. Merci également pour tes relectures attentives, tes corrections pointilleuses, et de m'avoir enseigné l'art des belles oranges pas chères! Enfin, un énorme merci de m'avoir offert la chance d'embarquer par deux fois à bord du Marion Dufresne, de découvrir les réalités du terrain, de la vie en mer, ainsi que ces fabuleuses terres australes. Voilà une foule de souvenirs que je ne suis pas prête d'oublier! (D'ailleurs si un jour tu manquais de main d'œuvre sur la mission, je devrais pouvoir me libérer ...).

Julien, je ne serais pas allée bien loin non plus sans toi. Merci de m'avoir fait confiance pour ce sujet de thèse, et d'avoir eu la patience d'enseigner l'art (obscur) du traitement du signal à une biologiste blonde, qui, parfois (mais c'est rare), ronchonchonne un peu. Merci de m'avoir fait prendre conscience des réalités, limites et difficultés de l'acoustique, et de m'avoir appris le langage des acousticiens et signalistes. J'avoue me sentir un peu moins purement biologiste, et un peu plus “pluri-disciplinaire” (mince, j'ai mis des guillemets!), et ça fait un bien fou! En plus grâce à toi je sais maintenant que tout problème insoluble a toujours une solution : “C'est la vie! ”.

Un merci super spécial à **Flore Samaran**, grâce à qui tout a commencé. Je n'avais jamais imaginé, en t'envoyant ce mail il y a 5 ans pour te demander un stage, que j'en serais là aujourd'hui! Alors merci pour tout ça, et merci d'avoir continué à me suivre et me guider quand bien-même tu n'étais pas officiellement dans mon encadrement, telle une Marraine-La-Bonne-Fée! Heureusement que tu étais là pour parler biologie et baleines (entre autres ... bavardes nous? Sûrement pas!). Merci aussi pour ton soutien précieux dans les périodes un peu difficiles de la thèse.

Un grand merci à mes rapporteurs, **Kate Stafford** et **Olivier Adam**, d'avoir accepté de lire et évaluer mon manuscrit, avec un merci spécial à **Kate**, qui n'a pas hésité à traverser l'océan pour être à ma soutenance (et grâce à qui je n'ai plus froid aux pieds). Un grand merci également à **Anne Lebourges-Dhaussy** et **Vincent Ridoux**, qui ont accepté de faire partie de mon jury.

Et puis ces trois années n'auraient pas été les mêmes sans les collègues, amis et copains de galère. Un merci particulier à **Florent Le Courtois**, qui fut une espèce de mentor en acoustique, traitement du signal, et concerts de métal (et a permis d'alimenter l'imaginaire de Julien). Merci d'avoir supporté mes pleurnicheries, bavardages et radotages pendant ces trois ans, et d'avoir toujours eu la patience de répondre à mes questions de novice en acoustique et traitement du signal. Grâce à toi, je n'ai pas été aussi paumée que prévu dans ce nouveau monde qu'était pour moi l'équipe AP, et je me suis un peu moins noyée quand les conversations autour d'une bière déviaient invariablement sur le boulot.

Merci également à mes cobureaux, surtout à toi **Mathieu**, qui m'a tout appris de la vie du labo, et qui m'a supportée sans faillir. Je suis heureuse d'avoir pu râler à tes côtés (poilus). Merci aussi à **Eve**, **Romain**, **Massi**, **Sabrina** et **Jean**, avec qui j'ai partagé mon bureau sur des périodes plus ou moins longues. Merci aux collègues doctorants du LGO pour les divers moments partagés, discussions, repas et pauses café : **Virgil** (merci pour ce précieux soutien mutuel de doctorants en fin de rédaction!), **Marie T**, **Mumu**, **Jean-Mi**, **Caro**, **Charles**, **Ruth**, **Marion**, **Réjanne**, **Marie B**, **Huixin**, **Alden**, **Maxence**, **Laurine** et **Clément**. Et puis il y a aussi tous les copains de l'ENSTA : **Angélique**, **Ewen**, **Rémi** (on repart à Boston manger du lobster? Baby don't hurt me, no more!), **Gaëtan**, **Morgane**, **Guillaume**, **Riwal**, **Dorian**, **Adrien**, **Julie**, **Yann** et **Bazile**. Merci à vous pour ces moments partagés autour d'un délicieux repas de la cantine de l'ENSTA, ou autour d'une bonne bière!

J'ai également une énorme pensée pour toi, **Romain**. J'ai toujours dans mes brouillons un mail avec une capture de spectro pour savoir si cette vocalisation-là te dit quelque-chose.... je n'aurai jamais ma réponse. Je garde précieusement en mémoire nos échanges (et tes menaces d'envoyer des infos sur ces "fichues baleines" aux baleiniers japonais). J'aurais drôlement aimé avoir eu le temps de mieux te connaître !

Un merci spécial pour mon super-héros du LGO, j'ai nommé **Christophe Martin**, sans qui j'aurais abandonné plus d'une fois la thèse pour cause d'ordi pourri ! (Au passage, HP, je vous maudis pour tout ce temps perdu !). Merci **Christophe** de ne jamais m'avoir envoyée balader avec mes problèmes foireux, même quand je me pointais dans ton antre près d'une fois par semaine, et que cette saleté de machine ne te laissait d'autre choix que de me répondre "J'suis désolé, mais là je ne peux rien pour toi !". **MERCI** de n'avoir jamais laissé tomber !

Il y a aussi toutes ces personnes rencontrées pour le boulot, qui ont permis des échanges fructueux. Je souhaite tout d'abord remercier vivement **François-Xavier Socheleau**, qui m'a fait confiance pour tester et utiliser son super Z-detector ! Merci d'avoir pris le temps de m'expliquer les tenants et aboutissants de la méthode, d'avoir adapté ton discours à mon cerveau de biologiste, et d'avoir toujours répondu à mes interrogations diverses. Merci beaucoup à **Matthieu Authier**, héros statisticien de la Rochelle, qui m'a apporté un précieux coup de main. Merci aussi à **Richard Dréo** et **Léa Bouffaut**, pour cette nouvelle collaboration, ces discussions et ces découvertes super intéressantes (et ces deadlines un poil serrées). Un grand merci également aux membres du SORP, que j'ai pu rencontrer à diverses conférences, mais surtout lors du meeting à Bled, en Slovénie, qui m'ont accueillie au sein du groupe et m'ont permis de découvrir et participer aux enjeux plus généraux de la recherche sur les baleines bleues Antarctique. Merci donc à **Kate Stafford**, **Ana Širović**, **Ken Findlay**, **Susannah Buchan**, **Ilse Van Opzeeland**, **Danielle Harris** et **Brian Miller**. Merci beaucoup à l'Australian Antarctic Division et notamment à **Brian Miller** de m'avoir confié les données acoustiques qui m'ont permis d'étendre notre aire d'écoute et de compléter encore les informations apportées par notre jeu de données. Je remercie également les collègues allemandes, **Ilse Van Opzeeland** et **Karolin Thomisch**, pour ces trois mois passés à l'AWI et cette collaboration fructueuse, qui fut riche en enseignements. Merci aux copains rencontrés là-bas, pour ces marchés de Noël et Glühwein partagés : **Viki**, **Simone**, **Damien** et **Nico**.

Et puis il y a eu aussi (et surtout) ces deux fameuses missions à bord du Marion Dufresne, leur foule de souvenirs et de rencontres formidables. Un énorme merci aux gars de l'équipage, et en particulier à mes boscos'tauds préférés : **Manu** et **Pascal**, mon éléphant de mer favori : ton bracelet m'accompagne toujours ! Et puis il y a le cap'tain aussi ! **Master Greg**, merci pour ta bonne humeur, ces cafés partagés sur le pont arrière à attendre et à noter les km de bouts (de vectran) qui passent, et tous ces sacrés souvenirs moins sérieux : bataille d'eau à la lance à incendie, russes blancs spéciaux shaker manchot, ou encore ce fameux pari (que j'ai gagné haut la main, ne t'en déplaie !). Merci à tous les copains rencontrés sur ces missions, qui ont fait que ces moments seront à jamais inoubliables (et qui ont entre autres fait de mon passage de quart de siècle un moment de folie) : **Grigor** (talentueux créateur de chapeaux de catherinettes !), **Gildas** (fameux distillateur d'eau de mer (et de bonne humeur), danseur et créateur d'étoiles rouges), mon p'tit **John**, **Charlie**, **Sasha**, **Arnaud**, **Claude**, **Patrick**, **Philippe**, **Pauline**, **Ophélie**, **Nono**, et tous les autres, qu'il serait bien trop long de citer ici, mais que je n'oublie pas ! Un merci spécial pour toi **Nono**, qui m'a soutenue dans les dernières périodes de thèse. Tu avais raison : finalement, on y survit ! Et longue vie à l'alliance acoustique passive et active !

Et puis bon, les missions à bord du Marion, c'est avant tout le boulot ! Alors il me faut aussi remercier **Mickaël Beauverger**, pour avoir géré la préparation du matériel pour ces missions, et le déploiement des hydrophones. Sans toi, je n'aurais pas eu autant de données à analyser, alors merci !

Enfin, rien n'aurait été possible sans la famille. J'en suis arrivée là aujourd'hui parce que j'ai eu la chance d'avoir des parents qui nous ont toujours encouragés et nous ont permis de suivre la voie que l'on souhaitait, et je ne les en remercierai jamais assez. Merci donc à mon Papa, ma Dodue, mes frangins et belles-frangines, mes grands-parents et toute la famille, pour les encouragements, le soutien, et la présence (même de loin), et ce même si pour eux la thèse et ses enjeux garde une part de mystère. Et puis je sais que Là-Haut, j'ai une bonne étoile qui veille. Alors merci.

Un immense merci également à mon amoureux, parce que depuis toutes ces années tu m'accompagnes et me supportes malgré mes projets farfelus : le master, la thèse, et bientôt peut-être le bout du monde !

Sans oublier quelques grosses papouilles à mon p'tit citron, qui m'a assurée prises d'air et apport en oxygène durant cette dernière année, et a sans doute ainsi empêché une surchauffe de ciboulot !

Table des matières

Résumé	V
Abstract	VII
Remerciements	IX
Table des matières	XV
Liste des publications et communications scientifiques	XVII
Introduction	1
1 La baleine bleue Antarctique, de l'exploitation à la protection	5
1.1 La baleine bleue, une espèce en danger d'extinction	6
1.1.1 La chasse baleinière : d'une chasse de subsistance à une exploitation commerciale sans limite	6
1.1.2 Des prémisses d'une prise de conscience à un arrêt de la chasse	8
1.1.3 La baleine bleue Antarctique : un triste bilan	9
1.2 De l'observation visuelle à l'observation par acoustique passive . . .	11
1.2.1 L'observation visuelle : une méthode limitée	11
1.2.2 Les cétacés : des animaux vocalement actifs	12
1.2.3 L'essor de l'acoustique passive	16
1.2.4 Apport de l'acoustique passive à l'étude des baleines bleues Antarctique	17
1.3 Le réseau OHASISBIO : des données inédites	18
1.3.1 Le réseau DEFLOHYDRO	20
1.3.2 Le réseau OHASISBIO	20
1.3.3 Bref aperçu des données	24
1.4 Données fournies par l'Australian Antarctic Division	24
1.5 Plan de la thèse	25

2	Détection automatique des Z-calls de baleine bleue Antarctique	31
2.1	Le <i>Z-detector</i>	32
2.1.1	Principe de détection : la projection en sous-espace vectoriel	32
2.1.2	Le <i>Z-detector</i> : en pratique	33
2.1.3	Comparaison avec un détecteur par corrélation de spectrogrammes	34
2.1.4	Autres avantages du Z-detector	36
2.1.5	Article paru dans <i>The Journal of the Acoustical Society of America</i>	37
2.2	L'estimation des performances de détection : un enjeu important . .	51
2.2.1	Introduction	51
2.2.2	Article en préparation pour soumission dans <i>The Journal of the Acoustical Society of America</i> en collaboration avec l'AWI	52
2.2.3	Conclusion de l'étude	68
2.3	Discussion	68
2.3.1	Le problème de la détection de parties du chorus	69
2.3.2	Limites du <i>Z-detector</i>	69
2.3.3	Limites de l'étude réalisée à l'AWI	71
2.3.4	Apports du meeting SORP	72
3	Répartition géographique et saisonnière des baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien austral	75
3.1	Article paru dans le journal <i>Plos One</i>	76
3.2	Observations complémentaires au sud du réseau OHASISBIO	97
3.2.1	Données et méthodes	97
3.2.2	Résultats	98
3.2.3	Discussion	99
3.3	Conclusion de l'étude, limites et perspectives	101
4	Variations fréquentielles des vocalisations de grandes baleines	109
5	Distribution géographique et saisonnière des baleines bleues pygmées et des rorquals communs dans l'océan Indien austral	125
5.1	Données et méthodes	126
5.2	Résultats	128
5.2.1	Distribution géographique	128
5.2.2	Patrons saisonniers	128
5.3	Discussion	129

6 Découverte de deux nouvelles vocalisations de baleine	135
Conclusion et perspectives	155
Bibliographie	165

Liste des publications et communications scientifiques

Publications scientifiques : (2 publiées + 1 soumise en premier auteur, 2 publiées en auteur secondaire)

Leroy, E.C., Royer, J.-Y., Bonnel, J., & Samaran F. (soumis - **2017**). Long-range impact of iceberg generated sounds on large-whale call-frequency. *Science*.

Leroy, E.C., Bonnel, J., Samaran F., & 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(3), 1413-1427.

Leroy, E.C., Bonnel, J., Samaran F., & 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.

Socheleau, F. X., **Leroy, E.**, Pecci, A. C., Samaran, F., Bonnel, J., & Royer, J.-Y. (**2015**). Automated detection of Antarctic blue whale calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(5), 3105-3117.

Tsang-Hin-Sun, E., Royer, J.-Y., & **Leroy, E.C.** (**2015**). Low-frequency sound level in the Southern Indian Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(6), 3439-3446.

Communications orales : (5 en premier auteur, 1 en auteur secondaire)

Leroy, E.C., Samaran, F., Bonnel, J., & Royer, J.-Y. (**Juin 2017**). Two new whale calls in the southern Indian Ocean, and their geographic and seasonal distribution over five sites and seven years. *Acoustics '17 Boston, in Boston, Massachusetts, USA*.

Leroy, E.C., Thomisch, K., & Van Opzeeland, I. (**Juin 2017**). Variability in ground-truth data sets and the performance of two automated detectors for Antarctic blue whale calls in different soundscape conditions. *Acoustics '17 Boston, in Boston, Massachusetts, USA*.

Leroy, E.C., Samaran, F., Bonnel, J., & Royer, J.-Y. (**Octobre 2016**). Distribution géographique et saisonnière des baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien austral. *Workshop Serenade, Brest*.

Leroy, E.C., Socheleau, F. X., Pecci, A. N. C., Samaran, F., Bonnel, J., & Royer, J.-Y. (**Juillet 2015**). Robust detection of Antarctic blue whale calls, and comparison with classical spectrogram correlation. In *DCLDE : 7th International Workshop on Detection, Classification, Localization, and Density Estimation, San Diego*.

Leroy, E.C., Socheleau, F. X., Pecci, A. N. C., Samaran, F., Bonnel, J., & Royer, J.-Y. (**Octobre 2015**). Détection automatique des vocalises de baleine bleue Antarctique : nouvelle méthode par sous-espace et comparaison avec une méthode classique de détection par corrélation de spectrogrammes. *JAAN (Journées Acoustique et Applications Navales), Paris*.

Samaran F., **Leroy E.C.**, Miller B., Double M. & Royer J.-Y. (**Décembre 2015**). Chatty Antarctic blue whales, tell me more about your calls. Poster, *21st Conference on Marine Mammals, San Francisco*.

Communications grand public :

Prix du meilleur poster, « Les baleines bleues Antarctique dans l’océan Indien austral : mais qu’est-ce qu’elles nous chantent ?! », (**Novembre 2016**). *Journées de l’Ecole Doctorale des Sciences de la Mer*

Participation à la Nuit Européenne des Chercheur.e.s, « Idée reçue : l’océan, monde du silence ?! », (**Septembre 2016**). *Océanopolis, Brest*.

Présentation grand public au Quai des Sciences, « A l’écoute des baleines dans l’océan Indien austral », (**Juillet 2016**). *Fêtes Maritimes de Brest*.

Campagnes océanographiques :

Campagne océanographique ObsAustral MD 201 - VT146/OHA-SIS-BIO 8 - du 04/01/2016 (Le Port, La Réunion) au 01/02/2016 (Le Port, La Réunion).

Campagne océanographique LOGIPEV MD 200 - VT141/OHA-SIS-BIO 7 - du 06/01/2015 (Le Port, La Réunion) au 10/02/2015 (Le Port, La Réunion).

Cette thèse a été financée par la **Région Bretagne** et l’**Université de Bretagne Occidentale (UBO)**

Introduction

La surveillance par acoustique passive, *Passive Acoustic Monitoring* (PAM) en anglais, permet l'étude du paysage acoustique sous-marin. Trois composantes contribuent à ce paysage : la géophonie, formée de sons naturels émis par des sources non-biologiques telles la météorologie (*e.g.* vent, pluie) ou les phénomènes géologiques (*e.g.* séismes, éruptions sous-marines) ; la biophonie, composée de sons émis par les êtres vivants de toutes tailles ; et l'anthropophonie, composée de sons produits par l'activité humaine (Krause, 2008). L'étude du paysage acoustique sous-marin est une discipline en plein essor ces dernières décennies, en raison de ses nombreuses applications. Elle permet par exemple d'analyser l'impact de l'Homme sur le paysage acoustique et son évolution au cours du temps. La géophonie permet de mieux caractériser l'activité sismique et volcanique des dorsales medio-océaniques, souvent de trop faible magnitude pour être détectée par les réseaux sismologiques terrestres, mais aussi d'étudier le bruit de la glace, ou les conditions météorologiques. Enfin, la biophonie fournit des informations sur la biologie des populations, des tout petits organismes benthiques, aux plus grands animaux de la planète : les baleines. Accéder à toutes ces informations ne requiert que le déploiement d'un (ou plusieurs) hydrophones, ce qui fait de la surveillance acoustique passive une méthode privilégiée. Ces instruments, fixes ou dérivants, permettent la surveillance d'une zone d'écoute sur le long-terme (plusieurs mois à plusieurs années). Cette méthode de suivi s'affranchit ainsi des conditions météorologiques, d'état de mer ou de luminosité, qui limitent des méthodes plus traditionnelles comme les observations visuelles ou satellitaires optiques. Elle est ainsi particulièrement adaptée à la surveillance de zones éloignées et difficiles d'accès, tels l'océan hauturier et les zones polaires, et, dans ce cadre, à l'étude des grands cétacés, en particulier des baleines bleues. Ces animaux, présents dans tous les océans du globe, sont en effet vocalement très actifs. Ils émettent des sons basse fréquence, de longue durée et de forte intensité qui se propagent sur de grandes distances (centaine(s) de kilomètres) ; leur contribution au paysage acoustique marin est donc majeure.

Dans les mers australes, la chasse commerciale intensive a bien failli faire taire définitivement le plus grand animal du monde, en décimant près de 99% de

la population initiale des baleines bleues Antarctique. L'effectif actuel de cette population, classée en danger d'extinction, reste très mal connu, ainsi que nombre d'informations relatives à l'écologie de l'espèce dont on ignore, par exemple, les aires précises de reproduction. Et pour cause, cette population, estimée à 2280 individus en 1998 (Branch et al., 2004, 2007) atteindrait aujourd'hui seulement 8600 individus, en se basant sur un taux de croissance de 7,3% par an (Branch et al., 2004). Observer moins de 10000 individus dans un espace océanique de 20 327 000 km² de superficie (en se limitant au sud du 60ème parallèle, région où la majorité de la population s'alimenterait durant l'été austral), et sur une période limitée en raison des conditions climatiques extrêmes qui prévalent à ces latitudes (*e.g.* 50èmes hurlants, glace) relève de la gageure. Une surveillance par acoustique passive prend alors ici tout son sens. Cette approche a déjà fait preuve de son efficacité et a permis d'acquérir de nombreux indices de présence des baleines bleues au large de l'Antarctique ainsi qu'à d'autres latitudes.

Suite à une première expérience hydroacoustique menée en 2007 (DEFLOHY-DRO), le Laboratoire Géosciences Océan de Brest a, depuis 2010, équipé l'océan Indien austral d'un réseau de plusieurs hydrophones (projet OHASISBIO), couvrant un large gradient latitudinal et longitudinal. Cette zone non seulement présente un intérêt particulier pour l'étude de l'activité des dorsales océaniques, mais s'est aussi révélée un habitat fréquenté par plusieurs (sous-)espèces de rorquals, et plus particulièrement par les baleines bleues Antarctique et pygmées (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b, 2013). Les données acquises par le réseau OHASISBIO offrent ainsi des informations inédites sur la distribution de ces espèces sur une aire géographique de près de 9 000 000 km² pendant une période continue de 7 ans.

Ce travail de thèse s'inscrit dans ce contexte général et s'intéressera principalement à la baleine bleue Antarctique en raison de son statut menacé. Il tentera de répondre à plusieurs problématiques :

1. Quelle est la répartition géographique et saisonnière de l'espèce dans la zone d'écoute ?
2. Cette répartition est-elle stable au cours du temps ?
3. Comment évolue le nombre de vocalisations au fil des années ? Ce nombre peut-il indiquer l'évolution de la taille de la population ?
4. Quelle est l'évolution de la signature vocale de l'espèce, dans le contexte de la diminution globale de la fréquence (*i.e.* hauteur) des vocalisations des grandes baleines ?

Pour aborder ces questions, ce travail se fondera sur l'analyse systématique des données acoustiques du réseau OHASISBIO, complétées par celles du réseau

DEFLOHYDRO. Une autre problématique abordée portera aussi sur les méthodes de traitement automatique de cet important volume de données (1 To).

Avant de développer les résultats, le chapitre 1 détaillera l'état des connaissances sur les baleines bleues, à partir des données de capture pendant la période de chasse, et des données acoustiques depuis son interdiction. Il décrira aussi les dispositifs d'écoute mis en place dans l'océan Indien austral pour aborder les questions posées, et dont les données seront analysées.

Le chapitre 2, méthodologique, présentera un algorithme de détection automatique que j'ai testé sur nos données pour en valider les performances. Ce travail a été publié en 2015 dans le journal de la société acoustique américaine - *JASA* (Socheleau et al., 2015). Un second volet s'intéressera aux méthodes de validation de ces algorithmes automatiques et montrera la difficulté de disposer d'un jeu de données "vérité" pour comparer différents algorithmes. Cette analyse est présentée sous la forme d'un autre article en cours de publication (Leroy et al., in prep.).

Le chapitre 3, à partir de la détection automatique des vocalisations des baleines bleues Antarctique sur l'ensemble des données disponibles, décrira la distribution géographique et saisonnière de ces baleines dans l'océan Indien austral. Ces résultats sont présentés dans un article publié dans le journal *Plos One* en 2016 (Leroy et al., 2016). Ces observations, fondées sur les données du réseau OHASISBIO, seront complétées par l'analyse de données acquises au large de l'Antarctique par des collègues australiens.

L'analyse de 7 ans d'écoute passive quasi-continue dans l'océan Indien austral a permis de vérifier et quantifier la décroissance annuelle de la fréquence (*i.e.* hauteur) d'émission des vocalisations de plusieurs espèces, sous-espèces et populations de grands rorquals. Cette analyse fait apparaître non seulement une diminution inter-annuelle de ces fréquences, mais aussi des variations de fréquence intra-annuelles. Ces observations et des tentatives d'explication seront présentées dans un article soumis en 2017 au journal *Science* (Leroy et al., 2017a, soumis), qui fait l'objet du chapitre 4.

Le réseau OHASISBIO enregistre également les signatures vocales de trois populations de baleines bleues pygmées, ainsi que de rorquals communs. L'analyse préliminaire de la présence de ces vocalisations aux différents sites du réseau permet d'avoir un premier aperçu de la distribution géographique et saisonnière de ces (sous-)espèces et populations dans l'océan Indien austral. Ces résultats sont présentés dans le chapitre 5.

L'analyse systématique de nos données a aussi révélé la présence de nouvelles vocalisations, proches de celles des baleines bleues Antarctique, mais jusqu'alors

inconnues ou imparfaitement décrites. Leur description, dans un article paru en 2017 au *JASA* (Leroy et al., 2017b), fera l'objet du chapitre 6.

La conclusion tentera enfin de résumer les principaux enseignements de cette thèse et de proposer quelques perspectives ouvertes par ce travail.

Chapitre 1

La baleine bleue Antarctique, de l'exploitation à la protection

La baleine bleue (*Balaenoptera musculus*) est une espèce emblématique pouvant dépasser les 30 mètres de long et peser plus de 150 tonnes. Présente dans tous les océans du globe, elle a été intensivement chassée dans l'hémisphère sud au XX^{ème} siècle, où la sous-espèce dite "Antarctique", *B. m. intermedia*, a été menée au bord de l'extinction en moins de 60 ans. L'espèce est actuellement considérée en danger critique d'extinction, mais les connaissances sur ce qui est pourtant le plus grand animal ayant jamais vécu sur Terre sont extrêmement limitées. Etat des populations, routes de migration ou encore aires de reproduction sont, aujourd'hui encore, mal connus. L'effectif restreint de la population, l'éloignement et l'étendue de son aire de distribution, ainsi que les rudes conditions climatiques qui y règnent compliquent considérablement l'acquisition de connaissances sur l'espèce. Ces dernières décennies, l'acoustique passive s'est révélée être une méthode privilégiée pour l'étude des paysages acoustiques sous-marins, notamment dans les zones difficiles d'accès, car elle offre la possibilité de surveiller une zone d'écoute sur le long-terme grâce au déploiement d'une ou plusieurs stations fixes d'enregistrement. Elle est donc particulièrement adaptée à l'étude des rorquals, acoustiquement très actifs. Selon les schémas classiques de migration, la majorité de la population de baleines bleues s'alimente en Antarctique durant l'été austral, profitant de la forte productivité primaire de la zone. A la fin de la saison d'alimentation, les baleines remontent hiverner et se reproduire dans les eaux plus chaudes des basses latitudes. Cependant, bien que leur présence physique et acoustique soit plutôt bien documentée sur les zones d'alimentation grâce aux données de chasse puis ensuite par la surveillance acoustique de ces zones, la répartition de l'espèce durant l'hiver austral est assez mal connue. Quelques observations visuelles et de précédentes études en acoustique passive réalisées sur de petites échelles spatio-temporelles désignent néanmoins

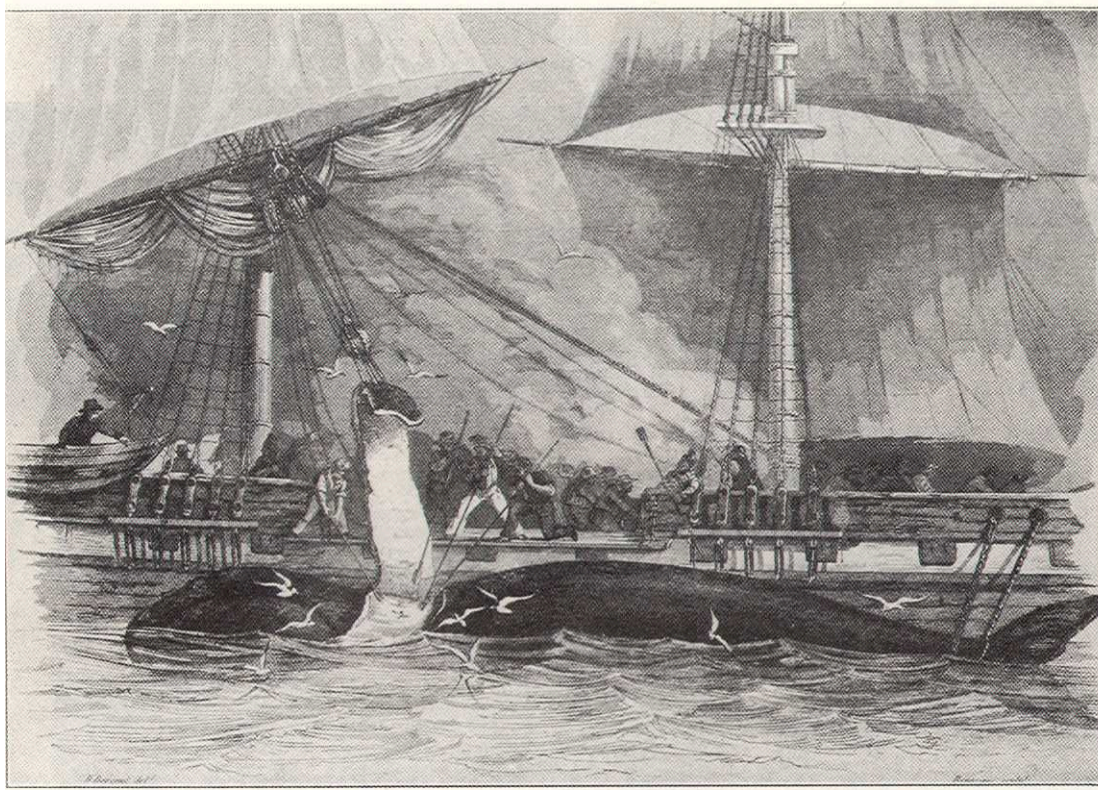
l'océan Indien austral comme étant une zone probablement importante pour l'espèce en période de migration et d'hivernage. Les données acoustiques traitées au cours de ce travail de thèse ont été enregistrées par un réseau d'hydrophones déployé depuis 2010 sur un large gradient latitudinal et longitudinal dans le secteur ouest de l'océan Indien austral. L'analyse de ces données dans le cadre de ces travaux de doctorat vise à compléter les connaissances sur la répartition des baleines bleues Antarctique dans cette zone subantarctique et subtropicale de l'océan Indien. Ce chapitre dresse un rapide historique de la chasse baleinière et décrit l'état des connaissances acquises sur l'espèce depuis l'arrêt de la chasse, notamment par le biais de la surveillance par acoustique passive. Il décrit enfin les données traitées au cours de ces travaux.

1.1 La baleine bleue, une espèce en danger d'extinction

1.1.1 La chasse baleinière : d'une chasse de subsistance à une exploitation commerciale sans limite

D'abord cibles d'une chasse de subsistance depuis la préhistoire, les baleines sont ensuite exploitées pour leur viande et leur huile. A partir du IX^{ème} siècle, cette exploitation s'intensifie ; les Basques chassent alors la baleine franche de Biscaye *Eubalaena glacialis*, qui nage lentement et dont la carcasse flotte (Robineau, 2007). L'huile extraite de la graisse de baleine sert à l'éclairage et aux besoins de l'industrie. Puis la chasse commerciale s'intensifie encore au XVIII^{ème} siècle, pratiquée par de nombreux pays : Grande Bretagne, Hollande, Amérique du Nord, et Norvège. Elle reste néanmoins limitée à l'Atlantique Nord. A partir du XIX^{ème} siècle, elle s'étend aux autres océans, mais aussi aux autres espèces, la baleine franche étant devenue trop rare. Celle-ci perd alors son statut de cible privilégiée au détriment du cachalot (*Physeter macrocephalus*), dont l'huile est jugée de meilleure qualité pour l'éclairage que l'huile de baleine à fanons (Figure 1.1). Au milieu du XIX^{ème} siècle, la raréfaction des cachalots et la découverte du pétrole entraînent un déclin de la chasse. Mais à partir de 1868, de nouvelles technologies voient le jour et relancent l'économie de la chasse baleinière. Les canons lance-harpons permettent notamment de s'attaquer aux rorquals, jusque-là épargnés car trop rapides et trop difficiles à capturer. Le harpon possède une tête remplie de poudre, qui explose dans le corps de l'animal. Reliée au bateau par une ligne solide, la carcasse peut alors être maintenue en surface et récupérée, tandis qu'autrefois elle aurait coulé, empêchant son exploitation. Ces innovations, le capitaine Achab en conviendrait

lui-même, déséquilibrent largement le rapport de forces en faveur des baleiniers. On entre alors dans l'ère de la chasse "moderne". Le lecteur trouvera un historique plus complet de la chasse à la baleine dans l'ouvrage de Robineau (2007).



[78] "CUTTING IN" A WHALE.

From an engraving by Rouarque (about 1850) in the Peabody Museum, Salem.

FIGURE 1.1 – Dépeçage en mer d'une baleine capturée : «Cutting in a whale» (gravure de Rouarque, circa 1850, Peabody Museum, Salem)

En 1892, les premières expéditions visant à évaluer les ressources baleinières en Antarctique sont lancées : l'une est anglaise, commanditée par la *Royal Geographical Society*, dont les quatre bateaux ont la mer de Weddell pour destination finale. L'autre est norvégienne, commanditée par Christensen et Foyn, qui arment le navire baleinier *Jason*. Vers 1904-1905, les Norvégiens organisent l'exploitation de ces ressources dans les mers australes, avec l'établissement d'une station baleinière en Géorgie du Sud (Figure 1.2). Les stations baleinières et les navires usines se développent alors, mais la chasse est toujours restreinte aux zones côtières. Les baleines à bosse (*Megaptera novaeangliae*) en sont les principales victimes. En 1925, un navire-usine est doté pour la première fois d'un plan incliné qui permet de hisser la baleine sur le pont. La chasse au large de l'Antarctique, cantonnée au secteur Atlantique dont les îles sont propices à l'installation de stations baleinières

et pour abriter et ravitailler les navires-usines, devient alors pélagique et s'étend aux secteurs pacifique et indien de l'océan Austral. De 1928 à 1930, cette flotte pélagique connaît un fort développement.



FIGURE 1.2 – Carcasse de baleine bleue devant la station baleinière de Grytviken en Géorgie du Sud, 1917 (Frank Hurley, Scott Polar Research Inst., Univ. of Cambridge, Getty Images).

1.1.2 Des prémisses d'une prise de conscience à un arrêt de la chasse

Dès 1913, des voix s'élèvent de par le monde pour dénoncer la barbarie de l'exploitation des rorquals. Elles parlent de «véritable massacre», de «gaspillage sans nom» (Robineau, 2007), et demandent une protection efficace des juvéniles, et l'exploitation de toutes les parties des individus capturés, puisque jusqu'alors, seule la couche de graisse superficielle était exploitée (Figure 1.1). Une première convention est conclue à Genève en 1931 dans le but de protéger les stocks de baleines. Elle exige notamment que les captures soient précisément répertoriées et communiquées à un «Bureau international des statistiques baleinières». En 1937, sept pays (Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Australie, Grande-Bretagne, Irlande et Norvège) participent à la convention de Londres, mais les décisions prises sont décevantes. Elles permettent la chasse d'individus immatures, et la limitation de la durée de la période de chasse et du nombre de navires chasseurs rencontre de

fortes oppositions. Elle se solde donc par un échec mis en évidence par un nombre record de captures durant la saison 1937-1938. La proportion de baleines bleues capturées est en diminution considérable, premier signe de l'épuisement des stocks. Cette diminution se confirme largement lors de la saison de chasse suivante. Les conférences suivantes, de 1938 et 1939, n'offrent guère plus de résultats positifs pour les grands cétacés. Seule la Seconde Guerre Mondiale leur apporte un peu de répit. De 1944 à 1946, d'autres conférences sont réalisées et décident notamment de la mise en place de quotas de captures, bien insuffisants. Cependant, la conférence de 1946 aboutit à la décision de créer la Commission Baleinière Internationale (CBI) ou *International Whaling Commission*, (*IWC*), qui doit encore attendre 1949 pour voir le jour. Des mesures générales sont prises, incapables ici encore d'éviter la surexploitation, bien que tous les pays participants s'accordent sur l'effondrement des stocks. En 1959, face à l'effondrement du nombre de prises, ciblant majoritairement les rentables baleines bleues, la CBI nomme un comité de spécialistes pour analyser la situation. Les résultats, publiés en 1963, sont sans appel : il ne reste pas plus d'un vingtième de la population d'origine de baleines bleues, et un dixième de celle de rorquals communs (*Balaenoptera physalus*). Le comité conclut à un risque d'extinction de la baleine bleue Antarctique (Chapman, 1964). Les quotas sont drastiquement abaissés entre 1962 et 1969, et la baleine bleue Antarctique est totalement protégée en 1964 avec extension à la sous-espèce pygmée en 1967. Cependant les Soviétiques pratiquent de leur côté une fraude à grande échelle et continuent de chasser illégalement les baleines bleues jusqu'en 1973 (Zemsky et al., 1995; Branch & Mikhalev, 2008). En 1972, face à la pression de l'opinion publique, un nouveau système de gestion est mis en place, permettant de protéger les stocks les plus menacés, avec une gestion séparée, et non plus globale, de ceux-ci. Face à la difficulté d'obtenir un consensus sur l'état des différents stocks et l'exploitation qu'ils peuvent encore supporter, la CBI décide en 1982 de suspendre la chasse commerciale. Ce moratoire prend effet en 1986.

1.1.3 La baleine bleue Antarctique : un triste bilan

Menée au bord de l'extinction par cette chasse intensive, l'état actuel de la population de baleines bleues Antarctique est extrêmement difficile à évaluer. On notera de plus que la découverte de la sous-espèce pygmée ne date que de 1961 (Ichihara, 1966). Ichihara (1966) propose de classer les baleines bleues pygmées comme étant une sous-espèce de la baleine bleue et la nomme *Balaenoptera musculus brevicauda*. Il localise sa répartition au nord de 54° S. Avant cette découverte, les deux sous-espèces "Antarctique" et "pygmée" n'étaient donc pas distinguées lors des

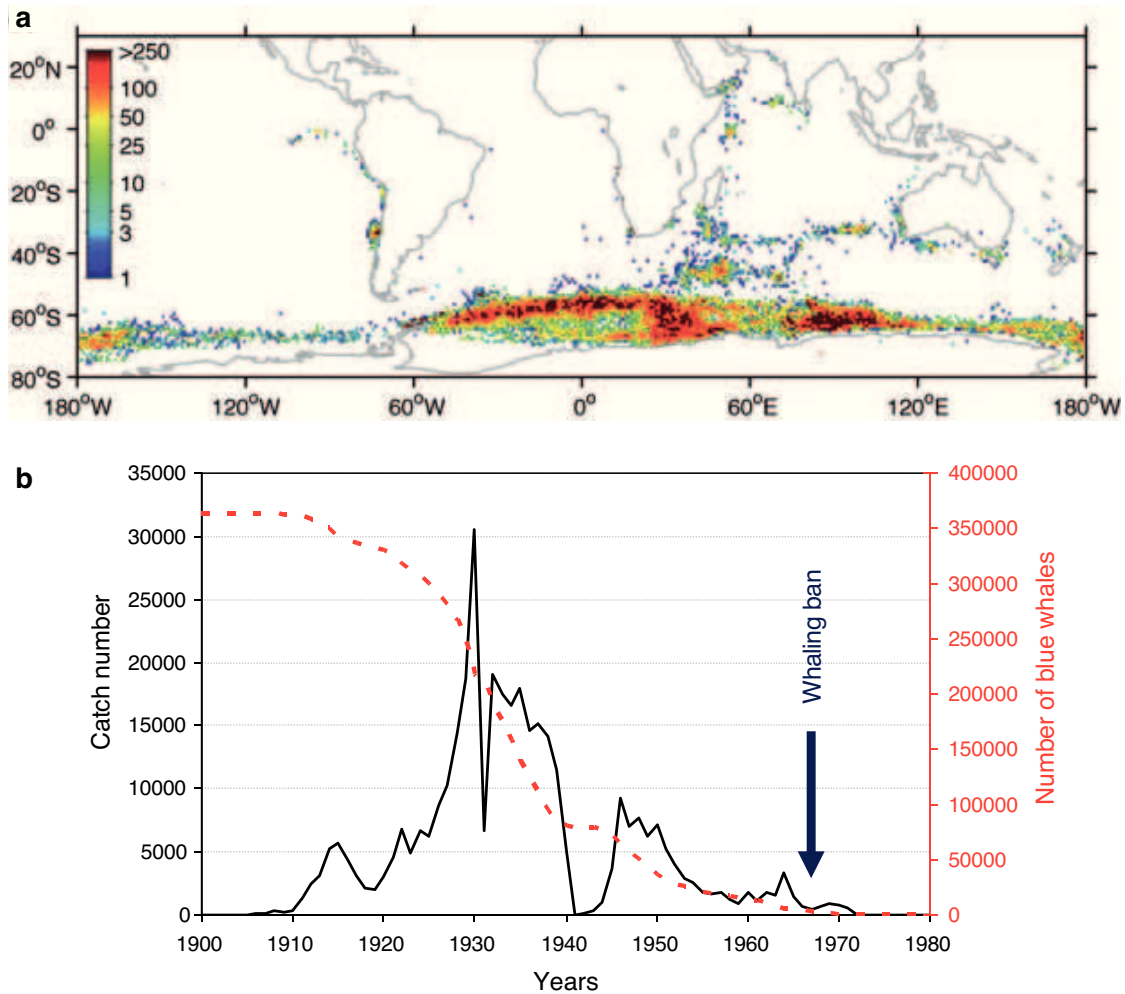


FIGURE 1.3 – a) Captures de baleines bleues d'après la base de données de la CBI, et regroupées par carrés d'1°x 1°. Les captures des stations terrestres sont généralement attribuées au même carré (d'après Branch et al., 2007) ; b) Bilan des captures et effectifs de baleines bleues dans l'hémisphère sud (d'après les données de la CBI).

captures. À cette époque, en raison de la diminution des stocks de baleines bleues à proximité de l'Antarctique, les navires baleiniers quittent les hautes latitudes pour exploiter les eaux subantarctiques. Les baleines bleues pygmées n'auraient ainsi été chassées qu'à partir de 1959, et leur population aurait par conséquent été moins sévèrement impactée par la chasse (Branch & Mikhalev, 2008). Cependant, il y a peu d'informations disponibles sur l'état des populations de pygmées (Clapham et al., 1999). A partir des données de captures déclarées (Figure 1.3), Branch et al. (2004) estiment la population de baleines bleues Antarctique à 239 000 individus avant la chasse (IC à 95% : 202 000 - 311 000). Après moins de 60 années de chasse commerciale (1905-1964), cet effectif aurait été réduit à 360 individus (IC à 95% :

150 - 840), c'est-à-dire à 0.15% (0.07%-0.29%) de la population initiale (Branch et al., 2004). Afin d'évaluer leur abondance effective dans l'océan Austral, la CBI organise, vers la fin des années 70, des campagnes d'observations visuelles autour de l'Antarctique, dans le cadre de l'*International Decade of Cetacean Research* (IDCR) et du programme *Southern Ocean Whale and Ecosystem Research* (SOWER). Ces campagnes seront menées au sud du 60ème parallèle sur plusieurs étés australs à partir de 1978/79 (*i.e.* de décembre 1978 à février 1979) afin de réaliser un tour complet de l'Antarctique. Au total, trois campagnes seront réalisées : de 1978/79 à 1983/84, de 1985/86 à 1990/91 et de 1991/92 à 2003/04 (Branch et al., 2004, 2007). Deux campagnes japonaises d'observation visuelle s'ajoutent aux programmes IDCR/SOWER : le *Japanese Scouting Vessels* (JSV) (de 1965/66 à 1988/89), et le *Japanese Whale Research Program Under Special Permit in the Antarctic* (JARPA) (de 1989 /90 à 2005/2006). Ces deux campagnes sont également effectuées au sud de 60° S, mais sur des zones limitées en longitude. L'analyse statistique des données obtenues au cours de ces campagnes a permis de conclure à un accroissement de population de 8.2% par an (IC à 95% : 1.6 - 14.8%) (Branch & Butterworth, 2001; Branch et al., 2004, 2007). Malgré cette augmentation, l'effectif actuel serait toujours inférieur à 3% des effectifs d'avant la chasse. Pour cette raison, la baleine bleue Antarctique est classée comme étant "en danger critique" par L'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN, en anglais *IUCN*) (Reilly et al., 2008).

1.2 De l'observation visuelle à l'observation par acoustique passive

1.2.1 L'observation visuelle : une méthode limitée

Malgré l'effort d'observation déployé durant les campagnes IDCR/SOWER, le nombre d'individus observés s'est révélé extrêmement faible (*e.g.* Branch & Butterworth, 2001; Branch et al., 2004), et de fait largement insuffisant pour estimer la répartition et les mouvements des populations. Les méthodes d'observation visuelle, traditionnellement utilisées, ont des limites majeures : la rareté de l'espèce, l'étendue de son aire de répartition, et les conditions climatiques des hautes latitudes, accessibles uniquement durant l'été austral. En fait, les connaissances sur la répartition des populations durant l'été austral sont les plus fournies et proviennent notamment des données de capture. On sait ainsi que la majorité de la population de baleines bleues Antarctique s'alimente aux hautes latitudes durant l'été, période pendant laquelle la zone est riche en euphausiacées et en particulier en

krill Antarctique (*Euphausia superba*) (*e.g.* Mackintosh et al., 1929; Nemoto, 1970; Kawamura, 1980; Wiedenmann et al., 2011). La population remonterait ensuite vers les eaux subtropicales voire tropicales pour hiverner et se reproduire, selon les schémas traditionnels de migration (Mackintosh, 1966). Quant aux baleines bleues pygmées, elles s'alimenteraient en zone subantarctique, et remonteraient vers les eaux tropicales pour hiverner (Ichihara, 1966; Ichihara et al., 1981; Kato et al., 1995). Cependant, la localisation des routes de migration et aires d'hivernage et de reproduction est encore mal connue (Mackintosh, 1966; Mizroch et al., 1984; Branch et al., 2007; Samaran et al., 2013). L'observation visuelle n'étant pas efficace pour combler ce manque d'information, les chercheurs mettront alors à profit l'activité vocale intense des grandes baleines pour les étudier.

1.2.2 Les cétacés : des animaux vocalement actifs

Sous l'eau, la lumière pénètre seulement sur une dizaine de mètres, réduisant rapidement la visibilité. Le son en revanche se propage cinq fois plus rapidement que dans l'air et avec une faible atténuation, faisant de la communication vocale le moyen le plus adapté pour la transmission d'informations. Au cours leur évolution, la morphologie, l'anatomie fonctionnelle et la physiologie des cétacés s'est adaptée à l'utilisation du son (Tyack & Miller, 2002). Celui-ci sert à la fois pour la navigation et la recherche de proies par le biais de l'écholocation qui caractérise les odontocètes, avec l'émission de sons de très hautes fréquences (20 à 150 kHz), mais également pour la communication sociale (*e.g.* maintien de la cohésion sociale, comportement reproducteur) (Tyack & Clark, 2000; Tyack, 2000), que l'on retrouve chez les odontocètes (clics et sifflements de 1 à 20 kHz) et chez les mysticètes (utilisations des plus basses fréquences, de 12 Hz à 8 kHz). De manière générale, les plus petits cétacés émettent des sons hautes fréquences, tandis que plus l'espèce est grande, plus la fréquence d'émission est basse (Figure 1.4). Chaque espèce a son propre répertoire vocal (Au & Hastings, 2008), dont la fréquence, la complexité et la variabilité dépend en particulier du système social au sein duquel elle vit. En effet, les réseaux de communication acoustique des cétacés sont probablement les plus larges au monde, grâce aux propriétés acoustiques de l'océan (Payne & Webb, 1971). Ces propriétés confèrent une large audience au signal émis, et entraînent un partage de l'espace sonore entre plusieurs espèces, mais aussi entre plusieurs groupes d'une même espèce, menant ainsi à une possible compétition intra-spécifique pour la ressource. De fait, les espèces vivant en groupes stables, telles que les cachalots (Rendell & Whitehead, 2003, 2005) ou les orques (*Orcinus orca*) (Deecke et al., 2000; Miller & Bain, 2000) possèdent des répertoires vocaux distincts entre groupes.

Dans les systèmes sociaux de type “fission-fusion”, comme chez le grand dauphin (*Tursiops truncatus*), la composition des groupes varie beaucoup et chaque individu a sa propre signature vocale (Janik, 2005; Janik et al., 2006). Les baleines bleues vivent quant à elles en système social fluide, instable et extrêmement dispersé, car elles sont nomades et non-territoriales. Sears (2009) rapporte qu’elles sont souvent solitaires ou par paires, voire en petits groupes instables d’individus. Et bien que, lors des périodes d’alimentation, elles puissent s’agréger en groupes comptant jusqu’à 50 individus autour des zones de forte concentration en krill, ces groupes compacts ne sont pas stables et ne traduisent pas de comportement de coopération pour l’alimentation (Sears, 2009). Ce système social nécessite alors de communiquer sur de très grandes distances. C’est pourquoi les baleines bleues émettraient des signaux de très forte intensité (*e.g.* 185 dB/Hz re :1 μ Pa à 1 m (Thode et al., 2000), 186 dB re :1 μ Pa à 1 m entre 10 et 110 Hz (McDonald et al., 2001), 189 dB re :1 μ Pa à 1 m entre 25 et 29 Hz (Širović et al., 2007), et 179 dB re :1 μ Pa à 1 m entre 17 et 30 Hz (Samaran et al., 2010c)) à de très basses fréquences (< 100 Hz). Ces signaux se propagent sur plusieurs centaines de kilomètres (*e.g.* Cummings & Thompson, 1971; Payne & Webb, 1971; Širović et al., 2007; Samaran et al., 2010c), faisant du réseau de communication des baleines bleues le plus large existant dans le règne animal (Di Iorio, 2009). Le répertoire vocal des baleines bleues se compose de signaux dits stéréotypés, car constitués d’une ou plusieurs unités tonales de durée relativement longue (≈ 10 s), répétées à l’identique à intervalle régulier pendant plusieurs heures. Ces signaux seraient émis uniquement par les individus mâles (McDonald et al., 2001; Oleson et al., 2007b,a) et seraient associés au comportement de reproduction (Watkins et al., 2000a; Oleson et al., 2007a,b), comme c’est le cas chez la baleine à bosse (Winn & Winn, 1978) et le rorqual commun (Croll et al., 2002). Ces signaux stéréotypés diffèrent selon les sous-espèces et populations. McDonald et al. (2006) en recensent 9 différents, auxquels s’ajoutent au moins 3 signatures vocales décrites depuis (Pangerc, 2010; Cerchio et al., 2010; Frank & Ferris, 2011) et attribuées avec certitude à des baleines bleues, et une autre suspectée d’être émise par des baleines bleues (Sousa & Harris, 2015).

La baleine bleue Antarctique, à laquelle cette thèse s’intéresse, émet un signal que l’on nomme “cri en Z” ou “*Z-call*” en raison de sa forme en “Z” dans le plan temps-fréquence (Figure 1.5). Par commodité, on utilisera l’anglicisme “*Z-call*” tout au long de ce manuscrit par souci de cohérence avec la littérature, majoritairement anglophone, ainsi qu’avec les articles présentés dans cette thèse. Ce signal a été décrit pour la première fois par Ljungblad et al. (1998). Il est composé d’une première unité tonale, l’unité A, d’une durée de 8 à 12 s et d’une fréquence alors située autour de 28-29 Hz, suivi d’une chute en fréquence (ou *downsweep*) de 28

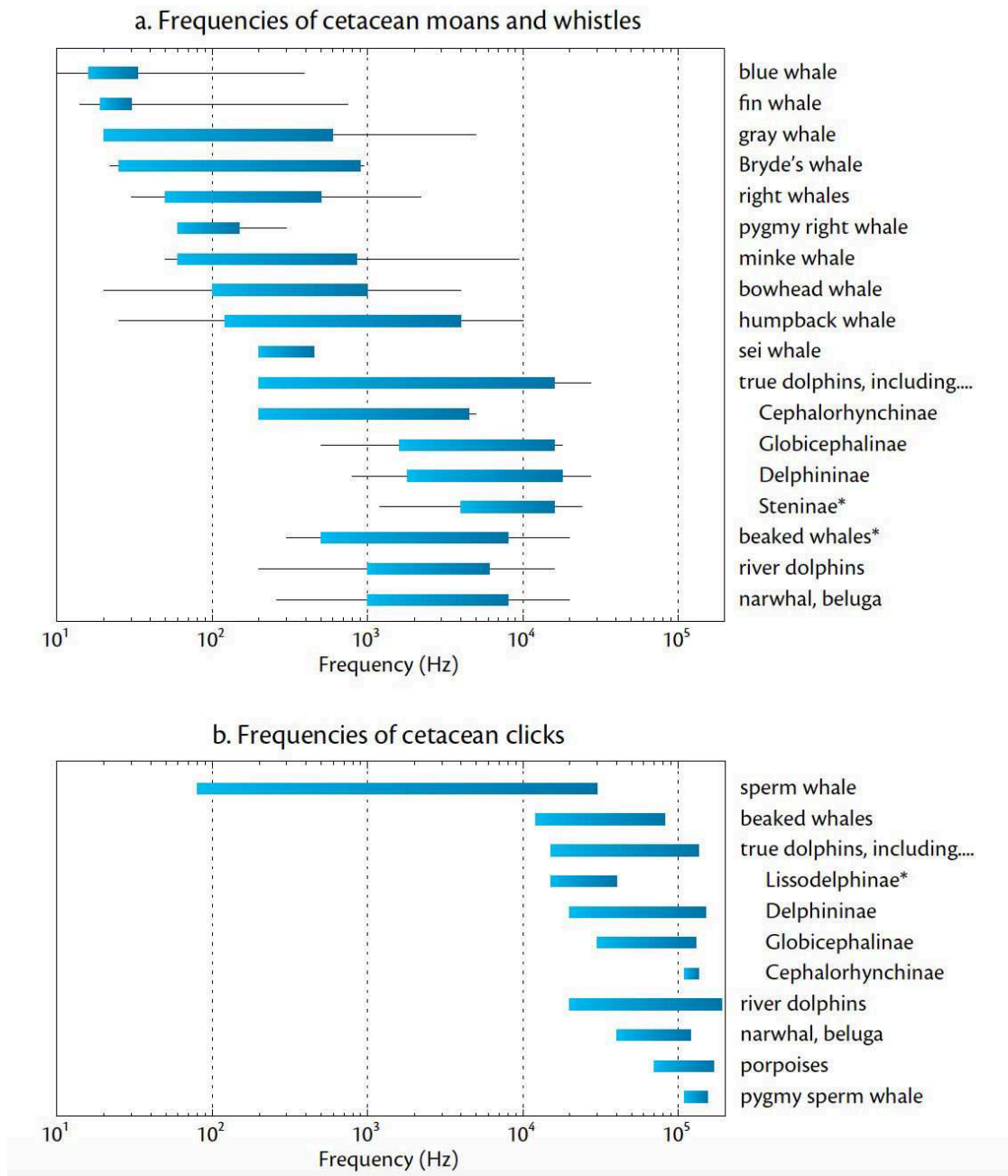


FIGURE 1.4 – Gammes de fréquences utilisées par les différentes espèces de cétacés. Les mysticètes sont listés par espèce, tandis que les odontocètes sont regroupés par famille. a) Sons tonaux (“grondements” et sifflements) émis par les mysticètes et odontocètes. b) Clics d’écholocation produits uniquement par les odontocètes. Figure de Mellinger et al. (2007).

à 20 Hz pendant 1 à 2 s, et enfin d’une seconde unité tonale d’une dizaine de secondes, l’unité B, légèrement modulée en fréquence, de 20 à 18 Hz (Ljungblad et al., 1998; Stafford et al., 2004; Rankin et al., 2005). Il a également été reporté que parfois les Z-calls apparaissent incomplets, avec seule l’unité A suivie ou non

du downsweep (*e.g.* Rankin et al., 2005). L'unité A étant l'unité la plus énergétique du Z-call, il est courant que sur les cris de plus faible Rapport Signal à Bruit (RSB), le *downsweep* et l'unité B soient perdus par propagation. Les Z-calls sont répétés avec un Intervalle Inter-Cris (ICI, intervalle de temps entre le début d'un cri et le début du cri suivant) régulier de 40 à 70 s (*e.g.* Ljungblad et al., 1998; Stafford et al., 2004; Širović et al., 2004). Ces séries de cris peuvent durer plusieurs minutes. Stafford et al. (2004) et Samaran (2008) ont respectivement compté de 4 à 16 et de 1 à 22 Z-calls par série. Elles sont séparées par un intervalle plus long et plus variable, l'Intervalle Inter-Séries (ISI), associé au retour de l'animal à la surface pour respirer (Cummings & Thompson, 1971; Širović et al., 2004). La puissance des Z-calls à la source a été estimée à 189 dB re :1 μ Pa à 1 m entre 25 et 29 Hz par Širović et al. (2007) et 179 dB re :1 μ Pa à 1 m entre 17 et 30 Hz par Samaran et al. (2010c). Plus récemment, Meillour (2016) a estimé cette puissance à la source à 183 dB re :1 μ Pa à 1 m dans une bande de fréquence de 25 à 29 Hz. La structure de ces vocalisations en Z, depuis leur caractérisation (Ljungblad et al., 1998) et leur inventaire (McDonald et al., 2006), n'a pas évolué. Toutefois, comme sur d'autres vocalisations, mais plus particulièrement pour le Z-call, on observe une diminution progressive de la fréquence (*i.e.* hauteur) de la vocalisation (McDonald et al., 2009; Gavrilov et al., 2011, 2012; Miller et al., 2014), pour laquelle il n'existe à ce jour pas d'explication certaine.

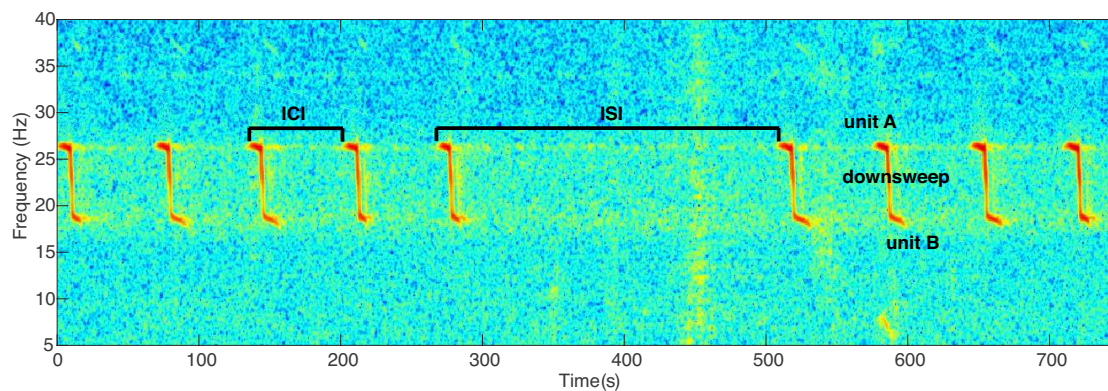


FIGURE 1.5 – Série de vocalisations stéréotypées (Z-calls) de baleine bleue Antarctique. ICI : Intervalle Inter-Cris ; ISI : Intervalle Inter-Séries.

En plus de ces signaux stéréotypés, les baleines bleues émettent des signaux de plus courte durée (entre 2 et 5 s), de forme et de fréquences très variables. Ces vocalisations, connues dans la littérature sous le nom de “D-calls” ou “FM-calls”, sont émises par les deux sexes (Oleson et al., 2007b) et seraient associées au contact entre individus et à la cohésion des groupes sur les zones d'alimentation (Thode et al., 2000; McDonald et al., 2001; Rankin et al., 2005; Oleson et al., 2007a,b;

Van Opzeeland, 2010). On suppose qu'elles sont communes à toutes les populations de baleines bleues.

1.2.3 L'essor de l'acoustique passive

Les vocalisations des cétacés permettent ainsi d'identifier relativement aisément l'espèce source, à condition bien sûr que le lien espèce-vocalisation ait été préalablement établi par des observations visuelles et acoustiques conjointes. Ainsi, à partir d'enregistrements de l'environnement sonore sous-marin, il devient possible d'identifier les espèces qui fréquentent une zone d'écoute. S'agissant d'une écoute passive, cette méthode d'observation est non-invasive. Un autre avantage de cette méthode est qu'elle est indépendante des conditions météorologiques ou de luminosité; elle permet ainsi d'acquérir des informations à toute période de l'année, notamment lors des saisons défavorables aux observations visuelles. Il suffit alors de déployer une station d'écoute fixe, dans la colonne d'eau ou sur le plancher océanique, pendant plusieurs mois ou même années, pour acquérir des enregistrements longue durée, continus ou intermittents (quelques minutes par heure par exemple). En général, les données sont stockées dans la mémoire interne de l'appareil enregistreur et sont récupérées avec l'instrument. Elles peuvent aussi être transmises en temps réel à terre par câble sous-marin, par radio, ou par satellite (Mellinger et al., 2007). L'acoustique passive s'avère une des méthodes, voire la méthode, la plus efficace pour étudier les cétacés (McDonald & Moore, 2002; Širović et al., 2004; Barlow & Taylor, 2005; Rankin & Barlow, 2007), et en particulier les grandes baleines dont les vocalisations puissantes et basse fréquence peuvent se propager sur de grandes distances et donc être détectées à grande distance.

La mise en œuvre d'algorithmes de traitement automatique permet de détecter et identifier les vocalisations présentes dans les données acoustiques, qui représentent bien souvent des volumes importants. Ces méthodes de reconnaissance sont diverses (*e.g.* filtrage adapté (Stafford et al., 1998), corrélation de spectrogrammes (Mellinger & Clark, 2000; Širović, 2016; Thomisch et al., 2016), réseaux de neurones (Potter et al., 1994), ou encore décomposition en ondelettes (Lopatka et al., 2005)) et dépendent en général du type de vocalisation à détecter. Les vocalisations de baleines bleues, très stéréotypées, sont particulièrement propices pour ces méthodes de détection automatique. On peut alors définir différentes métriques comme la présence/absence de cris par jour, ou le nombre de détections par unité de temps (*e.g.* jour, mois, année) et en déduire les zones et périodes de présence des espèces (*e.g.* Watkins et al., 2000a; Stafford et al., 2004; Mellinger et al., 2007; Širović

et al., 2004; Risch et al., 2013; Sciacca et al., 2015). Au-delà, on peut tenter de relier ces métriques au cours du temps à d'autres variables environnementales (*e.g.* température de surface, concentration en chlorophylle, bruit ambiant) pour comprendre les facteurs influants (Lesage et al., 1999; Stafford et al., 2009; Di Iorio & Clark, 2010; Širović & Hildebrand, 2011; Melcon et al., 2012). Il est, en revanche, encore impossible d'établir un lien solide entre nombre de cris et nombre d'individus, afin par exemple d'estimer des densités de population (Mellinger et al., 2007).

1.2.4 Apport de l'acoustique passive à l'étude des baleines bleues Antarctique

Au cours de ces deux dernières décennies, des hydrophones ont été déployés dans plusieurs secteurs de l'hémisphère sud, des eaux subtropicales à antarctiques. La signature vocale de la baleine bleue Antarctique a été détectée par ces stations d'écoute, à différentes périodes de l'année. Le pourtour de l'Antarctique est actuellement la région la plus instrumentée et la mieux étudiée ; la baleine bleue y est détectée majoritairement pendant l'été austral (Širović et al., 2004; Širović, 2006; Širović et al., 2009; Thomisch et al., 2016), confirmant que les aires d'alimentation, antérieurement zones privilégiées de chasse, sont toujours fréquentées par l'espèce. Cependant, ces études rapportent aussi la présence de vocalisations durant l'hiver austral, période durant laquelle l'espèce est supposée hiverner à de plus basses latitudes, selon les schémas traditionnels de migration (*e.g.* Mackintosh, 1966). Les auteurs suggèrent alors que certains individus n'effectueraient pas tous les ans la migration. Inversement, dans les eaux subantarctiques, des Z-calls ont été détectés toute l'année, avec une plus forte occurrence de la fin de l'automne au printemps, et des pics de détections en hiver (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b, 2013). Cette présence annuelle conforte l'idée d'une migration non systématique, et remet ainsi en cause le schéma couramment admis. Les baleines bleues Antarctique ont également été enregistrées au large de l'Australie (McCauley et al., 2000; Stafford et al., 2004; Gedamke et al., 2007; Tripovich et al., 2015) et de la Nouvelle-Zélande (McDonald, 2006) avec une saisonnalité similaire. Enfin, des Z-calls ont été détectés de manière plus ponctuelle pendant les mois d'hiver austral à plus basse latitude, dans l'est de l'océan Pacifique tropical (Stafford et al., 1999, 2004) et dans l'océan Indien, au large de l'île de Diego Garcia (Stafford et al., 2004). Ces observations confirment en partie le paradigme de migration entre hautes et basses latitudes, mais indiquent que celle-ci n'est pas systématique. En résumé, les enregistrements acoustiques témoignent d'une fréquentation intensive des hautes latitudes pendant la saison d'alimentation, et donnent quelques indices de présence de l'espèce aux

basses latitudes pendant l'hiver. Toutefois, la localisation des zones d'hivernage et de reproduction reste incertaine.

Deux études montrent l'importance du secteur austral de l'océan Indien pour les baleines bleues (Samaran et al., 2010b, 2013). La première, à partir de données acoustiques enregistrées en 2003-2004 au large de l'archipel de Crozet, a révélé l'importance de cette zone pour les baleines bleues Antarctique et pygmées (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b). La seconde, à partir de données enregistrées en 2007 à trois autres sites répartis dans le secteur ouest de l'océan Indien austral, confirme et élargit ces observations (Samaran et al., 2013). Ces travaux mettent en évidence une forte occurrence de vocalisations de baleines bleues Antarctique durant l'hiver austral, indice d'une zone d'hivernage pour l'espèce, ainsi que la présence de vocalisations de trois populations de baleines bleues pygmées durant l'été et l'automne, indiquant cette fois une possible aire d'alimentation. Ces observations sont cohérentes avec les données de capture durant la chasse industrielle et avec les observations visuelles réalisées ensuite dans le cadre de la CBI (Ichihara, 1966; Zemsky & Sazhinov, 1982; Branch et al., 2007). La zone semble donc être un habitat d'une importance particulière pour ces grandes baleines.

Les données analysées par Samaran et al. (2013) proviennent du réseau d'hydrophones déployé dans le cadre de l'expérience hydro-acoustique DEFLOHYDRO (*observation de la DEFormation de la Lithosphère Océanique à l'aide d'HYDROphones*) (Royer et al., 2015). Suite à cette expérience, un second réseau d'hydrophones comportant un plus grand nombre de sites est déployé depuis 2010 dans le même secteur. Ce réseau, nommé OHASISBIO (*Observatoire Hydro-Acoustique de la SISmicité et de la BIODiversité*) a permis l'acquisition d'un ensemble de données multi-sites et pluri-annuelles. Ces données vont permettre de compléter et préciser les observations précédentes (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b, 2013), de les étendre à une aire d'écoute plus large et sur une durée plus longue. Son analyse élargira les connaissances sur l'importance de l'océan Indien austral pour les rorquals, ainsi que sur la distribution géographique et saisonnière des baleines bleues dans cette région, et plus particulièrement de la baleine bleue Antarctique sur laquelle ces travaux se focalisent principalement.

1.3 Le réseau OHASISBIO : des données inédites

Les enregistrements utilisés au cours de ces travaux de thèse proviennent de deux réseaux d'hydrophones déployés au cours de deux expériences hydroacoustiques :

DEFLOHYDRO, de fin 2006 à début 2008, et OHASISBIO, commencée fin 2009 et, à ce jour, toujours en cours. Ces expériences ont deux objectifs principaux : le premier est la surveillance de l'activité sismique associée aux trois dorsales de l'océan Indien, notamment de faible magnitude, qui échappe aux réseaux sismologiques terrestres. Ce volet a fait l'objet de la thèse de Tsang-Hin-Sun (2016). L'échantillonnage basse fréquence, nécessaire au suivi de l'activité sismique, permet en même temps d'enregistrer les vocalisations produites par plusieurs grandes baleines (baleines bleues, rorquals communs et boréals). Le suivi de ces grands cétacés s'est donc naturellement intégré comme objectif de ces expériences hydroacoustiques et a déterminé en partie la distribution des sites d'écoute passive. La figure 1.6 résume le principe d'une expérience hydroacoustique. On notera que les enregistrements du réseau d'hydrophones DEFLOHYDRO ont déjà été analysés dans l'étude de Samaran et al. (2013). Ils sont réanalysés dans certains chapitres de cette thèse pour compléter les observations du réseau OHASISBIO.

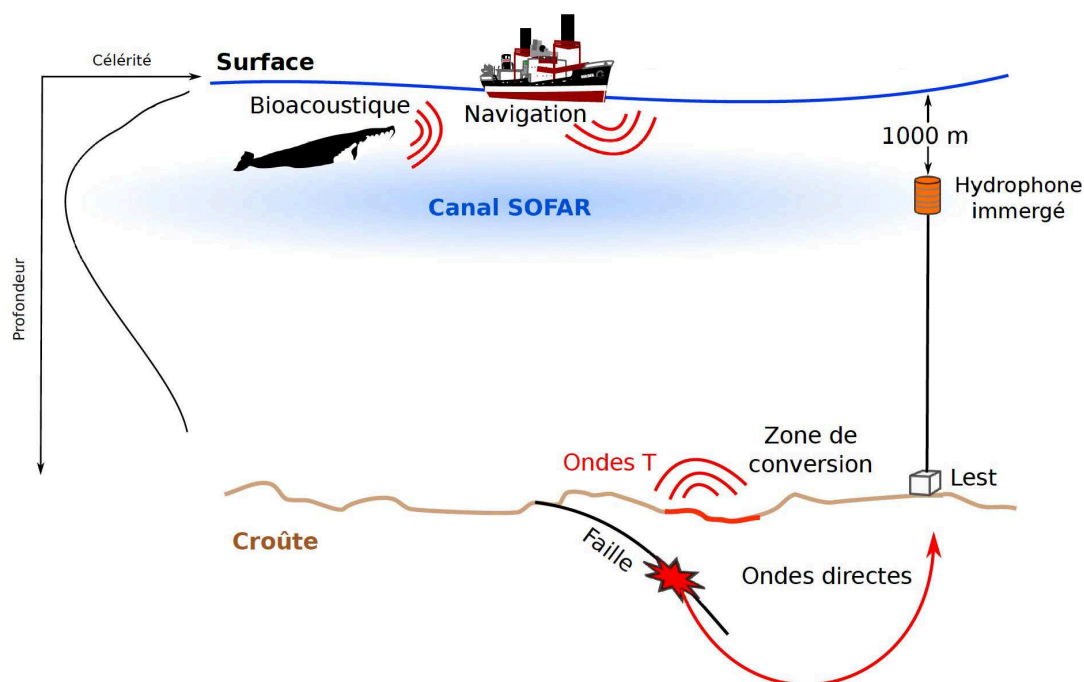


FIGURE 1.6 – Principe d'une expérience hydroacoustique. L'hydrophone est immergé dans le canal SOFAR, couche à faible vitesse du son dans la colonne d'eau. L'instrument enregistre les sons provenant de diverses sources, parfois distantes de plusieurs milliers de kilomètres (d'après Tsang-Hin-Sun, 2016).

1.3.1 Le réseau DEFLOHYDRO

Le réseau DEFLOHYDRO, (*observation de la DEFormation de la Lithosphère Océanique à l'aide d'HYDRophones*), a été déployé d'octobre 2006 à avril 2008. Il était constitué de 3 hydrophones répartis sur 3 sites : l'un situé au sud de l'île de la Réunion, dans le bassin de Madagascar (MAD), le second entre les îles Kerguelen et Amsterdam (SWAMS), et le dernier au nord-est du plateau de Saint Paul et Amsterdam (NEAMS) (Figure 1.7, étoiles avec contour en gras). Chaque mouillage était composé d'un lest, d'un largueur acoustique, d'une ligne de mouillage et d'une bouée contenant l'instrument et gardant la ligne en tension (Figure 1.8). La longueur totale du mouillage permet à l'instrument d'être immergé entre 1000 et 1300 m de profondeur, dans l'axe du canal SOFAR (*Sound Fixing And Ranging*) ; cette couche d'eau à faible célérité du son agit comme un guide pour les ondes acoustiques et leur permet de se propager sur de longues distances avec une faible atténuation. Les instruments mis en œuvre étaient des hydrophones du *Pacific Marine Environment Laboratory* (PMEL/NOAA). Ils sont constitués d'un transducteur acoustique connecté à un cylindre en titane renfermant le système d'acquisition de données, le dispositif de stockage et des packs de piles au lithium permettant une autonomie de près de 18 mois (Figure 1.9). Les données étaient enregistrées en continu avec une fréquence d'échantillonnage de 250 Hz, avec des hydrophones d'une sensibilité de -153.7 dB re : $1\text{V}/\mu\text{Pa}$. Au cours de ces travaux de thèse, seuls les enregistrements réalisés pendant l'année 2007 ont été utilisés, afin d'avoir une année complète.

1.3.2 Le réseau OHASISBIO

Le réseau OHASISBIO, (*Observatoire Hydro-Acoustique de la SISmicité et de la BIOdiversité*), a été déployé en décembre 2009, fort du succès de l'expérience DEFLOHYDRO. Les mouillages sont identiques à ceux déployés précédemment, avec les capteurs placés dans le canal SOFAR. Les instruments proprement dits ont été développés par le laboratoire (D'Eu et al., 2012). Le réseau est maintenu chaque année pendant l'été austral, en janvier-février, pendant une rotation du N.O. Marion Dufresne vers les îles australes ; les instruments sont récupérés, déchargés de leurs données, reconditionnés et redéployés pour une nouvelle année d'acquisition. À sa mise en place, le réseau comprend 5 sites (Figure 1.7) : les 3 sites déjà instrumentés lors de l'expérience DEFLOHYDRO, ainsi qu'un site situé au nord de l'archipel de Crozet (NCRO) et équipé avec un triplet d'hydrophones distants de 30 km, et un cinquième situé à l'ouest de l'archipel des Kerguelen (WKER), lui aussi équipé d'un triplet d'instruments. En 2011, un rapatriement sanitaire de la

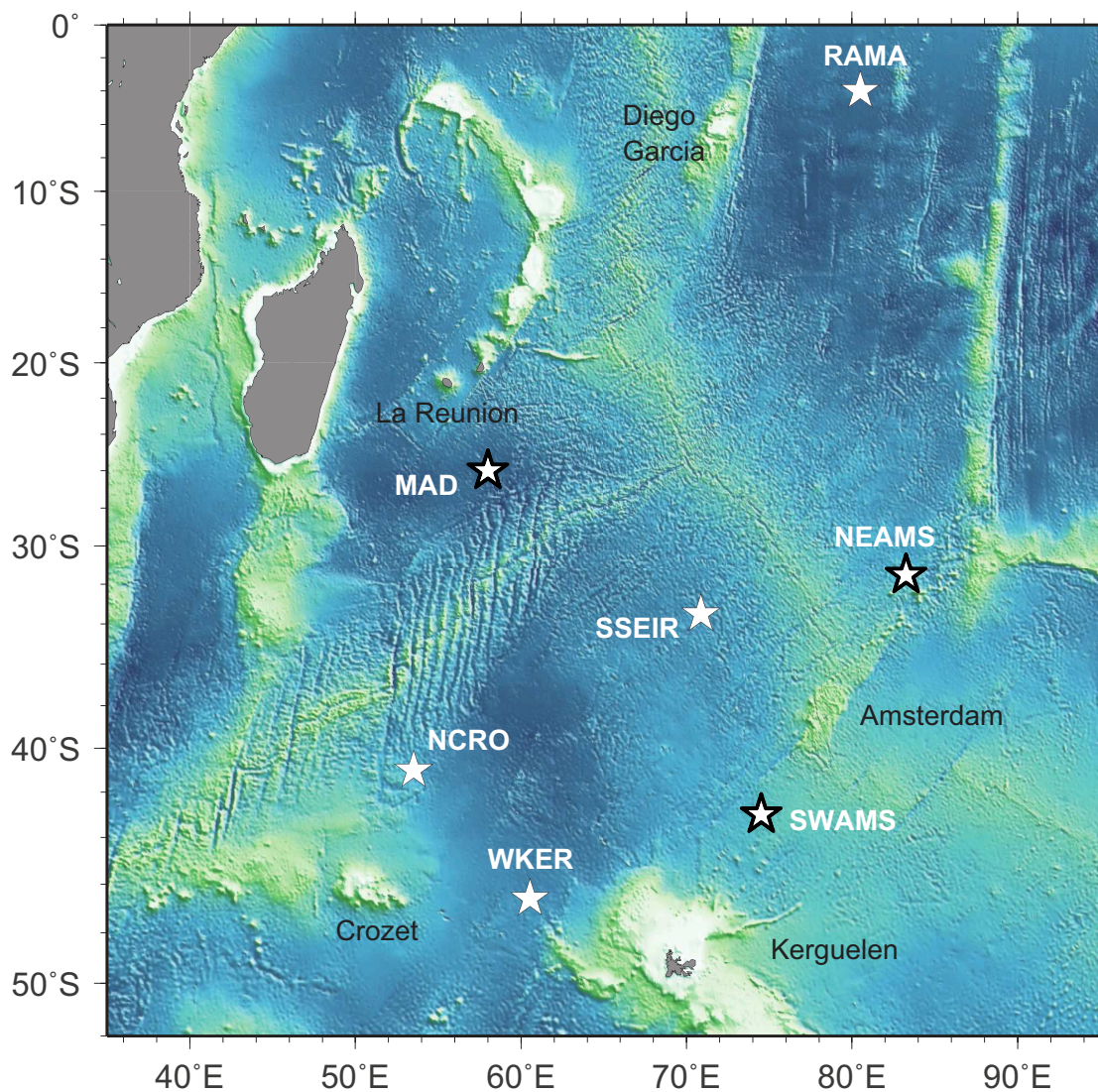


FIGURE 1.7 – Localisation des sites des réseaux d’hydrophones DEFLOHYDRO (étoiles entourées d’un contour gras) et OHASISBIO (toutes les étoiles). La position géographique des sites est donnée dans le Tableau 1.1.

base scientifique de Kerguelen écourte la mission et empêche la récupération des sites NEAMS et SWAMS. NEAMS enregistre tout de même des données jusqu’à fin novembre 2012, en revanche SWAMS s’arrête au bout de seulement 8 mois d’enregistrement. Cette année-là, un seul hydrophone est redéployé au site NCRO, car les courants locaux entraînent des mouvements de la ligne de mouillage qui brulent fortement les enregistrements. De plus, l’un des hydrophones du triplet WKER a disparu (il sera retrouvé sur une plage de Nouvelle-Zélande deux ans plus tard!) et un second s’est arrêté de fonctionner au bout d’un mois. En mai 2012, profitant d’un transit du N.O. Marion Dufresne vers Singapour, un site provisoire, RAMA, est installé dans le bassin Indien central, en zone équatoriale,

Schéma d'un mouillage hydroacoustique 2015

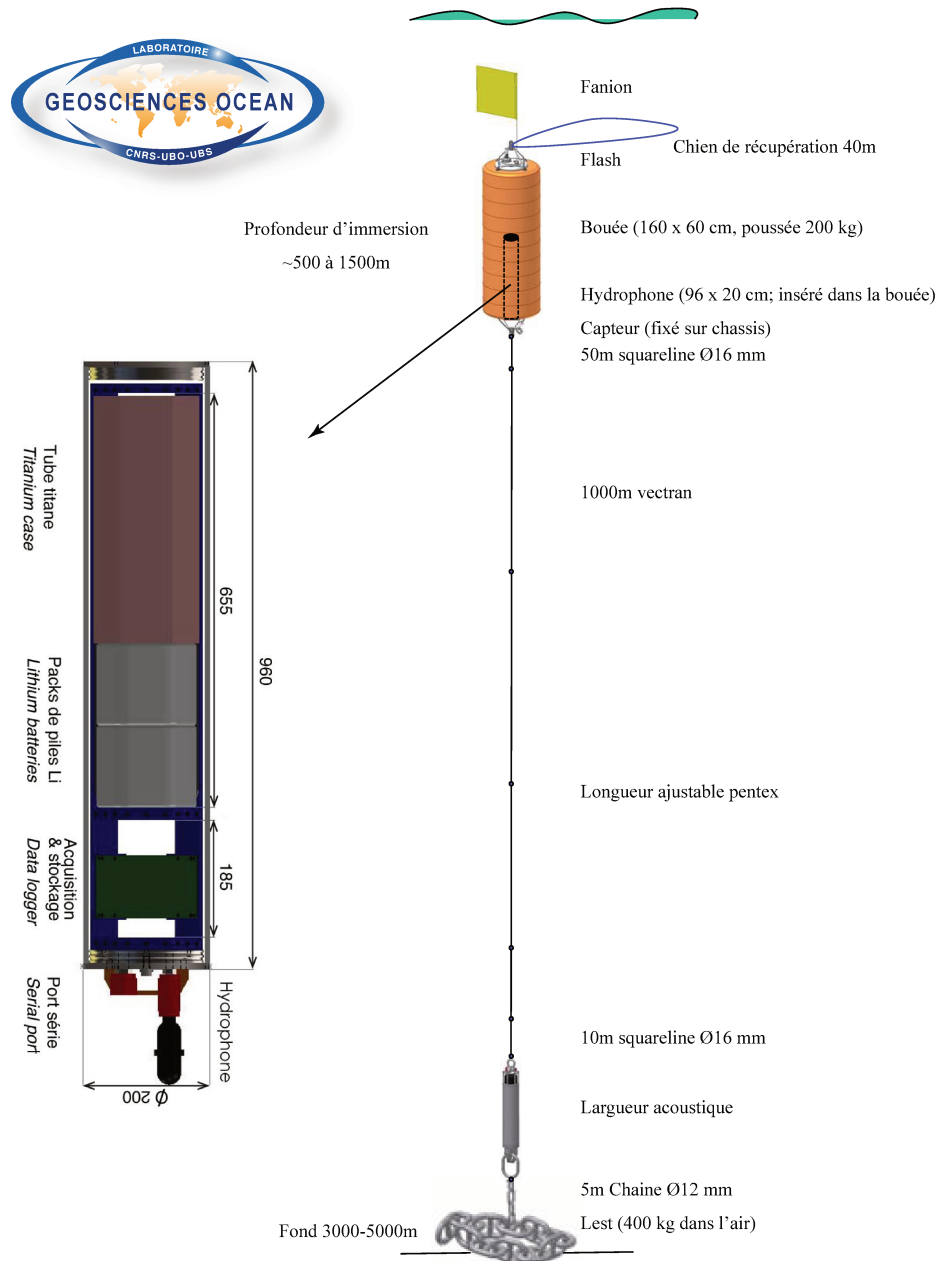


FIGURE 1.8 – Schéma d'une ligne de mouillage.

à 4° S. Il sera récupéré 16 mois plus tard en 2013 par un navire Indien. En 2014, un site supplémentaire, SSEIR, est déployé au sud de la dorsale Sud-Est Indienne ;

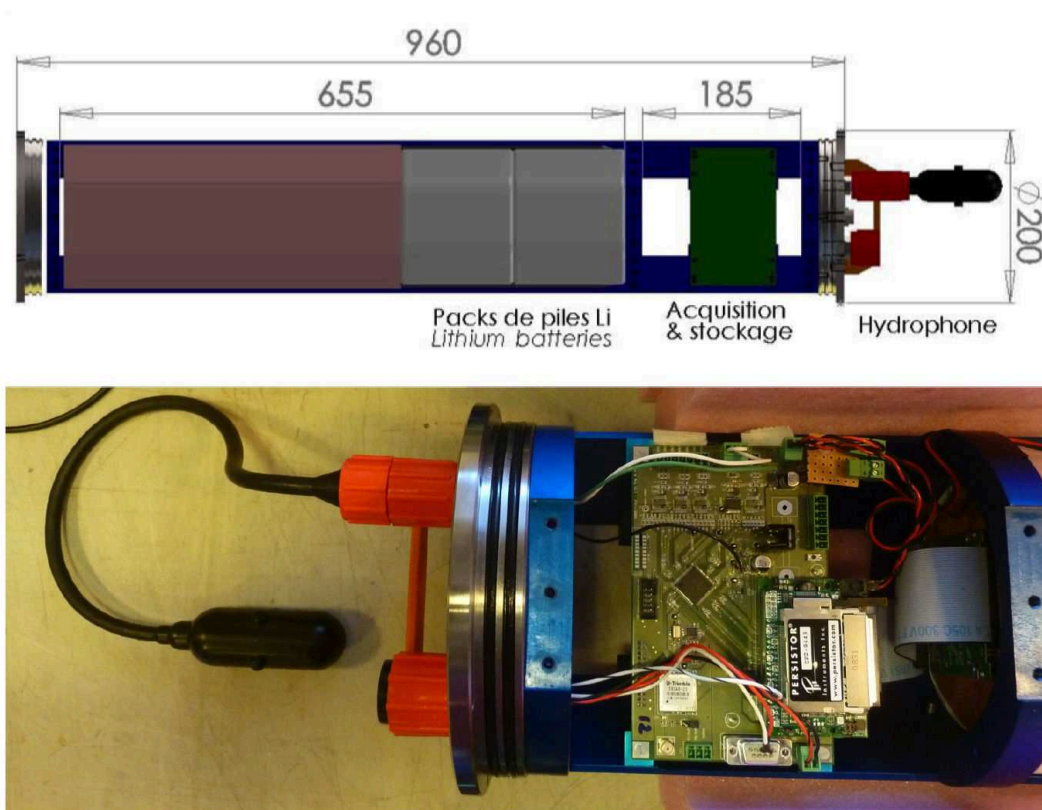


FIGURE 1.9 – (Haut) Schéma des hydrophones des expériences DEFLOHYDRO et OHASISBIO ; l'essentiel de l'espace est dédié aux piles. (Bas) Capteur et système d'acquisition et de stockage des données développé au LGO.

un instrument unique est redéployé à WKER tandis que le triplet est déplacé à SWAMS, où la distance entre les hydrophones est réduite à 10 km. En 2015, l'un des mouillages du triplet SWAMS, qui par ailleurs retrouve une configuration de 30 km entre les hydrophones, est équipé de deux instruments plus sensibles aux Ultra Basses Fréquences (UBF) : l'un situé dans le SOFAR (SWAMS 2B), à la profondeur habituelle, et l'autre (SWAMS 2A) à 300 m de profondeur. Dans cette thèse, seul l'hydrophone situé dans le SOFAR a été retenu. La même année, l'instrument NEAMS contenant les enregistrements de l'année 2014 est perdu lors de sa récupération. Enfin début 2016, l'instrument du site WKER ne peut être récupéré en raison des conditions de mer trop agitées. Un nouvel instrument y est tout de même redéployé. De même, les conditions météorologiques empêchent l'accès au site NEAMS et donc la récupération des données enregistrées pendant l'année 2015. Les périodes d'enregistrement disponibles pour ce projet sont résumés dans la figure 1.10 et détaillés dans le Tableau 1.1. Les hydrophones des sites WKER et NEAMS non récupérés en 2016 l'ont été en janvier 2017. Ces données n'ont donc pas pu être traitées au cours de ces travaux de thèse. La fréquence d'échantillonnage

des données OHASISBIO est de 240 Hz et la sensibilité des hydrophones est de -163.5 dB re : 1V/ μ Pa, sauf pour les capteurs UBF des instruments SWAMS 2A et 2B, pour lesquels elle est de -168.6 dB re : 1V/ μ Pa .

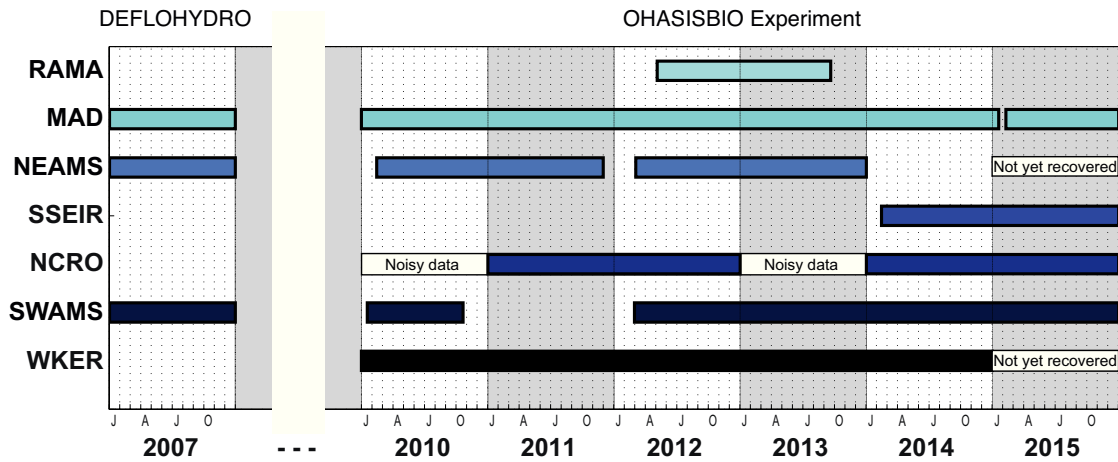


FIGURE 1.10 – Récapitulatif des périodes d'enregistrement acoustiques issus des réseaux DEFLOHYDRO et OHASISBIO analysées au cours de ces travaux.

1.3.3 Bref aperçu des données

Le réseau d'hydrophone OHASISBIO a permis d'acquérir un jeu de données exceptionnel et inédit, donnant accès à jusqu'à 6 ans d'enregistrements en continu, à 5 à 7 sites différents. Les spectrogrammes annuels offrent un premier aperçu rapide de la qualité des enregistrements, ainsi que des espèces enregistrées, comme par exemple au site SWAMS en 2015 (Figure 1.11) ; les différentes signatures vocales stéréotypées reconnues dans les enregistrements des réseaux DEFLOHYDRO et OHASISBIO (Samaran et al., 2013; Tsang-Hin-Sun et al., 2015) s'expriment par des bandes ou lignes horizontales d'amplitude élevée à des fréquences caractéristiques pour chaque espèce. L'apparition/disparition de ces lignes ou bandes de fréquence énergiques soulignent la saisonnalité de leur présence.

1.4 Données fournies par l'Australian Antarctic Division

Afin de compléter l'analyse réalisée sur la distribution géographique et saisonnière des baleines bleues Antarctique et d'étendre notre zone d'écoute plus au sud, l'Australian Antarctic Division (AAD) nous a fourni des données enregistrées

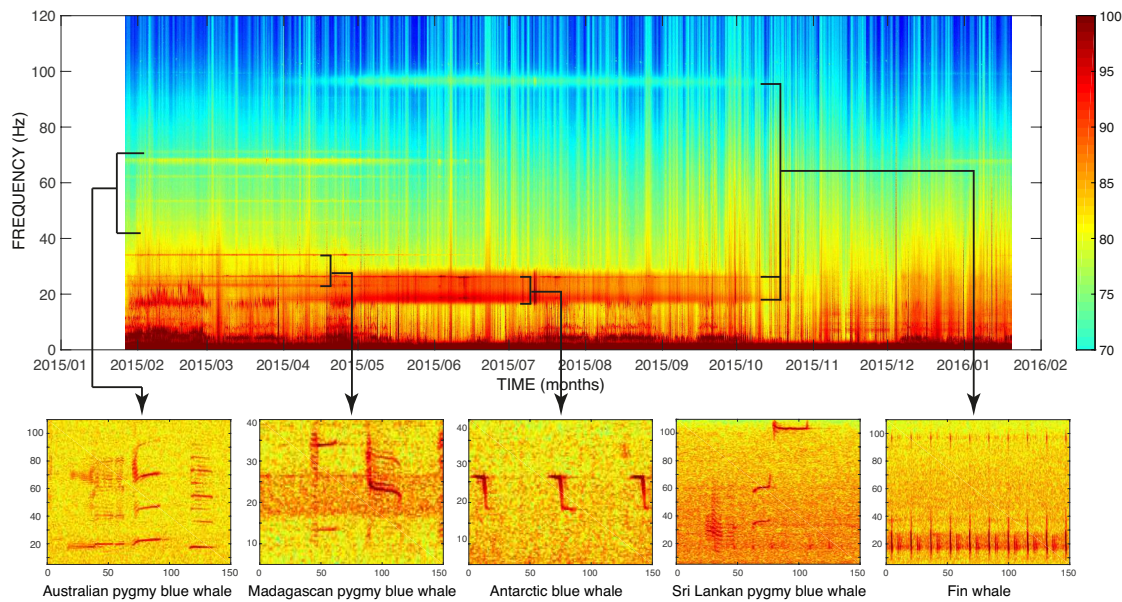


FIGURE 1.11 – Spectrogramme annuel des données enregistrées au site SWAMS en 2015. Les encadrés présentent des agrandissements de signatures acoustiques de différentes (sous-)espèces et populations enregistrées par le réseau OHASISBIO.

à deux sites différents : SKER ($62^{\circ}27' S$, $081^{\circ}49' E$), situé au sud du plateau de Kerguelen, et Casey ($63^{\circ}47' S$, $111^{\circ}47' E$), au large de la base antarctique du même nom (Figure 3.1). Les instruments déployés ont été conçus par le Support Technique Scientifique (*Science Technical Support*) de l'AAD. Chaque mouillage comporte un système électronique d'acquisition et de stockage placé dans une sphère en verre. L'hydrophone est fixé au-dessus de cette sphère, et la sphère est amarrée un système posé sur le plancher océanique, à une profondeur d'environ 3000 m, et relié à un largueur acoustique (B. Miller, comm. pers. 2017) (Figure 1.12). Les enregistrements ont été réalisés en continu, avec une fréquence d'échantillonnage de 12 kHz. Pour faciliter leur analyse, ils ont été sous-échantillonnés à 250 Hz. Les années 2014 et 2015 sont disponibles pour la station SKER, et l'année 2014 pour Casey. Les dates de déploiement et récupération, ainsi que les profondeurs des hydrophones sont détaillés dans le tableau 3.1.

1.5 Plan de la thèse

Comme précédemment exposé, ce travail de thèse s'est principalement focalisé sur la baleine bleue Antarctique, même si d'autres (sous-)espèces feront l'objet d'analyses rapides. Le traitement de l'important volume de données enregistrées par ces réseaux d'hydrophones nécessite l'utilisation de méthodes de détection automatique,

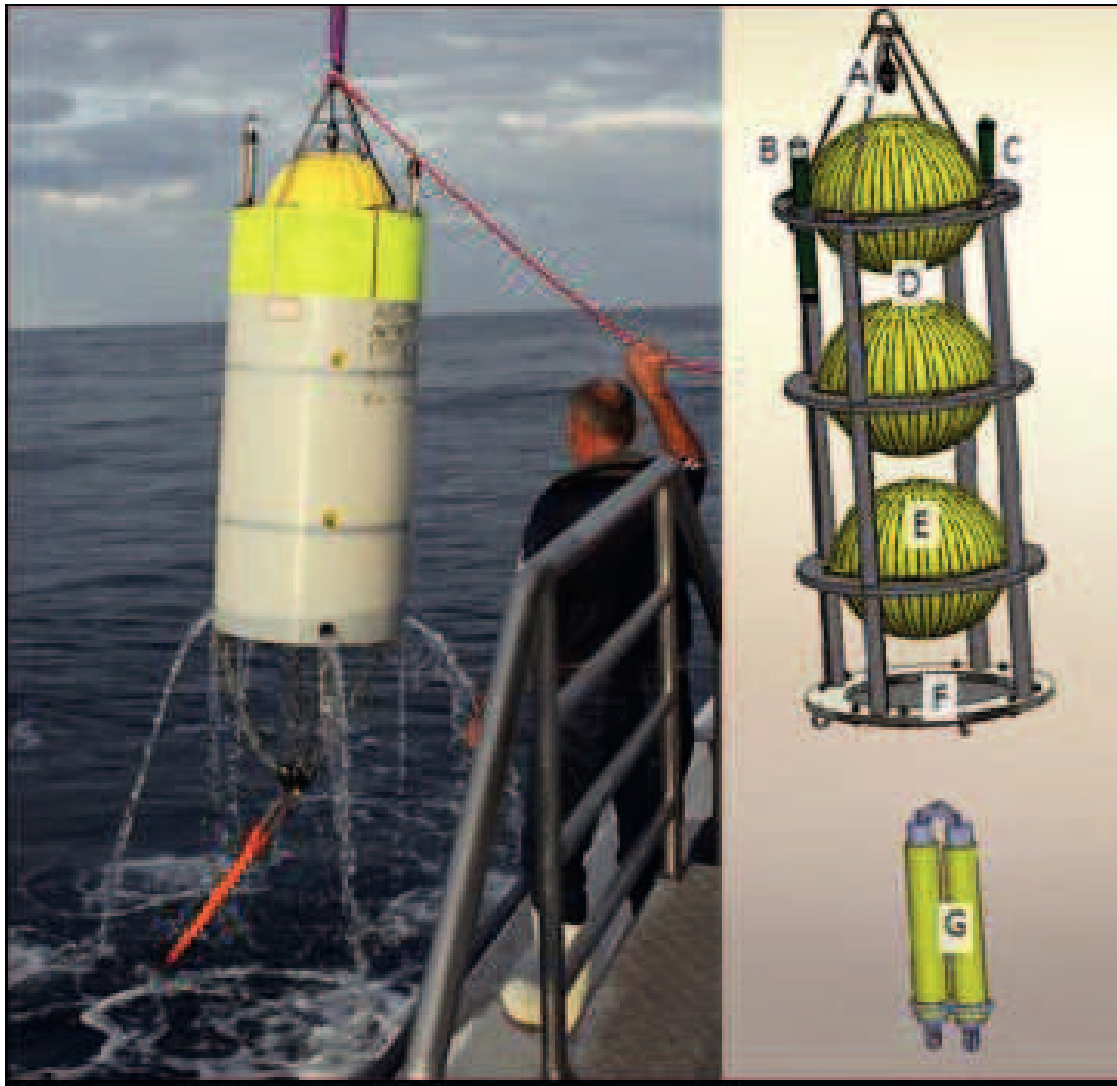


FIGURE 1.12 – Récupération (gauche) et schéma (droite) d'un mouillage de l'AAD. A) Hydrophone ; B) Flash ; C) Balise de localisation GPS-Iridium ; D) Sphère de flottaison en verre ; E) Sphère instrumentée ; F) Plaque de ballast ; G) Largueur acoustique (d'après B. Miller, comm. pers. 2017)

qu'il est au préalable nécessaire de tester pour en valider les performances. Cette étape constitue le premier volet de ce travail (Chapitre 2). L'analyse des détections automatiques permettra ensuite d'étudier la répartition géographique et saisonnière de la baleine bleue Antarctique dans l'océan Indien austral, afin de compléter et élargir les observations d'études précédentes (Stafford et al., 2004; Samaran et al., 2010b, 2013) (Chapitre 3). Ces 6 ans d'observation continue donnent également l'opportunité d'étudier l'évolution long-terme des caractéristiques fréquentielles des vocalisations de baleines bleues, en particulier Antarctique, et de vérifier si leur fréquence diminue comme ailleurs sur le globe (McDonald et al., 2009; Gavrilov

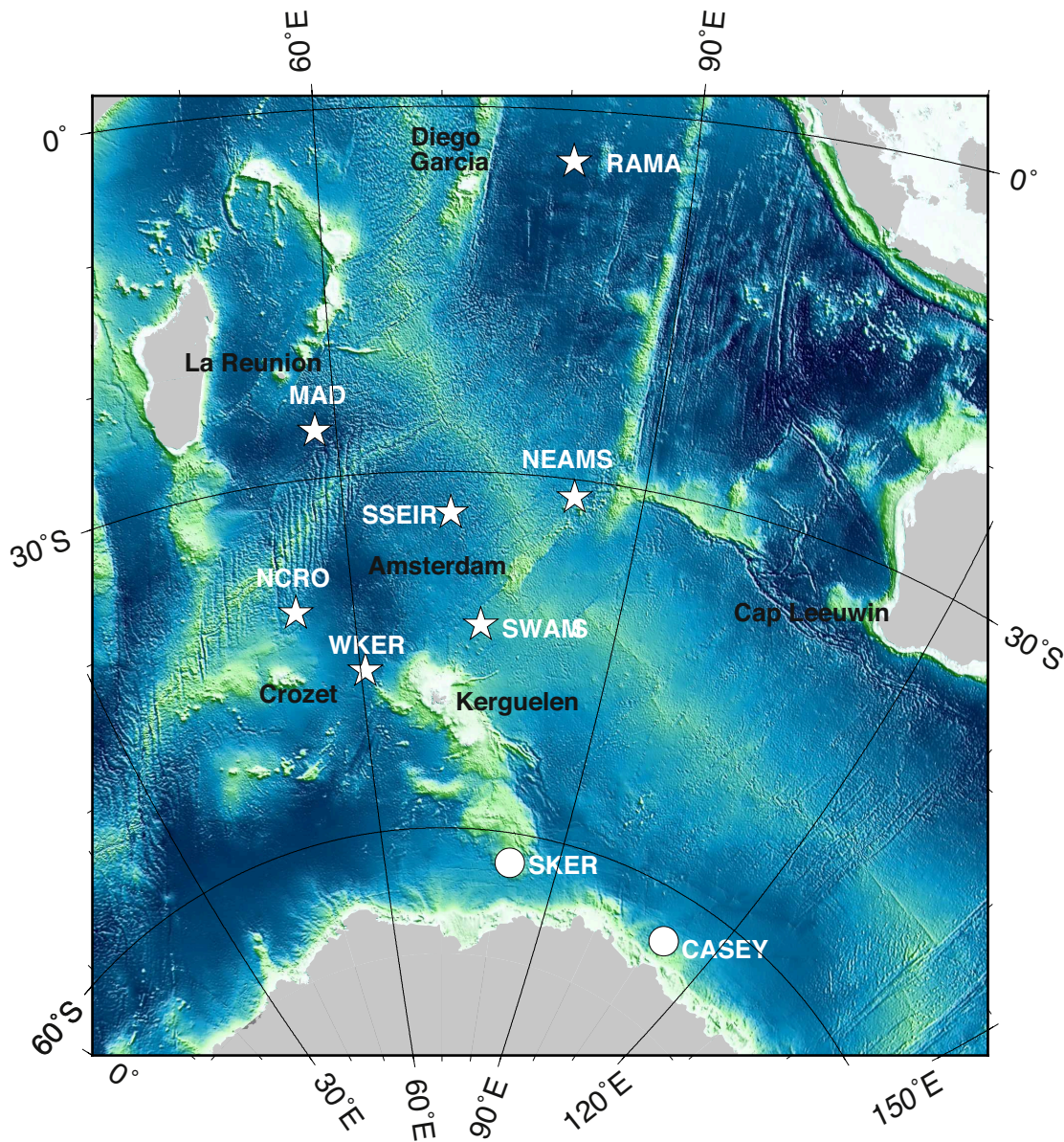


FIGURE 1.13 – Vue générale de la zone d’écoute incluant les sites instrumentés par l’Australian Antarctic Division (SKER et Casey).

et al., 2011, 2012; Miller et al., 2014) (Chapitre 4). L’analyse préliminaire des signatures vocales de baleines bleues pygmées et de rorquals communs, également présentes dans les données, a permis d’obtenir une idée générale de la répartition géographique et saisonnière de ces (sous-)espèces et populations dans la zone d’étude (Chapitre 5). Enfin, l’analyse systématique de cet ensemble de données a révélé des signaux jusqu’alors inconnus ou imparfaitement décrits, très probablement émis par des grandes baleines, qui complètent notre connaissance du répertoire vocal des mammifères marins (Chapitre 6).

TABLE 1.1 – Localisation des sites utilisés et dates de début et fin d'enregistrement pour les réseaux DEFLOHYDRO et OHASISBIO. Les hydrophones des triplets sont numérotés de 1 à 3. Le symbole “-” indique des enregistrements continus sans récupération des données, “x” indique des données manquantes.

Site	Coord. géo.	DEFLOHYDRO <----->						OHASISBIO ----->							
		2007		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
		Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
RAMA	03°50'S, 080°30'E	x	x	x	x	x	x	05/05/12	-	-	19/09/13	x	x	x	x
MAD	26°05'S, 058°08'E	30/10/06	05/01/08	20/12/09	19/02/11	19/02/11	09/03/12	10/03/12	09/03/13	09/03/13	16/02/14	16/02/14	18/01/15	08/02/15	28/01/16
NEAMS	31°35'S, 083°14'E	10/10/06	26/04/08	13/02/10	-	-	25/11/11	04/03/12	04/03/13	04/03/13	10/02/14	x	x	Données non traitées	
SWAMS	42°59'S, 074°35'E	11/10/06	13/01/08	17/01/10	21/11/10	x	x	29/02/12	27/02/13	28/02/13	07/02/14	x	x	x	x
SWAMS 1	42°02'S, 074°36'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	07/02/14	02/12/14	27/01/15	20/01/16
SWAMS 2	42°58'S, 074°31'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	07/02/14	27/01/15	27/01/15	20/21/16
SWAMS 3	42°57'S, 074°39'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	08/02/14	27/01/15	27/01/15	21/01/16
NCRO 1	41°00'S, 052°49'E	x	x	25/12/09	19/01/11	20/01/11	30/01/12	x	x	x	x	x	x	x	x
NCRO 2	41°00'S, 053°10'E	x	x	25/12/09	20/01/11	21/01/11	31/01/12	x	x	x	x	x	x	x	x
NCRO 3	41°14'S, 052°59'E	x	x	25/12/09	20/01/11	20/01/11	31/01/12	29/01/12	10/02/13	12/02/13	10/01/14	11/01/14	11/01/15	11/01/15	08/01/16
WKER 1	46°38'S, 060°07'E	x	x	28/12/09	24/01/11	25/01/11	03/02/12	04/02/12	14/02/13	15/02/13	15/01/14	x	x	x	x
WKER 2	46°34'S, 060°31'E	x	x	28/12/09	25/01/11	x	x	05/02/12	15/02/13	17/02/13	23/10/13	15/01/14	01/01/15	Données non traitées	
WKER 3	46°50'S, 060°24'E	x	x	28/12/09	25/01/11	25/01/11	10/03/12	03/02/12	16/02/13	16/02/13	16/01/14	x	x	x	x
SSEIR	33°30'S, 070°52'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	13/02/14	04/02/15	05/02/15	18/01/16

TABLE 1.2 – Sites de déploiement, dates de mise à l'eau et de récupération, et profondeur des instruments de l'AAD.

Site	Année	Coordonnées	Déploiement	Récupération	Profondeur
SKER	2014	62°27' S, 081°49' E	10/02/14	23/01/15	1800 m
	2015	62°27' S, 081°49' E	29/01/15	29/01/16	1800 m
Casey	2014	63°47' S, 111°47' E	25/12/13	09/12/14	2800 m

Chapitre 2

Détection automatique des Z-calls de baleine bleue Antarctique

Introduction

Le suivi par acoustique passive engendre la collecte d'une importante quantité de données. A titre d'exemple, les données enregistrées par l'observatoire acoustique OHASISBIO et traitées pendant cette thèse totalisent près de 38 années d'enregistrements, pour un volume d'environ 1 To. Le dépouillement manuel d'une telle base de données représenterait un coût exorbitant en termes de temps et d'opérateurs humains. C'est pourquoi il est nécessaire de développer des méthodes robustes de traitement du signal afin d'automatiser la détection des vocalisations présentes dans ces données. Avec l'essor du suivi par acoustique passive, différentes méthodes de détection automatique ont été développées, notamment basées sur le filtrage adapté ou la corrélation de spectrogrammes. Cette dernière approche est souvent utilisée pour la détection de vocalisations de baleines bleues (Mellinger & Clark, 1997, 2000; Mellinger et al., 2007; Samaran et al., 2008; Širović, 2016). Parmi ces vocalisations, le Z-call de la baleine bleue Antarctique, très stéréotypé et déterministe, est un excellent candidat pour l'utilisation de tels outils automatiques (Stafford et al., 2004; Širović et al., 2009; Samaran et al., 2013; Thomisch et al., 2016). Cependant, cette reconnaissance automatique peut être gênée par la présence d'interférences (*e.g.* vocalisations d'autres espèces, craquements d'icebergs, séismes, tirs de canon à air, etc), et nécessite le choix, bien souvent subjectif, d'un seuil de détection et d'un modèle ou *template* de référence. Ces choix vont influencer sur les performances du détecteur, rendre la méthode dépendante de l'opérateur qui l'applique, et ainsi compliquer la comparaison de différentes études entre elles. Pour dépasser ces limitations et disposer d'une méthode aux performances contrôlées, autant que possible indépendante de choix *a priori*, une nouvelle méthode de

détection des Z-calls a été développée avant le commencement de cette thèse par François-Xavier Socheleau, chercheur à Brest. Cette méthode, basée sur un algorithme de détection par projection en sous-espace vectoriel, nécessitait d’être testée sur une base de données réelles et comparée à des outils traditionnels de bioacoustique, afin de convaincre la communauté bioacoustique de sa pertinence. La validation de cette méthode et sa comparaison avec un outil de détection par corrélation de spectrogrammes, *XBAT* (Figueroa & Robbins, 2008), couramment utilisé par la communauté, a été le premier objectif de ce travail de thèse. Ce travail a permis de compléter la description de l’algorithme de détection développé, baptisé “*Z-detector*”, et de répondre aux critiques des relecteurs pour sa publication.

2.1 Le *Z-detector*

2.1.1 Principe de détection : la projection en sous-espace vectoriel

Dans une fenêtre d’observation donnée, un signal acoustique va pouvoir se composer d’un Z-call, d’une interférence (*i.e.* tout signal transitoire n’étant pas un Z-call), et de bruit ambiant. Z-call et interférence seront ou non présents, en fonction du signal observé. La problématique est donc de savoir si le signal observé contient un Z-call, et ce malgré la possible présence simultanée d’une interférence. Le bruit ambiant, quant à lui, est présent dans tous les cas. Ce dernier a fait l’objet de mesures et d’observations, et est modélisable. Le Z-call, par son caractère stéréotypé et sa forme en Z que l’on peut qualifier de sigmoïdale, pourra également être modélisé en utilisant une fonction logistique. Ce modèle dépendra de plusieurs paramètres ; certains, comme les paramètres fréquentiels, étant connus, et d’autres, comme la phase et l’amplitude du Z-call, étant inconnus. Quant aux interférences, les observations ont montré qu’elles sont de types et de formes variées et donc impossibles à modéliser. C’est pour parer à ces inconnues sur les Z-calls (*i.e.* phase et amplitude) et les interférences que la stratégie de détection par projection en sous-espace a été choisie. En effet, plutôt que de modéliser le signal lui-même, comme cela est fait pour les méthodes de filtrage adapté par exemple, on va modéliser un sous-espace vectoriel dans lequel la majorité de l’énergie du Z-call se trouve. La base de ce sous-espace est définie par une matrice H , qui contient tous les paramètres connus du modèle de Z-call (*e.g.* fréquence de l’unité A, fréquence de l’unité B, pente du *downsweep* ; Figure 2.1). Un signal “Z-call” peut alors se décrire sous la forme d’une combinaison linéaire entre cette matrice H et un vecteur qui contient les paramètres inconnus du Z-call : la phase et l’amplitude. Les observations

réalisées sur des *Z-calls* ont montré que cette amplitude, bien qu'inconnue, est constante par parties et que l'on peut découper le *Z-call* en 4 parties. On notera que la méthode permet que ces parties soient manquantes (*i.e.* puissent avoir une amplitude nulle), dans le cas de signaux dégradés par la propagation. Afin de vérifier si le signal observé contient un *Z-call*, le signal est projeté, à l'aide d'une matrice de projection, dans le sous-espace vectoriel des *Z-calls* défini par la matrice H . On calcule alors le ratio entre l'énergie du signal projeté dans ce sous-espace des *Z-calls* et l'énergie du signal initial. Si ce ratio est supérieur à un certain seuil, on considérera que le signal contient un *Z-call*. Sinon, il n'en contient pas. C'est le principe général de la détection par projection en sous-espace. La méthode utilisée pour le *Z-detector* est en réalité un peu plus complexe, afin de prendre en compte la possible présence d'interférences. Elle est expliquée en détail dans l'article paru dans *JASA* (Socheleau et al., 2015) et reproduit ci-après.

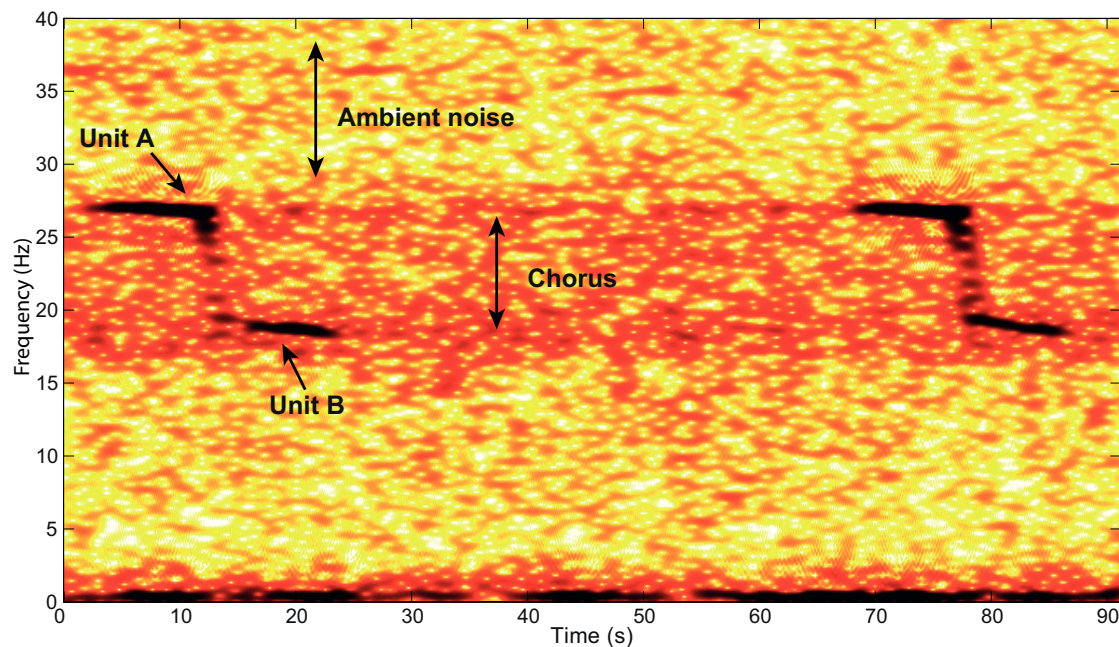


FIGURE 2.1 – *Z-calls* de baleines bleues Antarctique et *chorus* : bruit généré par la superposition de *Z-calls* et de pulses de rorquals communs émis à plus au moins grande distance de l'hydrophone.

2.1.2 Le *Z-detector* : en pratique

La mise en œuvre du *Z-detector* est relativement aisée. Elle nécessite simplement, en amont du processus de détection, de caractériser le modèle de *Z-call*, et plus particulièrement les paramètres fréquentiels. Ces dernières décennies, la fréquence de l'unité A du *Z-call* montre une décroissance inter-annuelle constante assortie de variations intra-annuelles (McDonald et al., 2009; Gavrilov et al., 2012; Miller

et al., 2014). Pour prendre en compte ces variations, le sous-espace de détection a été étendu, et est défini par une combinaison de trois matrices H qui vont regrouper les paramètres de deux modèles de Z-calls autour d'un modèle central. En faisant varier la fréquence des unités A et B dans un intervalle d'1 Hz (utilisé pour l'étude des performances de l'algorithme), ou de 0.5 Hz (utilisé pour les analyses de la base de données OHASISBIO présentées dans ce manuscrit, cf. Chapitre 3), on pourra alors couvrir les variations intra-annuelles de fréquence, voire inter-annuelles, tout en restant relativement robuste aux interférences. Cette adaptabilité peut toutefois générer, en contrepartie, un plus grand nombre de fausses détections. La variation inter-annuelle de la fréquence pouvant dépasser cette marge de ± 0.5 Hz ou ± 0.25 Hz, il faudra veiller à ce que l'intervalle de fréquences choisi contienne bien la fréquence des Z-calls enregistrés l'année concernée. L'étude des spectrogrammes long-terme (voir Figure 1.11, Chapitre 1), calculés avec une haute résolution fréquentielle, permet d'estimer aisément et rapidement la fréquence des Z-calls d'une année donnée, et de décider des paramètres du modèle logistique.

2.1.3 Comparaison avec un détecteur par corrélation de spectrogrammes

Afin de convaincre la communauté bioacoustique de l'intérêt et des avantages de cette méthode de détection, il a été nécessaire de la comparer avec une des méthodes les plus couramment utilisées pour l'étude des vocalisations de mysticètes : la corrélation de spectrogrammes. Pour ce faire, le logiciel *XBAT* (Figueroa & Robbins, 2008), classiquement employé pour la détection de vocalisations de baleines bleues (*e.g.* Boisseau et al., 2008; Samaran et al., 2013), a été appliqué. Les deux algorithmes ont été testés sur les données enregistrées en 2007 à la station SWAMS du réseau DEFLOHYDRO, car elles offraient en point de référence l'analyse réalisée par Samaran et al. (2013). Afin de comparer les performances de détection de façon la plus complète possible, plusieurs sous-ensembles de données ont été traités :

- présence uniquement de Z-calls et de bruit ambiant (*i.e.* pas d'interférence), ce qui représente le cas "idéal". Pour ce cas, des plages de données avec des Z-calls de différente "qualité" (*i.e.* différents Rapports Signaux à Bruit (RSB)) ont été visuellement identifiées et isolées :
 - Z-calls de bonne qualité (*i.e.* fort RSB, supérieur à 5 dB)
 - Z-calls de qualité intermédiaire (*i.e.* RSB intermédiaire, compris entre -7 et 4 dB)
 - Z-calls de faible qualité (*i.e.* faible RSB, inférieur à -3 dB)

- présence de signaux interférents et de *Z-calls*. Les différents types d'interférences rencontrées dans les données ont été identifiées. Sept types ont été répertoriés, de natures différentes (*e.g.* anthropologique : tirs de canons à air ; géologique : séismes, bruit de glace ; biologique : vocalisations de baleines bleues pygmées, *B. m. brevicauda*, du type Australie, et de rorquals communs ; ainsi que deux signaux de sources inconnues). Des plages de données contenant simultanément chaque type d'interférences et des *Z-calls* ont été extraites.
- présence uniquement d'interférences. Ici encore, des plages d'enregistrements contenant isolément chaque type d'interférences ont été extraites.

Cette stratégie d'échantillonnage permet, au contraire d'un échantillonnage aléatoire, de caractériser les performances des détecteurs dans des cas bien précis, d'identifier les cas problématiques pour chaque méthode de détection et éventuellement de prédire leur comportement en fonction du contenu des enregistrements. Ces données ont été inspectées visuellement pour vérifier la présence ou non de *Z-calls* et disposer d'une "vérité terrain" sur laquelle baser l'étude de performances des détecteurs. Les deux détecteurs automatiques (le *Z-detector* et *XBAT*) ont ensuite été appliqués aux données. Les détections obtenues ont été comparées aux détections manuelles et classées en trois catégories :

- détection correcte : le détecteur automatique a détecté le même événement que l'opérateur humain
- fausse détection : le détecteur automatique a détecté un événement que l'opérateur humain n'a pas détecté et qui n'est pas un *Z-call*
- détection manquée : le détecteur automatique n'a pas détecté un événement détecté par l'opérateur humain.

On notera que si le détecteur automatique a détecté un événement qui se révèle être un *Z-call* (de très faible RSB par exemple) non détecté par l'opérateur humain, une détection manquée a été attribuée à ce dernier.

Dans les cas "idéaux" avec uniquement présence de *Z-calls*, le *Z-detector* a détecté 97% des cris de bonne qualité, 70% des cris de qualité intermédiaire, et 52% des cris de faible qualité. Ces taux de détections sont supérieurs à ceux de *XBAT*, qui a détecté respectivement 88%, 61% et 34% de ces *Z-calls*. Dans le cas de présence simultanée de *Z-calls* et d'interférence, le *Z-detector* dépasse toujours *XBAT* en termes de taux de détections correctes, avec un écart supérieur à 10%, excepté dans le cas de présence de pulses de rorquals communs. Dans ce dernier cas, *XBAT* est légèrement meilleur, avec toutefois un écart très réduit (~3%). Enfin, en présence d'interférences avec ou sans *Z-calls*, les deux algorithmes présentent un

nombre comparable et relativement limité de fausses détections. Le détail de ces comparaisons est développé dans l'article reproduit ci-après.

Ces tests de performances ont montré que dans la grande majorité des cas, le *Z-detector* présente des performances supérieures à *XBAT* en termes de détections correctes. En termes de nombres de fausses détections, les deux méthodes ont des résultats très similaires, et une quantité de fausses détections relativement basse. Il est cependant important de noter que la détection par corrélation de spectrogrammes est une méthode plus rigide, qui cherche la ressemblance entre le signal étudié et un modèle prédéfini (généralement un “beau” Z-call identifié dans le jeu de données analysé). Le *Z-detector* est plus flexible et ne nécessite que de définir la fréquence des unités A et B, avec une tolérance pour prendre en compte la variabilité de la fréquence des Z-calls. Comme exposé auparavant, cette flexibilité peut entraîner un nombre de fausses détections plus important. Et pourtant, ce nombre est comparable au nombre de fausses détections obtenu avec *XBAT*. On peut également ajouter que les performances de la corrélation de spectrogrammes dépendent du choix du modèle de référence. Dans cette étude, ce dernier a été choisi pour maximiser les performances du détecteur *XBAT* et minimiser le nombre de fausses détections. Un autre modèle aurait pu donner des résultats différents et peut-être moins bons.

2.1.4 Autres avantages du Z-detector

Outre ses performances de détection globalement supérieures à *XBAT* en termes de détections correctes, et équivalentes en termes de nombre de fausses détections, le *Z-detector* présente d'autres avantages non négligeables et peut-être plus importants encore. Comme précédemment mentionné, la détection par corrélation de spectrogrammes nécessite le choix d'un modèle de détection *a priori*. Elle dépend également des choix des paramètres de calcul du spectrogramme. Enfin, elle nécessite le choix d'un seuil de détection, subjectif ici encore, à partir duquel on décidera que la ressemblance entre le signal observé et le modèle est suffisante pour enregistrer la détection. Le seuil de détection est bien souvent utilisé sur l'ensemble des données analysées, sans tenir compte des variations de conditions de bruit. Le *Z-detector*, quant à lui, utilise un modèle de Z-call défini d'après des mesures réalisées sur plusieurs vocalisations. Du fait de la très faible variabilité de la forme des Z-calls, ce modèle est valable quelles que soient les données traitées, à la condition que les fréquences choisies pour caractériser le modèle soient adaptées à l'année de données considérée. La tolérance permise sur l'intervalle de fréquence

(*e.g.* ± 0.5 Hz) permet de traiter une ou plusieurs années de données consécutives, alors que le modèle utilisé pour la corrélation de spectrogrammes nécessite d'être changé en cours d'année, par exemple pour prendre en compte les variations intra-annuelles de fréquence (Širović, 2016). En ce qui concerne le seuil de détection, il s'adapte automatiquement au niveau de bruit ambiant dans la bande 15-30 Hz, et va donc prendre en compte également la puissance du chorus, ce bruit généré par la superposition de Z-calls et de pulses de rorquals communs émis à plus au moins grande distance de l'hydrophone (Figure 2.1). On retrouve un tel seuil adaptatif dans d'autres méthodes de détection, telles que le filtrage adapté, mais cela n'a pas été implémenté dans le logiciel *XBAT*, et est généralement ignoré dans les méthodes de détection automatique disponibles dans la communauté. Enfin, les performances théoriques du *Z-detector* sont connues *a priori* et non pas estimées *a posteriori*. Elles nous assurent que la probabilité de fausse alarme ne dépassera pas 3%. La connaissance des performances de détection est extrêmement importante, notamment dans le cadre des études d'estimation de densité d'individus à partir de la densité de cris. On peut également ajouter que le *Z-detector* est intégré dans un code Matlab qui fournit différentes métriques utiles, telles que le RSB de la détection ou encore la fréquence de l'unité A au pic de puissance, métrique utile à la fois pour éliminer les éventuelles fausses détections, mais aussi pour étudier les variations de fréquence du Z-call (voir Chapitre 4). Il faudrait adapter *XBAT* pour fournir les mêmes métriques.

Ces avantages et la validation de la méthode de détection sur un jeu de données réelles ont confirmé l'intérêt du *Z-detector* par rapport à une méthode plus classique. Elle a donc été systématiquement utilisée au cours de ces travaux de thèse pour analyser les données disponibles.

2.1.5 Article paru dans *The Journal of the Acoustical Society of America*



Automated detection of Antarctic blue whale calls

Francois-Xavier Socheleau^{a)}

Institut Mines-Telecom, Telecom Bretagne, Unités Mixtes de Recherche, Centre National de la Recherche Scientifique 6285, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance, Technopôle Brest Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex, France

Emmanuelle Leroy

University of Brest, Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire Domaines Océaniques, Institut Universitaire Européen de la Mer, 29280 Plouzané, France

Andres Carvalho Pecci

Institut Mines-Telecom, Telecom Bretagne, Unités Mixtes de Recherche, Centre National de la Recherche Scientifique 6285, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance, Technopôle Brest Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex, France

Flore Samaran

École Nationale Supérieure de Techniques Avancées de Bretagne, 2 Rue Francois Verny, 29806 Brest Cedex 9, France

Julien Bonnel

École Nationale Supérieure de Techniques Avancées de Bretagne, Unités Mixtes de Recherche, Centre National de la Recherche Scientifique 6285, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance, 2 Rue Francois Verny, 29806 Brest Cedex 9, France

Jean-Yves Royer

University of Brest, Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire Domaines Océaniques, Institut Universitaire Européen de la Mer, 29280 Plouzané, France

(Received 23 April 2015; revised 27 August 2015; accepted 2 October 2015; published online 18 November 2015)

This paper addresses the problem of automated detection of Z-calls emitted by Antarctic blue whales (*B. m. intermedia*). The proposed solution is based on a subspace detector of sigmoidal-frequency signals with unknown time-varying amplitude. This detection strategy takes into account frequency variations of blue whale calls as well as the presence of other transient sounds that can interfere with Z-calls (such as airguns or other whale calls). The proposed method has been tested on more than 105 h of acoustic data containing about 2200 Z-calls (as found by an experienced human operator). This method is shown to have a correct-detection rate of up to more than 15% better than the extensible bioacoustic tool package, a spectrogram-based correlation detector commonly used to study blue whales. Because the proposed method relies on subspace detection, it does not suffer from some drawbacks of correlation-based detectors. In particular, it does not require the choice of an *a priori* fixed and subjective template. The analytic expression of the detection performance is also derived, which provides crucial information for higher level analyses such as animal density estimation from acoustic data. Finally, the detection threshold automatically adapts to the soundscape in order not to violate a user-specified false alarm rate.

© 2015 Acoustical Society of America. [<http://dx.doi.org/10.1121/1.4934271>]

[AMT]

Pages: 3105–3117

I. INTRODUCTION

Monitoring cetaceans using passive acoustic methods is a popular survey strategy. It overcomes some of the limitations of visual surveys especially in large and remote areas (e.g., the southern ocean) and it is relevant to study elusive and endangered species (e.g., the Antarctic blue whale). Most of our recent knowledge on Antarctic blue whale distribution in the southern hemisphere is derived from long-term passive acoustic monitoring.^{1–3} Antarctic blue whales emit

almost year-round, stereotyped long and low frequency calls with high intensity also called “Z-shaped” sounds or “Z-calls.” These calls consist of three tonal units lasting up to 26 s, and repeated in patterned sequences every 40–50 s over periods extending from a few minutes to hours.^{4–7} The first component is a constant frequency tone at 27 Hz (with inter-annual/seasonal variations usually between 28 and 26 Hz) followed by a short frequency-modulated down-sweep from 27 to 20 Hz ending with the third component, a slightly modulated tone (20–18 Hz). Antarctic blue whale calls can be detected from several tens to hundreds of kilometers by passive acoustic monitoring systems^{8,9} and are a cue of their presence in the study area.³ Long-term passive acoustic

^{a)}Electronic mail: fx.socheleau@telecom-bretagne.eu

monitoring aims at understanding the seasonal distribution and occurrence of whale species. With a network of instruments, their distribution and movements can be assessed.

However, the collected acoustic data, even at relatively low sampling rates, can easily amount to multiple gigabytes or terabytes of which the analysis can be challenging. It is thus generally impractical to analyze all the data in real time or manually. The way to efficiently process such large amount of acoustic records has been the subject of many efforts in the past twenty years and has resulted in a robust body of literature on automated detection methods. Most methods are based on detection either in time series or in spectrograms. Techniques involved for mysticete calls and particularly for blue whale calls detection include matched-filters,^{7,10} spectrogram-based template matching,^{11,12} multivariate classification,² and other approaches (e.g., Refs. 13 and 14). Choosing the best tool is crucial for analyzing acoustic datasets with respect to the occurrence and density estimation of whales in the study area.

However, the outcome largely depends on the time-frequency characteristics of the signal of interest in the specific ambient noise of the monitored area.

Antarctic blue whale calls are highly stereotyped, simple, and repetitive and therefore are good candidates for many automated detection methods. However, due to the relatively long and tonal characteristics of the calls, signals from multiple Antarctic blue whales or calls produce by others baleen whale species in the same frequency range can overlap. As a consequence, the lack of distinction between overlapping signals can lead to underestimation of the actual number of calls. Moreover, Antarctic blue whales calls can be produced in a varying and unpredictable ambient noise composed of many interferences such as earthquakes, air-guns or ship noise. These interferences can dramatically reduce the performance of the automated detection methods. Antarctic blue whales can produce Z-calls every 40–50 s resulting in, potentially, thousands of detections over a year that can be laborious to quality control or even analyze. Finally, the choice of automated detectors as well as the knowledge of their respective performance are crucial to best exploit the long-term passive acoustic dataset, especially when detection results are used for statistical methods such as density estimation from calling animals. At this step, assessing the number of missed calls and the number of false detections becomes important.¹⁵

In this paper, we address the problem of detecting Z-calls with two objectives in mind that are not jointly fulfilled by existing methods. The first objective is to design a detection strategy that explicitly deals with the possible presence of unwanted transient signals and also allows for Z-calls to differ in frequency, amplitude or in duration from one observation to another. As detailed in this work, this requirement is met by modeling a multidimensional subspace where most of the Z-call energy lies rather than by modeling the signal itself as in matched-filter-based methods. In addition, we explicitly assume that, due to the fluctuation of the oceanic environment, part of the Z-call energy does not lie in the modeled subspace and, more importantly,

that interfering transient signals may present partial similarities with Antarctic blue whale sounds.

The second objective is to provide a method with formal and controlled detection performance that does not require *ad hoc* procedures relying on extensive Monte Carlo simulations or (subjective) human inspection of real data. As stated previously, managing the detection performance can be crucial for higher level analysis such as animal density estimation. The relation between the decision threshold of our detector and its false alarm as well as its detection probabilities is explicitly derived in this paper. While fulfilling our two objectives, the proposed detection strategy is shown to present some properties of optimality with respect to detection performance.

The paper is organized as follows. In Sec. II, the experimental data are described and the observation model is formulated. Section III presents the detection strategy as well as its associated theoretical performance. Its actual performance is illustrated in Sec. IV and compared with the extensible bioacoustic tool package (XBAT), a spectrogram-based detector. Finally, conclusions are given in Sec. V.

Notation: Throughout this paper, lowercase boldface letters denote vectors, e.g., \mathbf{x} , and uppercase boldface letters denote matrices, e.g., \mathbf{A} . The superscripts T and \dagger mean transposition and Hermitian transposition, respectively. We let $\text{diag}(\mathbf{x})$ designate a diagonal square matrix whose main diagonal contains the elements of vector \mathbf{x} . The $N \times N$ identity matrix is denoted by \mathbf{I}_N . $\langle \mathbf{H} \rangle$ is the subspace that is spanned by the columns of matrix \mathbf{H} . “sup” denotes the supremum of a given subset and $\lfloor \cdot \rfloor$ the floor function. The distribution of a jointly proper Gaussian random vector with mean \mathbf{m} and covariance matrix $\mathbf{\Sigma}$ is denoted $\mathcal{CN}(\mathbf{m}, \mathbf{\Sigma})$. Finally, $\mathbb{E}\{\cdot\}$ denotes expectation and $\mathbb{P}(\cdot)$ is the probability measure.

II. EXPERIMENTAL DATA AND OBSERVATION MODEL

A. Dataset

Three autonomous hydrophones were deployed near the French territories in the Southern Indian Ocean from October 2006 to January and April 2008.¹⁶ The objective of the project was to monitor low-frequency acoustic signals, including those produced by large whales.¹⁷ The three instruments were widely spaced and located in the Madagascar Basin (hereinafter referred to as MAD), about 320 nautical miles (nm) south of La Reunion Island, and 470 nm to the northeast (NEAMS) and 350 nm to the southwest (SWAMS) of Amsterdam Island. Each mooring consisted of an anchor, an acoustic release, an autonomous hydrophone logging system composed of an International Transducer Corporation 1032 hydrophone, a preamplifier/filter and a digital recorder in a pressure-resistant titanium case and a flotation device. The mooring lines were anchored on the seafloor between 3410 and 5220 m depths and the hydrophones were deployed near the sound channel axis (SOFAR) between 1000 and 1300 m. The instruments recorded sounds continuously at a sampling rate of 250 Hz (useful frequency range 0.1–110 Hz).

As shown in Fig. 1 and observed in previous analyses,^{4,9,18} Z-calls from Antarctic blue whales are all included

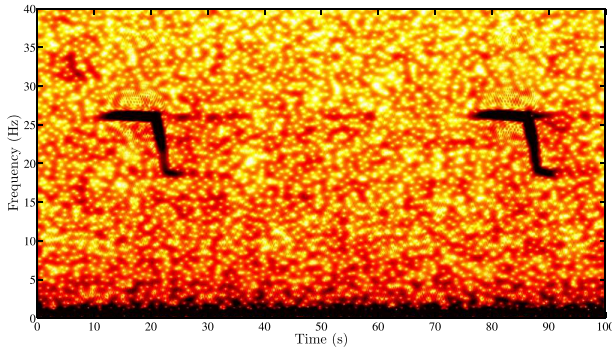


FIG. 1. (Color online) Spectrogram of two consecutive Z-calls.

in a frequency band ranging approximately from 15 to 30 Hz. To limit the processing time of estimation and detection algorithms, the original signal was band-pass filtered between 15 and 30 Hz, converted to a complex baseband signal¹⁹ and downsampled at a 18 Hz sampling frequency f_s . As detailed thereafter, Antarctic blue whales share the 15–30 Hz frequency channel with other transient sound sources that can either be anthropogenic, biological or abiotic. Therefore, given an observation window of N samples, the observation vector $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^N$ is here represented as

$$\mathbf{y} \triangleq \mu \mathbf{s} + \epsilon \boldsymbol{\psi} + \mathbf{w}, \quad (1)$$

where $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^N$ designates a blue whale call, $\boldsymbol{\psi} \in \mathbb{C}^N$ is some transient signal of no interest, and $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^N$ is the background noise. μ and ϵ are random variables valued in $\{0, 1\}$ modeling the possible presence or absence of \mathbf{s} and $\boldsymbol{\psi}$, respectively. The blue whale call detection strategy strongly depends on the nature of the three components \mathbf{s} , $\boldsymbol{\psi}$, and \mathbf{w} . Therefore, as a preliminary phase to detection, the properties of each of these components are presented in the next subsections.

B. Antarctic blue whale calls

As described in previous studies^{7,18} and shown in Fig. 1, Z-calls present a very discriminative time-frequency structure. This type of call has a “sigmoidal” shape that does not vary much from one call to the next. Note however that variants of this call consisting of the first tonal component only are sometimes observed.^{5,6}

The relative simplicity of Z-shaped patterns makes parametric modeling possible. Indeed, \mathbf{s} can be well approximated by frequency modulated signals, also named “chirps,” of the form

$$s(n) = a(n)e^{i\phi(n)}, \quad n = 0, \dots, N - 1, \quad (2)$$

where the amplitude $a(\cdot)$ and the phase $\phi(\cdot)$ are smoothly varying functions of time. Given the sigmoidal patterns that are shown by spectrograms, we suggest to model the time-varying phase based on a logistic model for the instantaneous frequency. More precisely, we assume that the instantaneous frequency can be expressed, prior to sampling and baseband conversion, as

$$f(t) \triangleq f_c + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = f_c + L + \frac{U - L}{1 + e^{\alpha(t-M)}}, \quad t \in \mathbb{R}^+, \quad (3)$$

where f_c is the central frequency of the 15–30 Hz bandwidth, i.e., $f_c = 22.5$. L , U , α , M denote the lower asymptote, upper asymptote, growth rate, and time shift of the logistic function, respectively. An example of this logistic function is shown in Fig. 2. The relation between $\phi(\cdot)$ and $f(\cdot)$ in Eq. (3) yields the following model for the discrete time-varying phase:

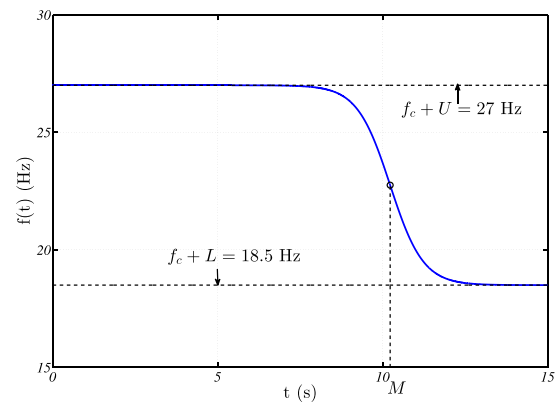
$$\phi(n) = 2\pi \left(U \frac{n}{f_s} + \frac{U - L}{\alpha} \ln \left(\frac{1 + e^{-\alpha M}}{1 + e^{\alpha(n/f_s - M)}} \right) \right) + \varphi_0, \quad (4)$$

where φ_0 is the initial phase.

Some of the parameters appearing in model (2)–(4) lie in a known interval and thus present bounded fluctuations from one whale call to another, while other parameters are totally unknown. For instance, the sigmoidal pattern of $f(t)$ does not seem to vary much over a year of observation. Manual measurements on spectrograms showed that $U \in [4, 5]$ Hz (i.e., upper frequency between 26.5 and 27.5 Hz) and $L \in [-4, -3]$ Hz (i.e., lower frequency between 18.5 and 19.5 Hz). The growth rate α can approximately be considered as constant with a value set to 2. In contrast, amplitude $a(\cdot)$ and initial phase φ_0 cannot be assumed to have fixed values from one observation to another because they strongly depend on the physical properties of the oceanic waveguide, which in turn is location and time dependent. In addition, leaving the time-varying amplitude as a free parameter allows model (2) to deal with the absence of the second tonal component in some calls or with the call duration fluctuation [$a(n)$ can be null for some $n_0 < N$].

C. Interference

Our observation system experiences interference generated by surrounding transient sources that share the same frequency bandwidth as Antarctic blue whales. Figure 3 shows some of the interferences observed in our dataset. It includes (a) airguns from seismic survey, (b) earthquakes, (c)

FIG. 2. (Color online) Instantaneous frequency derived from the logistic model ($L = -4$, $U = 4.5$, $\alpha = 2$, $M = 10.2$).

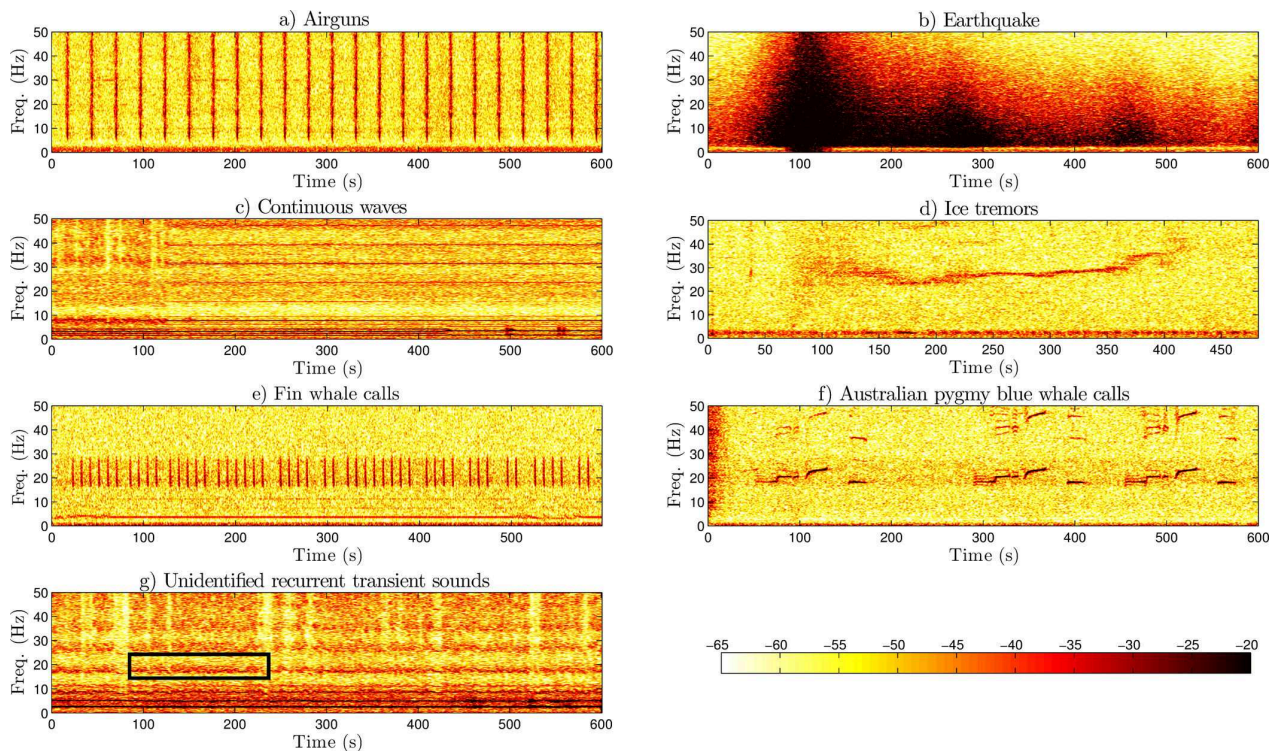


FIG. 3. (Color online) Spectrograms of the interference signals. The color scale is in dB with an arbitrary reference common for all subfigures.

continuous waves, (d) ice tremors, calls from other whales, such as (e) fin whale (20 Hz pulse), and (f) pygmy blue whale of the Australian type, and (g) a recurrent transient sound of unknown origin. Modeling these competing sources is usually not possible because their nature is generally not known exactly and often random. However, although there can be time-frequency overlaps between Z-calls and interferences, none of these interfering signals shows a “sigmoidal” pattern.

D. Background noise

Background noise results from the mixture of numerous unidentifiable ambient sound sources. As opposed to what is called interference in this work, background noise does not include any transient signal. A particularity of the 15–30 Hz bandwidth is that part of the background noise energy is due to the chorus emanating from very distant blue whale calls. From a detection perspective, this noise $\mathbf{w} \triangleq [w(0), \dots, w(N-1)]^T$ is a random process and is thus entirely characterized by the joint cumulative distribution function (cdf) of its variables $w(0), \dots, w(N-1)$. A statistical analysis conducted over 200h of data, *free of transient signals* and recorded at various time and locations, led to the conclusion that the background noise \mathbf{w} is stationary over periods of 300 s and can be modeled as a circularly-symmetric jointly Gaussian complex random vector.²⁰ It is referred to as $\mathbf{w} \sim \mathcal{CN}(0, \Sigma)$, where Σ is the $N \times N$ noise covariance matrix defined as $\Sigma \triangleq \mathbb{E}\{\mathbf{w}\mathbf{w}^\dagger\}$. The probability density of \mathbf{w} is thus expressed as $f_w(\mathbf{w}) = (1/\pi^N |\Sigma|) \exp(-\mathbf{w}^\dagger \Sigma^{-1} \mathbf{w})$.

No parametric model is assumed for Σ but, as discussed in Sec. III D, the knowledge of this matrix is required for setting the detection threshold of the proposed detection strategy. On the basis of observations, this covariance matrix can be fairly well estimated, even in the presence of transient signals s and ψ as long as their probability of occurrence is not too important. A simple robust estimation procedure for Σ is discussed in Appendix A. It will be used to estimate Σ on the experimental data (see Sec. IV).

III. DETECTION STRATEGY

Based on the observation model (1) and for each observation window of size N , our detection problem consists in deciding whether μ equals 0 or 1. The decision must be made whether the observation contains interfering signals ($\epsilon = 1$) or not ($\epsilon = 0$). This problem can be cast in the standard binary hypothesis testing framework,

$$\begin{cases} \text{Observation: } \mathbf{y} = \mu \mathbf{s} + \epsilon \psi + \mathbf{w}, \text{ with } \mathbf{w} \sim \mathcal{CN}(0, \Sigma), \\ \text{Null hypothesis } H_0: \mu = 0, \\ \text{Alternative hypothesis } H_1: \mu = 1. \end{cases} \quad (5)$$

In the absence of exact knowledge on both s and ψ , matched-filter-based detectors or likelihood ratio tests cannot be employed (complete knowledge of the distribution of \mathbf{y} under H_0 and H_1 cannot be assumed). To deal with this lack of knowledge on s and ψ , we propose a detection strategy that belongs to the family of “subspace detectors.” As proposed

by Scharf in Ref. 21 and later extended in Refs. 22–25, subspace detectors generalize matched-filters by accommodating signals that are not perfectly known but are only constrained to lie in a multidimensional subspace. Such types of detectors are widely used in radar and sonar applications. In the following subsection, the theory of subspace detectors is briefly reviewed to then be adapted to problem (5) in Secs. III B and III C. Theoretical performance of the proposed detection strategy is also derived in Sec. III D.

A. Subspace detectors

Subspace detectors are typically employed when, given a noisy observation $y = \mu s + w$, the signal s to be detected is a linear combination of p modes or basis vectors. In this case, s may be represented as $s = \mathbf{H}\theta$, where \mathbf{H} is a known $N \times p$ matrix and θ is a $p \times 1$ vector that contains the coordinates of s in the subspace spanned by the columns of \mathbf{H} . A simple example that fits in this model is the detection of a signal that is a sum of two cosinusoids, i.e.,

$$\begin{aligned}
 s(n) &= A_1 \cos(2\pi f_1 n + \phi_1) + A_2 \cos(2\pi f_2 n + \phi_2), n = 0, \dots, N - 1, \\
 &= A_1 \cos(\phi_1) \cos(2\pi f_1 n) + A_2 \cos(\phi_2) \cos(2\pi f_2 n) - A_1 \sin(\phi_1) \sin(2\pi f_1 n) \\
 &\quad - A_2 \sin(\phi_2) \sin(2\pi f_2 n).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Model (6) can also be written as a linear combination of $p = 4$ modes, i.e.,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} s(0) \\ s(1) \\ \vdots \\ s(N-1) \end{bmatrix}}_{\triangleq_s} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \cos(2\pi f_1) & \cos(2\pi f_2) & \sin(2\pi f_1) & \sin(2\pi f_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(2\pi f_1(N-1)) & \cos(2\pi f_2(N-1)) & \sin(2\pi f_1(N-1)) & \sin(2\pi f_2(N-1)) \end{bmatrix}}_{\triangleq_{\mathbf{H}}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 \cos(\phi_1) \\ A_2 \cos(\phi_2) \\ -A_1 \sin(\phi_1) \\ -A_2 \sin(\phi_2) \end{bmatrix}}_{\triangleq_{\theta}}.$$

In the case where \mathbf{H} and θ are known *a priori* by the detector (i.e., s is fully known), the matched-filter test can be applied and is equivalent to comparing the decision statistic $y^\dagger s$ to some threshold (Ref. 21, Chap. 4.9). However, in many applications such as radar, telecommunications or underwater acoustics, the propagation medium modifies the amplitude and the phase of the signal of interest so that θ is unknown. In this case, the theory of “matched subspace detectors” shows that the resolution onto a template, as used by the matched-filter, is replaced by a projection onto the signal subspace (Ref. 21, Chap. 4.11). The decision statistic is then proportional to $y^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{H}} y$, where $\mathbf{P}_{\mathbf{H}} \triangleq \mathbf{H}(\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^\dagger$ is the projection matrix onto subspace $\langle \mathbf{H} \rangle$. This statistic can also be written as $\|\mathbf{P}_{\mathbf{H}} y\|^2$, which represents the energy of y in subspace $\langle \mathbf{H} \rangle$. Subspace detectors are largely employed in signal processing because, in many cases, they satisfy strong optimality properties with respect to detection/false alarm probabilities.²²

B. Subspace of Z-calls

Applying a subspace detection strategy to problem (5) first implies to define a subspace where most of the Z-call energy does lie. Such a subspace can be determined based on model (2)–(4). Assume for now that the time-frequency shape of all Z-calls is constant, i.e., L, U are perfectly known (this assumption will be relaxed soon). In this case, the Z-call variability is due to the amplitude $a(\cdot)$ and the initial phase φ_0 . Although random, high SNR observations show

that this amplitude presents rather smooth time fluctuations. From a modeling perspective, this means that a Z-call s can be well approximated by a signal that has a time-varying phase described by Eq. (4) and an unknown time-varying amplitude that is piecewise constant with p pieces. s can therefore be represented as a linear combination of p modes

$$s \approx \underbrace{\begin{bmatrix} h_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & h_{p-1} \end{bmatrix}}_{\triangleq_{\mathbf{H}}} \times \begin{bmatrix} A_0 e^{i\varphi_0} \\ A_1 e^{i\varphi_0} \\ \vdots \\ \vdots \\ A_{p-1} e^{i\varphi_0} \end{bmatrix}, \tag{7}$$

where \mathbf{H} is a $N \times p$ matrix with $h_l \triangleq [e^{i\phi(l[N/p])}, e^{i\phi(l[N/p]+1)}, \dots, e^{i\phi((l+1)[N/p]-1)}]^T$ the l th basis vector of size $\lfloor N/p \rfloor$ and $\phi(\cdot)$ the time varying phase defined in Eq. (4). A_l denotes the amplitude of the l th signal piece and, as φ_0 , it is assumed unknown.

As discussed in Sec. II B, sounds produced by different whales as well as propagation variability may induce slight fluctuations of Z-calls time-frequency patterns (i.e., L and U are not constant). These fluctuations can easily be taken into account by extending the dimension of subspace $\langle \mathbf{H} \rangle$. More precisely, we propose to build a new multidimensional linear subspace spanned by a matrix \mathbf{Z} that concatenates three

$N \times p$ matrices, $\mathbf{H}^{(1)}$, $\mathbf{H}^{(2)}$, $\mathbf{H}^{(3)}$, each with its own set of parameters (\mathbf{L} , \mathbf{U}). Given the one Hz variability of \mathbf{L} and \mathbf{U} observed on our dataset, $\mathbf{H}^{(1)}$, $\mathbf{H}^{(2)}$ and $\mathbf{H}^{(3)}$ are built as in Eq. (7), with $(\mathbf{L}, \mathbf{U}) = (-3, 4)$, $(\mathbf{L}, \mathbf{U}) = (-3.5, 4.5)$ and $(\mathbf{L}, \mathbf{U}) = (-4, 5)$, respectively. Each Z-call is therefore modeled as

$$s \approx \underbrace{[\mathbf{H}^{(1)} | \mathbf{H}^{(2)} | \mathbf{H}^{(3)}]}_{\triangleq \mathbf{Z}} \times \boldsymbol{\theta}, \quad (8)$$

where $\boldsymbol{\theta}$ is the $3p \times 1$ vector that contains the unknown amplitudes and the unknown initial phase φ_0 . The projection matrix onto $\langle \mathbf{Z} \rangle$ is defined as $\mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \triangleq \mathbf{Z}(\mathbf{Z}^\dagger \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^\dagger$. Note that the choice of the values (\mathbf{L} , \mathbf{U}) is data-dependent. This is important to emphasize specifically because recent studies revealed a decrease over time in the tonality of Antarctic blue whale song.^{18,26–28}

Model (8) is obviously an approximation of reality but this approximation is valid in that most of the Z-call energy actually lies in subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$. In other words, $s^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} s$, the energy of the projection of s onto subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$, represents a large amount of its total energy $s^\dagger s$ when p is chosen large enough. Numerical analyses with high SNR observations and of size $N = 15 \times f_s$ show that choosing $p = 4$ is enough to get 75% of the total energy of s in $\langle \mathbf{Z} \rangle$. Note that as p increases, this ratio of energy increases as well but the chosen model becomes less discriminant. In the extreme case with $p = N$, any random signal of size N will satisfy $s^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} s = s^\dagger s$.

Using a subspace model for Z-calls is also very useful to bound our lack of knowledge on the interferences presented in Sec. II C. As stated previously, parametric modeling of interfering signals is not possible because they are very heterogeneous. However, they have not much in common with Z-calls. Using model (8) for s , such a difference can be formally transcribed. Indeed, the dissemblance between a blue whale call s and any interference $\boldsymbol{\psi}$ can be expressed by the fact that most of the interference energy does not lie in subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$, i.e.,

$$\frac{\boldsymbol{\psi}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \boldsymbol{\psi}}{\boldsymbol{\psi}^\dagger \boldsymbol{\psi}} \leq \tau, \text{ with } \tau \text{ small.} \quad (9)$$

Real data analysis suggests that, for $p = 4$, τ is lesser than 0.15 in most cases. However, note that most interferences are not orthogonal to Z-calls (i.e., $\tau > 0$) because of partial time-frequency similarities.

C. Detection structure

Although s and $\boldsymbol{\psi}$ are not perfectly known, the properties of s and $\boldsymbol{\psi}$ in relation to subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$ gives relevant information with respect to detection. More precisely, let \mathbf{x} be defined as

$$\mathbf{x} \triangleq \mu s + \epsilon \boldsymbol{\psi}. \quad (10)$$

Based on the analysis in Sec. III B, conclusions on the energy of \mathbf{x} in subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$ can be drawn for the four possible values of the pair (μ, ϵ) ,

- $(\mu, \epsilon) = (0, 0)$: \mathbf{x} is null, it satisfies $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{x} = 0$.

- $(\mu, \epsilon) = (0, 1)$: there is no Z-call, from Eq. (9) it follows that $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x} \leq \tau$.
- $(\mu, \epsilon) = (1, 0)$: a Z-call is present without overlapping interferences, from Eq. (8) it follows that $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x} > \tau$.
- $(\mu, \epsilon) = (1, 1)$: both a Z-call and an interfering sound are present. This case is not as “binary” as the previous ones. However, we recall that less than $\tau = 15\%$ of the interference power lies in subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$, whereas more of 75% of the Z-call power lies in $\langle \mathbf{Z} \rangle$. Therefore, as long as the interference power is in the same order of magnitude as the power of the signal of interest s , we can reasonably assume that $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x} > \tau$ still holds. Obviously, overlaps of Z-calls with high power interferences will automatically decrease the value of $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}$ (see Sec. IV A for a numerical analysis of the impact of $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}$ on the detection performance).

On the basis of these elements, the initial detection problem (5) can then be recast as follows:

$$\begin{cases} \text{Observation: } \mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{w}, \text{ with } \mathbf{w} \sim \mathcal{CN}(0, \boldsymbol{\Sigma}), \\ \text{Null hypothesis } H_0: \frac{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{x}}{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}} \leq \tau, \\ \text{Alternative hypothesis } H_1: \frac{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{x}}{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}} > \tau. \end{cases} \quad (11)$$

Problem (11) is based on hypotheses that involve \mathbf{x} . However, only noisy observation \mathbf{y} is available, so that further theory is needed to choose between the hypotheses. As detailed in Appendix B, by applying the theory of subspace detectors, it is shown that an efficient detector for problem (11) is

$$\mathcal{T}_\eta(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{\mathbf{y}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{y}}{\mathbf{y}^\dagger (\mathbf{I}_N - \mathbf{P}_{\mathbf{Z}}) \mathbf{y}} > \eta, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

The decision to accept the alternative hypothesis is made when the statistic $\mathbf{y}^\dagger \mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{y} / \mathbf{y}^\dagger (\mathbf{I}_N - \mathbf{P}_{\mathbf{Z}}) \mathbf{y}$ is greater than threshold η . This statistic can also be written as $\|\mathbf{P}_{\mathbf{Z}} \mathbf{y}\|^2 / \|\mathbf{P}_{\mathbf{Z}}^\perp \mathbf{y}\|^2$, which represents the ratio between the energy of the observation in $\langle \mathbf{Z} \rangle$ and its energy in the space orthogonal to $\langle \mathbf{Z} \rangle$. Note that the optimality properties of Eq. (12) with respect to false alarm and detection probabilities are discussed in Appendix B.

D. Detection threshold and theoretical performance

Formal analysis of the impact of threshold η on the detection performance is of prime importance for two main reasons. First, it is the only way to find the right compromise between false alarms and correct detections without resorting to *ad hoc* procedures relying on extensive Monte Carlo simulations or (subjective) human inspection of the data. Second, knowledge of the detection performance is needed for higher level analysis such as population density estimation.¹⁵ To derive the performance, we first consider the case of a single observation window of size N and then adapt it to the situation that occurs in practice when analyzing long time-series.

The probability of correct detection P_{det} is defined as the probability that the output of test (12) is 1 when H_1 is satisfied. Similarly, the probability of false alarm P_{fa} is defined as the probability that the output of test (12) is 1 when H_0 is satisfied. Both probabilities depend on threshold η as well as on the signal \mathbf{x} under test. Formally, they are defined as

$$P_{\text{det}}(\eta, \mathbf{x}) \triangleq \mathbb{P} \left[\mathcal{T}_\eta(\mathbf{x} + \mathbf{w}) = 1 \mid \frac{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x}}{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}} > \tau \right], \quad (13)$$

$$P_{\text{fa}}(\eta, \mathbf{x}) \triangleq \mathbb{P} \left[\mathcal{T}_\eta(\mathbf{x} + \mathbf{w}) = 1 \mid \frac{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x}}{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}} \leq \tau \right]. \quad (14)$$

Analytic expressions of these probabilities are derived in Appendix C.

Detection threshold η is set so as to guarantee a given probability of false alarm. As it explicitly appears in Eq. (14), this probability depends on the actual interference \mathbf{x} that occurs under H_0 . For instance, \mathcal{T}_η is not very likely to mistake an earthquake sound for a Z-call because, for such a sound, $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}$ is very low. However, short impulses, such as airgun sounds whose time-frequency pattern in the 15–30 Hz bandwidth is close to a Z-call downsweep, are more likely to be mistaken for Z-calls. In this case, $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}$ is actually close to the limit $\tau = 15\%$. Therefore, in order to guarantee a user-specified probability of false alarm, whatever the time-frequency shape of the interferences that occur under H_0 , the choice of threshold η relies on the “worst-case” false alarm probability of \mathcal{T}_η , defined as

$$\alpha(\eta) \triangleq \sup_{\mathbf{x} \in \mathbb{C}^N: \mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x} \leq \tau} P_{\text{fa}}(\eta, \mathbf{x}). \quad (15)$$

The procedure to compute $\alpha(\eta)$ is presented in Appendix D. If we are given a single observation window of size N and user-specified worst-case false alarm probability α_0 then the detection threshold η^* is chosen such that $\alpha(\eta^*) = \alpha_0$. However, in practice we are given long time-series to analyze, without knowing the time-of-arrival of each individual call. The standard detection approach in this situation is to repeat test \mathcal{T}_η on a sliding window of size N with an overlap of $N - \Delta$ samples between consecutive windows. To limit artificial multiple detections of a single call inherent to the use of overlapping windows, a simple rule based on the occurrence rate of Z-calls is applied: the time interval between two consecutive detections must be greater than 20 s. Note that this may, however, lead to missed detection of partially overlapping calls. The global procedure for setting the detection threshold is therefore the following:

- (1) set the global false alarm probability to some predefined value α_g ,
- (2) compute the corresponding false alarm probability of each individual test with N samples as²⁹ $\alpha_0 = 1 - (1 - \alpha_g)^{\Delta / (20 \times f_s)}$,
- (3) choose the threshold η^* that satisfies $\alpha(\eta^*) = \alpha_0$ (using the method presented in Appendix D).

Note that, as shown in Appendixes C and D, Eq. (15) depends on the noise covariance matrix Σ . Therefore, each

time Σ changes (every 300 s, as discussed in Sec. II D), the detection threshold is automatically updated so as to guarantee that the user-specified false alarm probability α_g is not violated. In addition, from the noise covariance matrix estimate, it is also possible to tag each detection with its signal-to-noise ratio, which can be a useful metric to filter detections for post-processing.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

Performance of the proposed detection method is first analyzed on the basis of the theoretical results derived in Sec. III D. It is then illustrated through a comparison of results obtained on real data with XBAT developed by the Cornell University Laboratory of Ornithology.³⁰ In this section, detector (12) is termed “Z-detector” and is set with the following parameters: $\tau = 0.15$, $p = 4$, and $N = 15 \times f_s$. Unless otherwise stated, its “worst-case” false alarm probability α_g is to 3% and the overlap between consecutive windows is set to $N - 4$, which corresponds to a precision on the time-of-arrival of approximately ± 100 ms for $f_s = 18$ Hz (recall that f_s is the sampling frequency of the baseband signal).

A. Illustration of theoretical performance

Thanks to Eq. (C3) in Appendix C and Eq. (15), we are in position to formally quantify the achievable performance of the Z-detector (12) without resorting to Monte Carlo simulations. Figure 4 shows the detection probability of test \mathcal{T}_η , with $\Sigma = \mathbf{I}_N$, as a function of size α_0 and for different signal-to-noise ratios (SNRs). The SNR is here defined as

$$\text{SNR} = \frac{\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}}{\text{trace}(\Sigma)}, \quad (16)$$

where $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}$ is the energy of the signal \mathbf{x} , and $\text{trace}(\Sigma)$ is the noise energy, computed as the sum of the diagonal elements of the noise covariance matrix Σ .

Under H_1 , the actual amount of energy of \mathbf{x} in subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$ is set to $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x} / (\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}) \triangleq \rho_1 = 0.75$. Such a value corresponds to typical situations where there are no overlaps between Z-calls and interfering signals. Figure 4 indicates

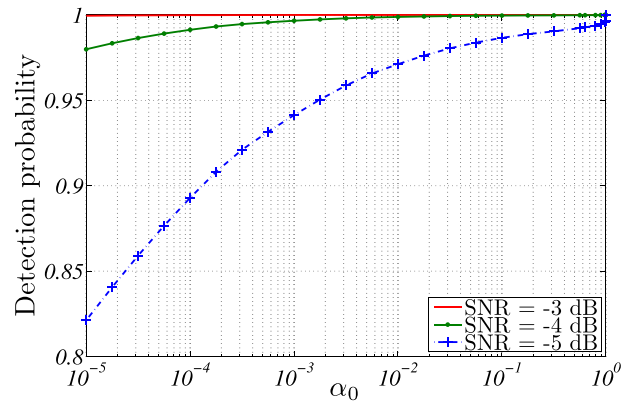


FIG. 4. (Color online) ROC curves of test (12). $\tau = 0.15$, $N = 15 \times f_s$, $\Sigma = \mathbf{I}_N$, $\rho_1 = 0.75$.

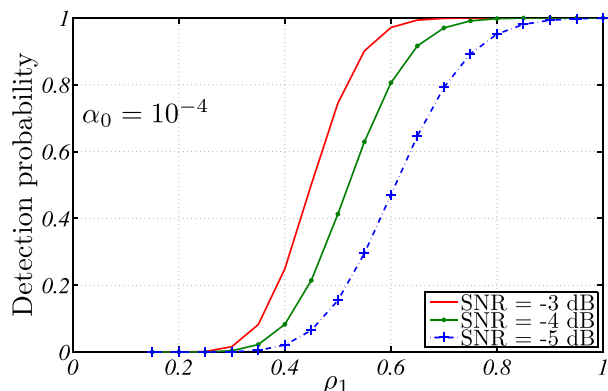


FIG. 5. (Color online) Detection probability as a function of ρ_1 . $\tau=0.1$, $N=15 \times f_s$, $\Sigma = \mathbf{I}_N$, $\alpha_0 = 10^{-4}$.

that in this case the proposed detector is very reliable for a SNR as low as -3 dB. Note, however, that this value is slightly optimistic as, for simplicity, the background noise is here chosen as white, which is rarely the case in practice.

The impact of ρ_1 on the detection performance is illustrated through Fig. 5. As expected, the better \mathbf{x} matches the logistic model (2)–(4) the more easily \mathcal{T}_η is able to discriminate H_1 from H_0 . Overlaps of blue whale calls with high power interferences will automatically decrease the value of ρ_1 , which in turn will affect the detection performance.

B. Comparison with spectrogram-based detections

As discussed in the Introduction, standard methods for detecting whale calls are mostly based on spectrogram correlation techniques.^{5,11,12} The XBAT software³⁰ offers such a functionality and is commonly used for analyzing blue whale calls.^{3,31,32} Consequently, a performance comparison between detector (12) and the XBAT detector is carried out. XBAT uses a spectrogram correlation technique, in which a pre-selected template of a Z-call is used to detect similar calls in the dataset. The choice of this template is highly subjective and strongly impacts the detector performance. Here, the Z-call template was chosen in order to have the best possible performance, particularly to minimize the number of false detections. The detection threshold of XBAT is set to 20%, as in Ref. 3, which results from a trade-off between the numbers of correct, false and missed detections. Performances of both detectors are analyzed in terms of correct-detection rate and number of false detections in

comparison with calls ground-truthed by an experienced human operator (EHO). All results are listed in Tables I, II, and III.

To assess the performance of the Z-detector, several contexts are examined:

- data with Z-calls and background noise (various SNR) but no interference ($\mu = 1$, $\epsilon = 0$),
- data with Z-calls, background noise and interferences ($\mu = 1$, $\epsilon = 1$),
- data with background noise and interferences but no Z-call ($\mu = 0$, $\epsilon = 1$)

1. Data with Z-calls and no interference

First, performances of both detectors are compared for data with Z-calls and no interference, and for various SNR. Based on a visual analysis, the EHO has divided the data with Z-calls in three classes: a class with powerful Z-calls, a class with Z-calls of very low intensity (for which the 18 Hz component of the call is almost lost within the noise), and an intermediate class. The SNR measurements reveal that for the first class, most calls have a SNR greater than 5 dB. For the class with low intensity Z-calls, the SNR is lower than -3 dB, and for the intermediate class, 90% of the calls have a SNR between 4 and -7 dB. Note that because the classes have been defined by the EHO, some SNR overlapping exists between the classes.

More than 22 h of acoustic data have been analyzed, which results in more than 1000 Z-calls visually detected by the EHO. Detection results for XBAT and the Z-detector are given in Table I. Our algorithm shows better correct-detection rates than XBAT, and therefore, lower missed-detection rates. Thus, without any interferences, the Z-detector clearly outperforms XBAT. Furthermore, for lower SNR, our algorithm has better performances, which means a better sensitivity than XBAT to detect low intensity Z-calls emitted by whales far from the hydrophone.

Note that both algorithms perform equally well in terms of false detections, with a false-detection number that is (nearly always) null. In this context without interference, it is expected that none of the algorithms makes wrong decisions.

2. Data with Z-calls and interferences

The major difficulty faced by a detection method is the presence of different transient sounds in the frequency range of the signal of interest. Therefore, to assess the performance

TABLE I. Detection performances of each detector for each class of Z-calls determined by the EHO. Performances are presented in terms of correct-detection rate, missed-detection rate, and number of false detections. For each metric, the number corresponding to the best performance is written in boldface. The total number of Z-calls detected by the EHO is given in the last column.

	Correct-detection rate		Number of false detections		Number of detections EHO
	XBAT	Z-detector	XBAT	Z-detector	
Powerful Z-calls	87.9%	96.7%	0	1	421
Intermediate Z-calls	60.7%	69.6%	0	0	415
Low intensity Z-calls	34.2%	51.6%	0	0	190

TABLE II. Detection performances of each detector in presence of each type of interference and Z-calls. Performances are presented in terms of correct-detection rate, missed-detection rate, and number of false detections. For each metric, the number corresponding to the best performance is written in boldface. The total number of Z-calls detected by the EHO is given in last column.

	Correct-detection rate		Number of false detections		Number of detections EHO
	XBAT	Z-detector	XBAT	Z-detector	
Earthquakes	40.3%	56.9%	0	0	318
Airguns	27.2%	53.1%	29	28	81
Continuous components	47.9%	58.5%	30	46	282
Unidentified sounds	60.8%	70.3%	4	4	344
Fin whale calls	74.9%	71.7%	0	3	247

of our detector in presence of such sounds, and to compare it with the XBAT detector, we have identified different types of interferences commonly found in the dataset. They are listed in Sec. II C and illustrated in Fig. 3. To assess the detection performance versus interference, data segments containing a single interference type are selected. Our approach differs from the method commonly used in literature, which consists in testing a detector on randomly selected datasets that are supposed to be representative of the entire database. This standard sampling methodology only provides average detection performance and is not very helpful for developing a robust detector. Consequently, similarly to Ref. 33, we prefer to build data subsets containing particular interferences rather than randomly chosen subsets.

The simultaneous presence of interferences and Z-calls was found only for five types of interferences: earthquakes, airguns, sounds with continuous components, unidentified recurrent transient sounds, and fin whale calls. The comparison of performance has been processed on more than 35 h of acoustic data, representing more than 1270 Z-calls. Detailed results can be found in Table II. Overall, in presence of interferences, the Z-detector outperforms XBAT in terms of correct-detection rate. XBAT outperforms our algorithm only in the presence of fin whale calls, but the difference is not significant. Regarding the number of false detections, it appears that both algorithms have nearly similar performances, although XBAT is slightly better than our algorithm.

3. Data without Z-calls

We also test the behavior of both detectors on data containing interferences but no Z-calls. Six types of

TABLE III. Detection performances of each detector in the presence of each type of interference and no Z-calls. Performances are presented in terms of number of false detections. The number corresponding to the best performance is written in boldface.

Interference type	Number of false detections	
	XBAT	Z-detector
Ice-event sounds	7	19
Airguns	65	52
Continuous components	17	16
Unidentified sounds	1	19
Fin whale calls	2	1
Australian pygmy blue whale calls	8	0

interferences are considered: ice tremors, airguns, sounds with continuous components, unidentified recurrent transient sounds, fin whales calls, and Australian pygmy blue whale calls. Note that the EHO did not find data with earthquakes only.

The comparison is made on more than 35 h of data. Detailed results are presented in Table III. Once again, both detectors have relatively similar number of false detections in the presence of interferences.

V. DISCUSSION

This study shows that the Z-detector has a better correct-detection rate than XBAT in almost every cases. Moreover, our algorithm is more flexible. Unlike XBAT, it is not based on a fixed template. The Z-detector automatically adapts its detection threshold to the noise conditions and it also takes into account frequency variations of blue whale calls observed intra-annually.^{18,26–28} However, this flexibility can lead to some false detections in presence of interferences. Nevertheless, both detectors have relatively similar numbers of false detections. Furthermore, it is essential to know that the performance of XBAT, especially the number of false detections, highly depends on the choice of the template. As an example, Fig. 6(a) shows the false detections obtained on data with interferences with the template that has been used for this study, and Fig. 6(b), the false detections obtained on the same data and with the same threshold, but with another template used in Ref. 3. When used on our data, the second template drastically degrades the performance of XBAT. Moreover, this performance is also affected by the actual choice of the spectrogram parameters. Finally, the choice of the detection threshold, which is critical for any detection method, is fixed and empirical for XBAT, whereas it is auto-adaptive and based on a quantitative performance criterion for the Z-detector (see Sec. III B).

The computation time of the Z-detector is approximately 200 times faster than real-time when run on a PC with a 2.6 GHz CPU and 2 GB of RAM. In its current implementation, the detector is not optimized for computation speed: it runs with MATLAB and does not benefit from parallel computing. This computation time is higher than the one required by a simple correlator with a fixed threshold (such as XBAT), but is still reasonable.

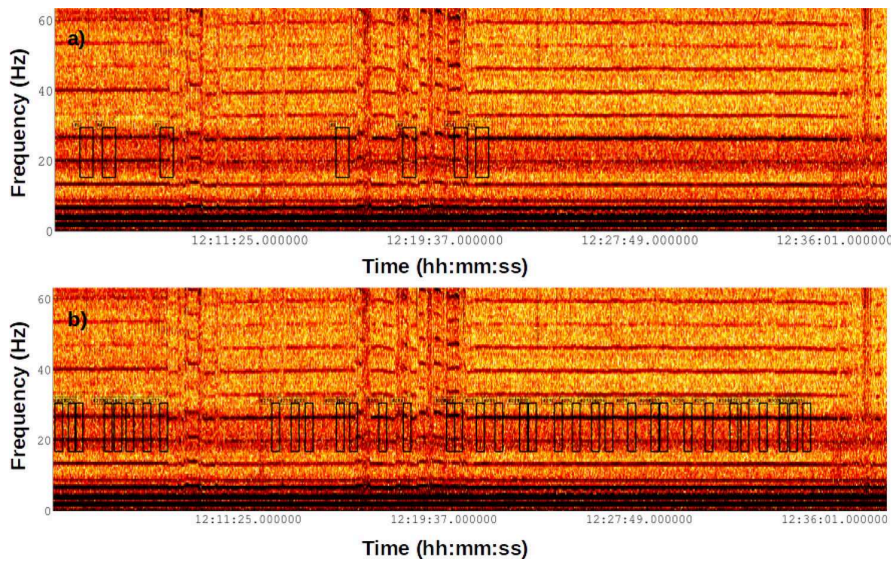


FIG. 6. (Color online) Example of the impact of the template choice on the number of false detections (represented by black rectangles) obtained for the same data and the same threshold with (a) the template used in this study, (b) another template (used in Ref. 3).

VI. CONCLUSION

To address the problem of detecting Z-calls produced by Antarctic blue whales in the presence of interfering transient sound sources, we proposed a method that relies on signal subspace modeling. On the one hand, this model exploits the sigmoidal shape of the Z-call instantaneous frequency that can be well described analytically by a logistic function and, on the other hand, it makes very little assumptions about the signal amplitude that is very dependent on the propagation conditions. We explicitly considered the possible presence of unwanted transient signals by assuming that such signals are not orthogonal to the Z-call subspace. The proposed detection strategy was shown to present strong optimality properties with respect to false alarm and detection probabilities.

The analytic expression of the detector performance was derived to keep this performance compliant to what is specified, whatever the background noise conditions are. This is made possible by regularly estimating the noise covariance matrix and updating the detection threshold. Although the performance derivation may be tedious, the obtained results are particularly important. Such results are indeed required to interpret detection outputs in terms of statistical analysis such as cue counting or abundance estimation. As a bonus resulting from its construction, the detector is able to tag each detection with its signal-to-noise ratio, which can be a useful metric to filter detections for post-processing.

Extensive comparisons with XBAT were also conducted in various types of soundscapes. They showed that the proposed detector has a correct-detection rate up to 15%–20% better than XBAT. Whether this improvement is significant is at the discretion of the reader. However, what is important is that the proposed detector is at least as good as a spectrogram correlator, while at the same time (a) allowing for variations in the received signal, (b) being robust to interferences, and (c) having controlled performances.

The proposed detection strategy could also be extended to other cases in which the signal of interest is fairly simple and presents a modest amount of variability. This

corresponds to typical situations where detection is performed on the basis of time-frequency masking or spectrogram correlation.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the captains and members of crew of RV Marion Dufresne and Cédric Brachet for deployment and recovery of the instruments through three cruises (MD157, MD165, and OP2008/1). They also thank Robert P. Dziak, Haru Matsumoto, and Joe Haxel for preparation of the hydrophones prior to the cruises, and Benjamin Ollivier for his help in analyzing the data.

APPENDIX A: ESTIMATION OF Σ

The main difficulty in estimating the noise covariance matrix comes from the possible presence of transient signals in the observation. One way to artificially limit the contamination of transient signals when estimating noise parameters is to find a sparse representation of the observation prior to the estimation. Transient signals are said to be sparse when they can be represented by coefficients that are mostly small except a few ones that have large amplitudes. As can be seen in Figs. 1 and 3, such a representation can be obtained by applying the short-term Fourier transform (STFT) to the observation. It concentrates transient signals around a few time-frequency bins. We suggest a three step procedure to estimate Σ .

Given any observation vector \mathbf{y} .

- (1) Apply a STFT on \mathbf{y} .
- (2) From the STFT, estimate the noise power spectral density (PSD) vector γ_w using, for each discrete frequency, a robust estimator of scale (such as those presented in Refs. 34–37).
- (3) Given the estimated PSD vector $\hat{\gamma}_w$, estimate the noise covariance matrix using the approximate³⁸ diagonalization based on the discrete Fourier transform (DFT),³⁹ i.e., $\hat{\Sigma} \approx \mathbf{F}^\dagger \text{diag}(\hat{\gamma}_w) \mathbf{F}$, where \mathbf{F} is the DFT matrix.

Although a theoretical analysis of robust estimators is out of the scope of this paper, some additional comments are needed. For step 2, conventional noise spectrum estimators such as Bartlett or Welch periodograms cannot be used because of the possible presence of outliers (i.e., transient signals) in the observation, robust methods are therefore required. A wide range of robust estimators can be used. As usual, the choice of the estimator is a compromise between performance, computational cost, and ease of implementation. A good compromise is obtained with the family of L-estimators^{34,35} that rely on linear combinations of order statistics. For the numerical results presented in Sec. IV, the 25th percentile value of each discrete frequency of the STFT is used as an estimate of γ_w . Note that in order to be Fisher consistent at the Gaussian distribution each of these values is multiplied by the coefficient $-1/\log(0.75)$.

APPENDIX B: DERIVATION AND OPTIMALITY OF TEST (12)

The derivation of a subspace detector usually relies on the identification of symmetries, or more generally invariances, of the decision problem at hand. To quote Lehmann and Romano,⁴⁰ invariances *provide natural restrictions to impose on the statistical procedures that are to be employed*. For instance, problem (11) is invariant to scaling. Multiplying the observation with some constant does not change the problem at hand, i.e., the measurement remains Gaussian and the value of tolerance τ remains the same. In fact, the invariance of our problem is a bit more general than just scaling. Under H_1 , \mathbf{x} actually belongs to a cone, whose axis is defined by subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$ and whose angle ξ between $\langle \mathbf{Z} \rangle$ and the orthogonal subspace $\langle \mathbf{Z}^\perp \rangle$ is such that $\cos^2 \xi = \tau$. Based on the observation \mathbf{y} , problem (11) is therefore equivalent to deciding whether \mathbf{x} belongs to this cone or not. It is known²¹ that the natural invariances of a cone are scaling, rotation around its axis, and symmetry with respect to the hyperplane $\langle \mathbf{Z}^\perp \rangle$. Such invariances can be formalized through the group

$$\mathcal{G} = \{g : g(\mathbf{y}) = \mathbf{T}\mathbf{y}, \mathbf{T} = \alpha(\mathbf{U}_Z^\perp \mathbf{R} \mathbf{U}_Z^{\perp\dagger} + \mathbf{P}_Z)\},$$

where α is an arbitrary scalar, \mathbf{U}_Z^\perp is a $N \times (N-p)$ matrix whose columns form an orthonormal basis for $\langle \mathbf{Z}^\perp \rangle$ and \mathbf{R} is a $(N-p) \times (N-p)$ unitary matrix. In other words, problem (11) is invariant to \mathcal{G} because $g(\mathbf{y})$ remains Gaussian and $g(\mathbf{x})^\dagger \mathbf{P}_Z g(\mathbf{x}) / g(\mathbf{x})^\dagger g(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}$ for all $g \in \mathcal{G}$.

Given these invariances, it is rather natural to restrict our attention to detectors invariant to \mathcal{G} . It is indeed desirable to find a test \mathcal{T} such that $\mathcal{T}(g(\mathbf{y})) = \mathcal{T}(\mathbf{y})$ for all $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^N$ and all $g \in \mathcal{G}$. One of the strongest property of optimality that could be hoped for such a test is the uniformly most powerful invariant (UMPI) property. This property states that for a given false alarm probability, the UMPI test is the one that yields the highest probability of detection among \mathcal{G} -invariant tests.

One of the classical method for deriving the UMPI test statistic is to first identify what is known as a maximal invariant statistic and then show that it has monotone likelihood ratio.²¹ A statistic $M(\mathbf{y})$ is said to be maximal invariant if^{21,40}

- (1) it is invariant, i.e., $M(\mathbf{y}) = M(g(\mathbf{y}))$ for all $g \in \mathcal{G}$,
- (2) it is maximal, i.e., $M(\mathbf{y}_1) = M(\mathbf{y}_2)$ implies $\mathbf{y}_2 = g(\mathbf{y}_1)$ for some $g \in \mathcal{G}$.

The monotone likelihood ratio guarantees that the larger the statistic $M(\mathbf{y})$ is, the more probable the alternative hypothesis H_1 looks.

Using properties of projection matrices (idempotence and $\mathbf{U}_Z^{\perp\dagger} \mathbf{P}_Z = 0$), it is clear that the ratio

$$M(\mathbf{y}) = \frac{\mathbf{y}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{y}}{\mathbf{y}^\dagger (\mathbf{I}_N - \mathbf{P}_Z) \mathbf{y}} \quad (\text{B1})$$

is maximal invariant to \mathcal{G} . Also, note that $\mathbf{y}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{y}$ and $\mathbf{y}^\dagger (\mathbf{I}_N - \mathbf{P}_Z) \mathbf{y}$ are independent random variables and that $M(\mathbf{y})$ is a ratio of quadratic forms in projection matrices. Assume for now that the noise is white, i.e., $\Sigma = \sigma^2 \mathbf{I}_N$. In this case, $M(\mathbf{y})$ can be expressed as the ratio of two non-central chi-square random variables. If we let γ denote the total energy of signal \mathbf{x} , i.e., $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x} \triangleq \gamma$ and ρ denote the actual percentage of its energy in subspace $\langle \mathbf{Z} \rangle$, i.e., $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x} \triangleq \gamma \times \rho$, then $M(\mathbf{y})$ satisfies $M(\mathbf{y}) = z_1/z_2$, where $z_1 \sim \chi_{2p}^2(2\gamma\rho/\sigma^2)$ and $z_2 \sim \chi_{2(N-p)}^2(2\gamma(1-\rho)/\sigma^2)$. We shall now slightly modify the maximal invariant statistic (B1) as follows:

$$\tilde{M}(\mathbf{y}) = M(\mathbf{y}) \times \frac{N-p}{p}. \quad (\text{B2})$$

$\tilde{M}(\mathbf{y})$ is therefore distributed according to a doubly non-central F-distribution with $2p$, $2(N-p)$ degrees of freedom and non-centrality parameters $2\gamma\rho/\sigma^2$, $2\gamma(1-\rho)/\sigma^2$. The mathematical expression of the cdf of such a distribution can be found in Ref. 41. What is important to note here is that $\tilde{M}(\mathbf{y})$ follows a distribution of a known form and, above all, that such a distribution is known to have a monotone likelihood ratio in some cases. More precisely, let $f_\rho(m)$ denote the density function of $\tilde{M}(\mathbf{y})$ parametrized by the scalar parameter ρ with N, p, γ fixed. For every pair $(\rho_1 > \rho_0, \rho_0)$ and for $N \rightarrow +\infty$, the ratio $f_{\rho_1}(m)/f_{\rho_0}(m)$ is a non-decreasing function of m . Therefore, for $\Sigma = \sigma^2 \mathbf{I}_N$ and according to Karlin-Rubin's theorem, the test $\mathcal{T}_\eta(\mathbf{y})$ defined in Eq. (12) is UMPI when $N \rightarrow +\infty$. Note that in our case the value of N is finite. However, in practice, $N = 15 \times 18 = 270$ (see Sec. IV), which is large enough to attain the asymptotic regime.

Proving the optimality of test (12) in the case where the noise is non-white is more involved since the density function $f_\rho(m)$ becomes very complex to analyze. The lack of a tractable density function in the non-white case enforces us to rather conjecture the UMPI property than to formally prove it. Extensive simulations using a numerical computation of the density as given in [Ref. 42, Eq. (5)] with various kinds of covariance matrices estimated from our dataset and different values for γ and (ρ_1, ρ_0) always returned a monotone likelihood ratio.

APPENDIX C: FALSE ALARM AND DETECTION PROBABILITIES

Computation of false alarm and detection probabilities rely on the so-called power function. Following standard definitions,⁴⁰ we define the power function of test \mathcal{T}_η as

$$\beta_x(\mathcal{T}_\eta) \triangleq \mathbb{P}[T_\eta(\mathbf{x} + \mathbf{w}) = 1]. \quad (\text{C1})$$

Let $\tilde{\mathbf{y}}$ denote the whitened observation vector, i.e., $\tilde{\mathbf{y}} \sim \mathcal{CN}(\boldsymbol{\Sigma}^{-1/2}\mathbf{x}, \mathbf{I}_N)$. The power function can then be expressed as

$$\begin{aligned} \beta_x(\mathcal{T}_\eta) &= \mathbb{P}\left[\frac{\mathbf{y}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{y}}{\mathbf{y}^\dagger (\mathbf{I}_N - \mathbf{P}_Z) \mathbf{y}} > \eta\right] \\ &= \mathbb{P}[\mathbf{y}^\dagger ((1 + \eta)\mathbf{P}_Z - \eta\mathbf{I}_N) \mathbf{y} > 0] \\ &= 1 - \mathbb{P}\left[\tilde{\mathbf{y}}^\dagger \boldsymbol{\Sigma}^{1/2} ((1 + \eta)\mathbf{P}_Z - \eta\mathbf{I}_N) \boldsymbol{\Sigma}^{1/2} \tilde{\mathbf{y}} \leq 0\right]. \end{aligned} \quad (\text{C2})$$

The matrix $\boldsymbol{\Sigma}^{1/2}((1 + \eta)\mathbf{P}_Z - \eta\mathbf{I}_N)\boldsymbol{\Sigma}^{1/2}$ being Hermitian, the results on quadratic forms presented in Ref. 43 then apply, which yields

$$\beta_x(\mathcal{T}_\eta) = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega + b} \frac{e^{-c}}{\prod_{p=1}^N (1 + \lambda_p(j\omega + b))} d\omega, \quad (\text{C3})$$

where

$$c = \sum_{p=1}^N \frac{\lambda_p |\mathbf{v}_p^\dagger \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \mathbf{x}|^2 (j\omega + b)}{1 + \lambda_p(j\omega + b)}. \quad (\text{C4})$$

λ_p are the eigenvalues of $\boldsymbol{\Sigma}^{1/2}((1 + \eta)\mathbf{P}_Z - \eta\mathbf{I}_N)\boldsymbol{\Sigma}^{1/2}$, \mathbf{v}_p the corresponding eigenvectors, and b some positive constant satisfying $1 + b\lambda_p > 0$ for all p . Note that the power function is characterized by a simple mono-dimensional integral which can be evaluated numerically or approximated using saddlepoint methods.⁴⁴

The probabilities of correct detection and false alarm are obtained from the power function. Given any threshold η , the probability of detecting a signal \mathbf{x} satisfying $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x} > \tau$ is simply obtained by computing Eq. (C3) with the actual signal \mathbf{x} under test. Similarly, the probability of wrongly detecting a signal \mathbf{x} satisfying $\mathbf{x}^\dagger \mathbf{P}_Z \mathbf{x} / \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x} \leq \tau$ is simply obtained by computing Eq. (C3) with this signal.

APPENDIX D: APPROXIMATION OF $\alpha(\eta)$

In the general case, an exact expression for $\alpha(\eta)$ cannot be obtained due to the complexity of the optimization procedure involved in Eq. (15). Maximizing the power function is difficult because the optimization is made over an N -dimensional vector \mathbf{x} . However, an approximation can be found by noticing that the power function mainly depends on the total energy of \mathbf{x} as well as its amount of energy in the cone rather than on its actual shape. More specifically, any signal \mathbf{x} satisfying H_0 can be expressed as

$$\mathbf{x} = \sqrt{\gamma} \mathbf{z} (\sqrt{\rho_0} \times \mathbf{P}_Z + \sqrt{1 - \rho_0} \times (\mathbf{I}_N - \mathbf{P}_Z)), \quad (\text{D1})$$

where $0 \leq \rho_0 \leq \tau$, $\gamma \triangleq \mathbf{x}^\dagger \mathbf{x}$, and $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^N$ with $\|\mathbf{z}\| = 1$. $\alpha(\eta)$ then satisfies

$$\alpha(\eta) = \sup_{\rho_0, \gamma, \mathbf{z} \in \mathbb{C}^N: \|\mathbf{z}\|=1} \beta_x(\mathcal{T}_\eta). \quad (\text{D2})$$

The worst case scenario, in terms of false alarm probability, arises when the signal \mathbf{x} is actually on the cone rather than outside, which is equivalent to say that the supremum over ρ_0 in Eq. (D2) is obtained when $\rho_0 = \tau$. In addition, if we assume that the shape of \mathbf{z} does not impact much the power function as long as its norm remains unitary, then the optimization is greatly simplified and can be solved as follows:

- choose any vector $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^N$ with $\|\mathbf{z}\| = 1$,
- set $\rho_0 = \tau$,
- maximize the power function over the scalar parameter γ , i.e., $\sup_\gamma \beta_x(\mathcal{T}_\eta)$, with \mathbf{x} defined as in Eq. (D1).

Note that the maximization over γ can simply be performed by searching on a grid that is bounded by the minimum and maximum signal-to-noise ratio of interferences, typically $-10 \leq 10 \log_{10}(\gamma / \text{trace}(\boldsymbol{\Sigma})) \leq 20$.

¹A. Sirovic, J. A. Hildebrand, S. M. Wiggins, and D. Thiele, "Blue and fin whale acoustic presence around Antarctica during 2003 and 2004," *Mar. Mammal Sci.* **25**, 125–136 (2009).

²A. N. Gavrilov and R. D. McCauley, "Acoustic detection and long-term monitoring of pygmy blue whales over the continental slope in southwest Australia," *J. Acoust. Soc. Am.* **134**(3), 2505–2513 (2013).

³F. Samaran, K. M. Stafford, T. A. Branch, J. Gedamke, J.-Y. Royer, R. P. Dziak, and C. Guinet, "Seasonal and geographic variation of southern blue whale subspecies in the Indian Ocean," *PLoS One* **8**(8), 1–10 (2013).

⁴D. Ljungblad, C. W. Clark, and H. Shimada, "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," *Rep. Int. Whal. Comm.* **48**, 431–437 (1998).

⁵K. M. Stafford, D. R. Bohnenstiehl, M. Tolstoy, E. Chapp, D. K. Mellinger, and S. E. Moore, "Antarctic type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans," *Deep Sea Res., Part I* **51**, 1337–1346 (2004).

⁶S. Rankin, D. Ljungblad, C. Clark, and H. Kato, "Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 IWC/SOWER circumpolar cruises, area V, Antarctica," *J. Cetacean Res. Manage.* **7**(1), 13–20 (2005).

⁷F. Samaran, O. Adam, J.-F. Motsch, and C. Guinet, "Definition of the Antarctic and pygmy blue whale call templates. Application to fast automatic detection," *Can. Acoust.* **36**(1), 93–103 (2008).

⁸A. Sirovic, J. A. Hildebrand, and S. 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).

⁹F. Samaran, C. Guinet, O. Adam, J.-M. Motsch, and Y. Cansi, "Source level estimation of two blue whale subspecies in southwestern Indian Ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* **127**(6), 3800–3808 (2010).

¹⁰K. M. Stafford, "Characterization of blue whale calls from the northeast Pacific and development of a matched filter to locate blue whales on U.S. Navy SOSUS (SOUND SURVEILLANCE SYSTEM) arrays," Master's thesis, Oregon State University, Corvallis (1995), pp. 1–79.

¹¹D. K. Mellinger and C. W. Clark, "Methods for automatic detection of mysticete sounds," *Marine Freshwater Behav. Physiol.* **29**(1–4), 163–181 (1997).

¹²D. K. Mellinger and C. W. Clark, "Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation," *J. Acoust. Soc. Am.* **107**, 3518–3529 (2000).

¹³M. F. Baumgartner and S. E. Mussoline, "A generalized baleen whale call detection and classification system," *J. Acoust. Soc. Am.* **129**, 2889–2902 (2011).

¹⁴A. M. Thode, K. H. Kim, S. B. Blackwell, C. R. Greene, C. S. Nation, T. L. McDonald, and A. M. Macrander, "Automated detection and localization of bowhead whale sounds in the presence of seismic airgun surveys," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**, 3726–3747 (2012).

- ¹⁵D. Harris, L. Matias, L. Thomas, J. Harwood, and W. H. Geissler, "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).
- ¹⁶R. P. Dziak, J.-Y. Royer, J. H. Haxel, M. Delatre, D. R. Bohnenstiehl, H. Matsumoto, J. Goslin, C. Brachet, and T. Lau, "Hydroacoustic detection of recent seafloor volcanic activity in the southern Indian Ocean," abstract, in *Transactions, American Geophysical Union, Fall Meeting*, T13 San Francisco, CA (2008).
- ¹⁷J.-Y. Royer, R. P. Dziak, M. Delatre, C. Brachet, J. H. Haxel, H. Matsumoto, J. Goslin, V. Brandon, D. R. Bohnenstiehl, C. Guinet, and F. Samaran, "Preliminary results from an hydroacoustic experiment in the Indian Ocean," abstract, in *Transactions, American Geophysical Union, Fall Meeting*, T13, San Francisco, CA (2008).
- ¹⁸A. N. Gavrilov and R. D. McCauley, "Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of Antarctic blue whales," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**(6), 4476–4480 (2012).
- ¹⁹Baseband conversion is a classical signal processing method allowing reduction of the sampling frequency of signals whose spectrum is limited to a narrow frequency band. In our case, the spectrum of the signal of interest occupies a 15 Hz bandwidth, centered around 22.5 Hz. The complex baseband signal is obtained by low-pass filtering the received signal downshifted to baseband (i.e., multiplied by $e^{-2\pi j(22.5/250)n}$, where n denotes the sample index). Its useful spectrum occupies the band $[-7.5, 7.5]$ Hz, so that the baseband signal can theoretically be downsampled at a sampling frequency as low as 15 Hz.
- ²⁰To test the noise's stationarity, the methodology described in Ref. 45 that compares the time-frequency structure between the original dataset and an artificially stationarized version of the data was used. With a significance level set to 5%, the test was successful for 88% of the data. The Gaussianity was tested with Lilliefors' test (Ref. 46) with a 5% significance level. 91% of our background noise dataset successfully passed this test.
- ²¹L. L. Scharf, *Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1991), pp. 1–524.
- ²²L. L. Scharf and B. Friedlander, "Matched Subspace Detectors," *IEEE Trans. Sign. Process.* **42**(8), 2146–2157 (1994).
- ²³S. Kraut, L. L. Scharf, and L. T. McWhorter, "Adaptive subspace detectors," *IEEE Trans. Sign. Process.* **49**(1), 1–16 (2001).
- ²⁴Y. Jin and B. Friedlander, "A CFAR adaptive subspace detector for second-order Gaussian signals," *IEEE Trans. Sign. Process.* **53**(3), 871–884 (2005).
- ²⁵F.-X. Socheleau and D. Pastor, "Testing the energy of random signals in a known subspace: An optimal invariant approach," *IEEE Sign. Process. Lett.* **21**(10), 1182–1186 (2014).
- ²⁶M. A. McDonald, J. A. Hildebrand, and S. Mesnick, "Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs," *Endangered Species Res.* **9**(1), 13–21 (2009).
- ²⁷A. N. Gavrilov, R. D. McCauley, C. Salgado-Kent, J. Tripovich, and C. Burton, "Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time," *J. Acoust. Soc. Am.* **130**(6), 3651–3660 (2011).
- ²⁸B. S. Miller, R. Leaper, S. Calderan, and J. Gedamke, "Red shift, blue shift: Investigating Doppler shifts, blubber thickness, and migration as explanations of seasonal variation in the tonality of Antarctic blue whale song," *PLoS One* **9**(9), e107740 (2014).
- ²⁹Note that this relation is rather pessimistic as it assumes statistical independence between overlapping windows. In practice, the actual false alarm will be slightly lower than what is specified.
- ³⁰XBAT, "eXtensible BioAcoustic Tool," www.birds.cornell.edu/brp/, Cornell Laboratory of Ornithology, Ithaca, NY (Last viewed 6/14/30).
- ³¹O. Boisseau, D. Gillespie, R. Leaper, and A. Moscrop, "Blue (*Balaenoptera musculus*) and fin (*B. physalus*) whale vocalisations measured from northern latitudes of the Atlantic Ocean," *J. Cetacean Res. Manage* **10**(1), 23–30 (2008).
- ³²F. W. Shabangu and K. Findlay, "Overview of the IWC IDCR/SOWER cruise acoustic survey data," Technical Report No. SC/65b/Forinfo 18, International Whaling Commission, 2014.
- ³³David K. Mellinger, "A comparison of methods for detecting right whale calls," *Can. Acoust.* **32**(2), 55–65 (2004).
- ³⁴P. J. Huber and E. M. Ronchetti, *Robust Statistics*, 2nd ed. (Wiley, Hoboken, NJ, 2009), pp. 1–354.
- ³⁵D. Pastor and F.-X. Socheleau, "Robust estimation of noise standard deviation in presence of signals with unknown distributions and occurrences," *IEEE Trans. Sign. Process.* **60**(4), 1545–1555 (2012).
- ³⁶F.-X. Socheleau, D. Pastor, and A. Aissa-El-Bey, "Robust statistics based noise variance estimation: Application to wideband interception of non-cooperative communications," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **47**(1), 746–755 (2011).
- ³⁷A. M. Zoubir, V. Koivunen, Y. Chakhchoukh, and M. Muma, "Robust estimation in signal processing: A tutorial-style treatment of fundamental concepts," *IEEE Sign. Process. Mag.* **29**(4), 61–80 (2012).
- ³⁸The approximation becomes an equality when N tends to infinity.
- ³⁹R. M. Gray, *Toeplitz and Circulant Matrices: A Review* (NOW, Hanover, 2006), pp. 1–90.
- ⁴⁰E. L. Lehmann and J. P. Romano, *Testing Statistical Hypotheses*, 3rd ed. (Springer, New York, 2005), pp. 1–784.
- ⁴¹C. Walck, *Handbook on Statistical Distribution for Experimentalists*, Internal Report No. SUF-PFY/96-01, Stockholm, 2000, pp. 1–190.
- ⁴²S. Broda and M. S. Paoletta, "Evaluating the density of ratios of noncentral quadratic forms in normal variables," *Comput. Stat. Data Anal.* **53**(4), 1264–1270 (2009).
- ⁴³T. Y. Al-Naffouri and B. Hassibi, "On the distribution of indefinite quadratic forms in Gaussian random variables," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT'09)* (2009), pp. 1744–1748.
- ⁴⁴R. Butler and M. Paoletta, "Uniform saddlepoint approximations for ratios of quadratic forms," *Bernoulli* **14**, 140–154 (2008).
- ⁴⁵P. Borgnat, P. Flandrin, P. Honeine, C. Richard, and J. Xiao, "Testing stationarity with surrogates: A time-frequency approach," *IEEE Trans. Sign. Process.* **58**(7), 3459–3470 (2010).
- ⁴⁶H. Lilliefors, "On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown," *J. Am. Stat. Assoc.* **62**, 399–402 (1967).

2.2 L'estimation des performances de détection : un enjeu important

2.2.1 Introduction

L'un des principaux avantages du *Z-detector* sont les performances contrôlées et connues théoriquement qu'il fournit. Connaître les performances d'une méthode de détection est primordial pour interpréter les résultats d'un site ou d'un ensemble de sites, mais aussi si l'on veut les comparer aux résultats d'études réalisées avec des méthodes de détection différentes. Ces dernières années, par exemple, plusieurs études par acoustique passive ont été menées sur les baleines bleues Antarctique, dans différentes régions australes et sub-tropicales (*e.g.* Širović et al., 2004; Stafford et al., 2004; Samaran et al., 2010b, 2013; Tripovich et al., 2015; Thomisch et al., 2016; Balcazar et al., 2017). Cependant, la diversité des méthodes de détection utilisées et la méconnaissance des performances de ces méthodes empêchent toute comparaison directe des résultats, et limitent ainsi les conclusions sur la répartition géographique et saisonnière de l'espèce à grande échelle. Cette problématique commence à être prise en compte, notamment dans le cadre du partenariat international de recherche sur l'océan Austral (*the Southern Ocean Research Partnership, SORP*¹) et de son volet sur le suivi circum-Antarctique des rorquals bleus et communs par acoustique passive. Ce projet vise à la mise en place d'un réseau d'hydrophones autour de l'Antarctique, le réseau SOHN (*Southern Ocean Hydrophone Network*; Van Opzeeland et al., 2013), pour compléter les observations existantes, ainsi qu'à l'instauration d'une méthode standardisée de traitement des données. L'objectif est de pouvoir conseiller aux analystes, selon le type de données enregistrées, la méthode de détection la plus appropriée. A ce jour cependant, les analyses comparatives des méthodes de détection des Z-calls sont rares. Elles nécessitent de pouvoir tester et analyser les performances des différentes méthodes sur des jeux de données acoustiques communs, annotés, représentatifs de diverses conditions de bruit, et constituant la "*vérité terrain*". En acoustique passive, cette *vérité terrain* se fonde sur un examen visuel des données et un pointé manuel des détections. En cas de données bruitées ou de signaux dégradés, ces détections manuelles peuvent être biaisées selon le degré d'acuité ou d'expérience de l'opérateur. Dans le cas des Z-calls de baleines bleues Antarctique, par exemple, la superposition de signaux émis à plus ou moins grande distance des hydrophones va générer un *chorus*, dans lequel il est parfois difficile de distinguer des signaux

1. <http://www.marinemammals.gov.au/sorp/antarctic-blue-whales-and-fin-whales-acoustic-program>

individuels. La décision d’enregistrer comme détection des signaux plus ou moins distincts au sein de ce chorus va alors dépendre de l’analyste et de sa sensibilité.

Afin d’évaluer l’influence de l’analyste sur la construction de la *vérité terrain* et sur l’estimation des performances de deux méthodes de détection, une étude a été menée en collaboration avec l’Institut Alfred Wegener (AWI) à Bremerhaven, en Allemagne. Pour cette étude, une base de données test a été constituée à partir d’enregistrements réalisés dans deux bassins différents, la mer de Weddell et l’océan Indien, et à deux sites par bassin, afin de couvrir la plus grande variabilité acoustique possible. Les données ont été sélectionnées pour tester l’effet de l’abondance de cris sur les performances de détection et celui de la présence ou non d’interférences. Concernant l’abondance des cris, trois scénarii ont été définis : forte abondance, abondance intermédiaire et faible abondance, et des jours ont été tirés au hasard dans des périodes répondant à chacun de ces critères, en se basant sur les résultats d’études précédentes réalisées sur ces données (Samaran et al., 2013; Thomisch et al., 2016). Concernant les interférences, celles-ci ont été répertoriées et des données contenant chaque type d’interférences isolément ont été extraites. Pour tester la “vérité” de la *vérité terrain*, deux opérateurs humains ont analysé ces données. Leurs détections ont été comparées afin d’évaluer la variabilité inter-analystes. De plus, les opérateurs ont ré-analysé deux nouvelles fois une partie des données pour évaluer la variabilité intra-analyste.

Les résultats obtenus mettent non seulement en évidence une influence très forte de l’analyste sur la construction de la *vérité terrain*, mais aussi une variabilité intra-analyste extrêmement importante. Pour s’affranchir de la variabilité inter-analystes, seules les détections communes aux deux analystes ont ensuite été conservées pour créer une *vérité terrain* sur laquelle s’est basée la comparaison de deux méthodes de détection : le *Z-detector* et une méthode de détection par corrélation de spectrogrammes, développée par l’équipe de l’AWI (Thomisch et al., 2016). Ces analyses font l’objet d’un l’article en préparation pour soumission dans le journal de la société acoustique américaine (*The Journal of the Acoustical Society of America, JASA*), reproduit ci-après.

2.2.2 Article en préparation pour soumission dans *The Journal of the Acoustical Society of America* en collaboration avec l’AWI

On the variability in acoustic annotations and automatic detections of Antarctic blue whale calls under different acoustic conditions

Emmanuelle C. Leroy,^{1, a)} Karolin Thomisch,² Jean-Yves Royer,¹ Olaf Boebel,² and Ilse Van Opzeeland²

¹*CNRS Laboratoire Géosciences Océan, University of Brest - IUEM, 29280 Plouzané, France*

²*Ocean Acoustics Lab, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, 27570 Bremerhaven, Germany*

(Dated: 17 October 2017)

Evaluation of the performance of computer-based algorithms to automatically detect mammalian vocalizations often involves and depends on comparisons between the detector output and a reference data set, *i.e.* logs of events obtained by manual annotating acoustic recordings by human analysts. To explore the reproducibility of such manual annotations and understand how variability impacts thereupon, we investigated inter- and intra-analyst variability in the manual detection of Antarctic blue whale (ABW) Z-calls in acoustic recordings representing different call abundance and background noise scenarios from two ocean basins. Manual annotations exhibited strong inter- and intra-analyst variability in Z-call detections, with $\leq 50\%$ agreement between both analysts. This variability is mainly caused by the presence of faint calls and ABW chorus, constituted of many overlaying calls emitted far from the hydrophone. Furthermore, the performance of two automated detectors, one based on spectrogram correlation and one using a subspace-detection strategy was evaluated by comparing detector output to a conservative manually annotated reference data set, which comprised only those events which both analysts had independently annotated. Our results show that the presence of the ABW chorus affects both manual annotations and automated detection procedures, due to the difficulty of reliably and reproducibly distinguishing between ABW chorus and single calls. This study highlights the need for a standardized approach of human annotations and automatic detection, including a quantitative description of their performance, to improve comparability of acoustic data, which is particularly relevant in the context of collaborative approaches of collecting and analyzing large passive acoustic data sets.

©2017 Acoustical Society of America. [<http://dx.doi.org/DOI number>]

[XYZ]

Pages: 1–11

I. INTRODUCTION

The use of passive acoustic observation techniques has become commonplace to gain insights into the distribution and behavior of marine mammals^{1,2}. Particularly for species inhabiting polar waters, where visual observations are seasonally restricted due to prevailing weather, light and ice conditions, passive acoustic data are an invaluable source of seasonally unbiased information^{3–5}. Antarctic blue whales (*Balaenoptera musculus intermedia*; referred to as ABW hereinafter) were one of the heaviest exploited species during the commercial whaling era and are currently listed as critically endangered by the International Union for Conservation of Nature (IUCN, www.iucn.org) with currently no reliable population estimates available⁶. Visual sighting data from the Southern Ocean, comprising the main feeding areas of this species, are rare due to the logistic and seasonal con-

straints of collecting sighting data in this region, complicating the acquisition of information on trends in population recovery based on visual surveys alone⁷. Over recent years, a number of studies have applied passive acoustic methods to study ABWs based on their vocalizations^{8–12}. Male ABWs produce stereotypic low-frequency Z-shaped calls ("Z-calls",¹³). These calls are comprised of three parts: a tonal unit A near 28 Hz and lasting about 7 to 12 s, a downsweep lasting 1 to 2 s, and a tonal unit B near 18 Hz^{13–15} (Figure 1). These vocalizations can be used to determine the acoustic presence of the species. However, a more holistic understanding of ABW behavior, patterns in seasonal presence, distribution and abundance on a circumantarctic scale, has to date mainly been hampered by the fact that passive acoustic data collection in the Southern Ocean has been rather patchy in time and space¹⁶. To gain a better understanding of circumantarctic spatio-temporal distribution patterns and abundances of Antarctic blue whales in the Southern Ocean, the Blue and Fin Whale Acoustic Trends Project¹⁷, as part of the Southern Ocean Research Partnership (SORP,¹⁸), aims

^{a)}emmanuelle.leroy@univ-brest.fr; Corresponding author.

to implement a long-term collective circumantarctic network of autonomous underwater recording devices, the SOHN (Southern Ocean Hydrophone Network;¹⁹). Once the network is in place and operational, uniform and standardized processing of the data sets is crucial for acquiring an understanding of trends in Antarctic blue whale (acoustic) abundances throughout the Southern Ocean. Automated detection methods form a suitable method to process large data sets and have been successfully applied to detect the stereotypic male ABW song^{8,10–12,20}. Nevertheless, to date no comparative analysis of Antarctic blue whale Z-call detectors exists, which complicates comparison between studies and datasets. In the context of the SOHN, such comparative analyses of detector performances are crucial for decisions on which data analysis procedures are most suitable for processing the individual data sets, forming the circumantarctic data set, in the most reliable and reproducible way. Furthermore, a profound understanding of detector performance and behavior under differing acoustic conditions is vital when automatically processed data are used for further applications, such as (acoustic) abundance estimations²¹. However, the assessment of the detector performance requires the comparison between the output of the automated detector and a ground-truth. Since no real ground-truth is available in passive acoustic monitoring (PAM), manually annotated reference logs are the most commonly used method to verify and compare the output of automated detectors^{22,23}, considering thus the human analyst as the "gold standard"²⁴. However, data processed by human operators are susceptible to subjectivity, depending on *e.g.* the acoustic data quality and the signal to noise ratio (SNR) of the signals of interest. Despite the fact that manually annotated logs usually form the reference against which detectors are compared, the implications of their subjectivity have rarely been addressed. Here, we therefore assess the potential impact of intra- and inter-analyst variability on manually analyzed reference data sets under different acoustic conditions. Then we evaluate the performance of two automated detection strategies under different acoustic conditions, using a conservative manually annotated reference data set, which comprised only those events which analysts had independently annotated.

II. MATERIAL AND METHODS

A. Passive acoustic data collection

Passive acoustic data from two ocean basins were selected to represent different acoustic environments with ABW vocalizations present. One data set was recorded in 2007 with a hydrophone array deployed in the Sound Fixing and Ranging channel (SOFAR) in the Southern Indian Ocean (referred to as SIO data hereinafter), as a part of the Deflo-Hydro project (see^{20,25} for details) (Figure 2). The second data set was collected in 2013 with passive acoustic recorders forming part of the Hybrid Antarctic Float Observation System (HAFOS, see¹¹

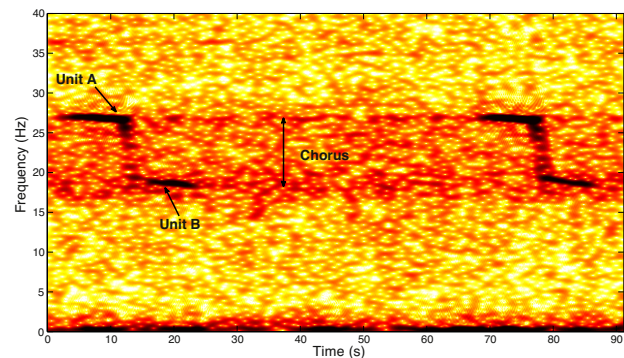


FIG. 1. (Color online) Spectrogram of two consecutive Z-calls recorded in the SIO. The noisy frequency band between 18 and 28 Hz is formed by the Antarctic blue whale and fin whale chorus.

for detailed information on the recordings) in the Weddell Sea (WS) and along the Greenwich meridian in the Atlantic sector of the Southern Ocean (referred to as WS data hereinafter) (Figure 3)^{11,26,27}. For each of the SIO and WS data sets, two spatially distant recording sites were selected to cover potential spatial variation in the acoustic conditions within the ocean basin: MAD (26°S, 58°E) and SWAMS (43°S, 74°E) for the SIO data set, and G59 (59°S, 0°E) and G69 (69°S, 0°E) for the WS data set (Figures 2 and 3). Passive acoustic data from all four sites were recorded on a continuous basis using sample rates of 250 Hz and 5.333 Hz for the SIO and WS data, respectively. All data were downsampled to 250 Hz prior to analysis.

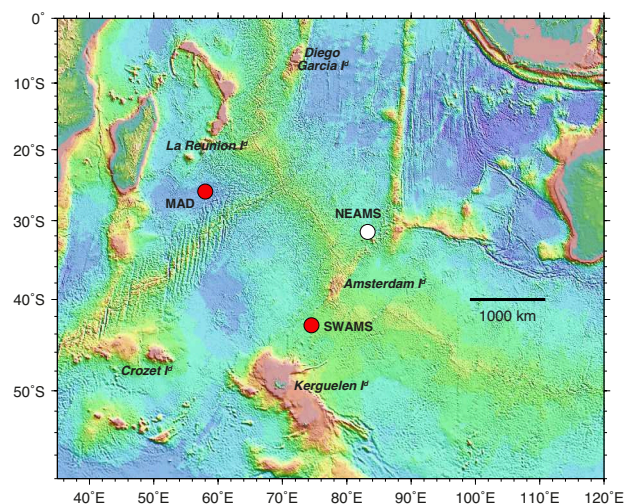


FIG. 2. (Color online) Hydrophone locations of the Deflo-Hydro network in the southern Indian Ocean. Recording sites used in this study are colored in red.

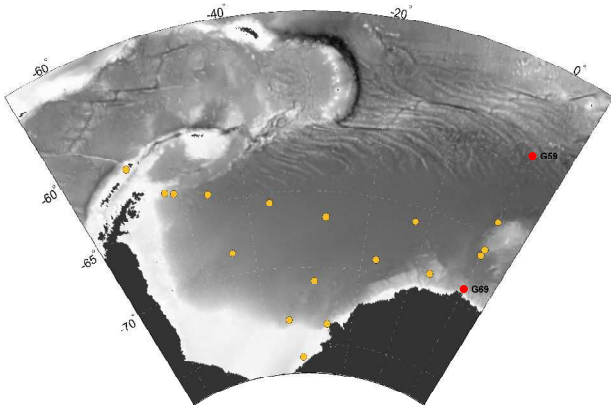


FIG. 3. (Color online) Hydrophone locations of the HAFOS network in the Weddell Sea. Recording sites used in this study are colored in red.

B. Test data set generation

Based on these passive acoustic data, two different test data sets were generated for the purpose of this study:

1. the *seasonal variation data set* to test the effect of the variability in the seasonal abundance of ABW calls on the performance of two different automated detection methods;
2. the *interference data set* to test the effect of potentially interfering sound sources that may affect the performance of the automated detectors.

1. Seasonal variation data set

To test how seasonal variability in Z-call abundance affects the performance of the two automated detectors, three different scenarios of Z-call rates were identified for each recording site for each ocean basin: high, intermediate and low call abundance. The data for these scenarios were selected based on previous analysis of the acoustic recordings⁽²⁰⁾ for the SIO, and⁽¹¹⁾ for the WS). From the set of days attributed to each of these three Z-call abundance scenarios, five days were randomly chosen for each recording site for each ocean basin. Thus, in total, the seasonal variation data set is composed of 60 days (5 random days \times 3 abundance scenarios \times 2 recording sites \times 2 recording basins)

Tables V and VI in Appendix provide an overview of the data as selected for each Z-call abundance scenario.

2. Interference data set

The interference data set serves to investigate if, how and which acoustic signals (other than Z-calls) affect the performance of the automated detectors. Sounds potentially interfering with the detection of ABW Z-calls occupy the same frequency band as the ABW Z-call (*i.e.* between 18 and 28 Hz) and/or, at least partially, fea-

ture tonal or frequency-modulated components resembling (parts of) an ABW Z-call. Overall, 9 different types of interfering sounds were identified, of which not all occurred in both basins (Figure 4). Airgun pulses and 20 Hz-pulses produced by fin whales (*B. physalus*) were present in both the SIO and WS data set. Calls from pygmy blue whales (Madagascan and Australian types, *B. m. brevicauda*), earthquakes, ice tremors, continuous sounds exhibiting wave-like acoustic structures in the spectrogram and a recurrent transient sound from an unknown source were exclusively present in the SIO data set. Vessel noise was only found in the WS data set. For the interference data set, the acoustic data recorded in each ocean basin (for the WS also including passive acoustic data from 2 further recording sites) were visually scanned to extract up to 10 hours of recordings for each interference sound type for data from both ocean basins (Table I and see Tables VII and VIII in Appendix).

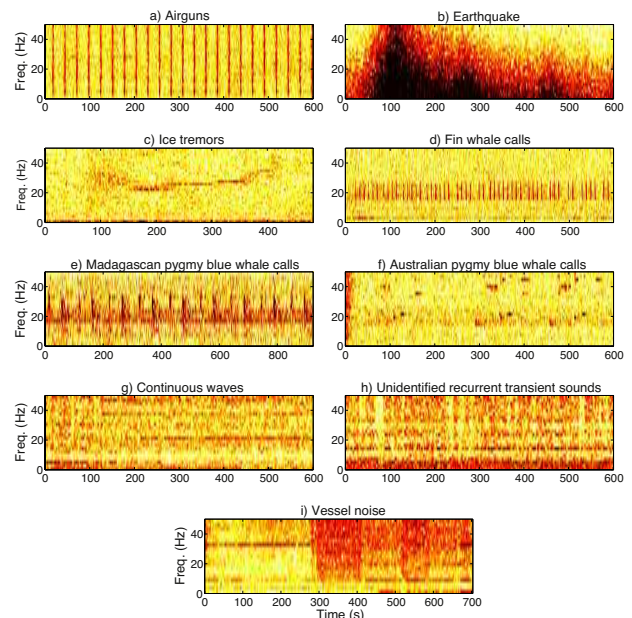


FIG. 4. (Color online) Spectrograms of the interfering signals.

C. Manual annotation of data sets

1. Manual annotation

The seasonal and the interference data sets were manually screened by two trained analysts for the presence of single ABW Z-calls, to create logs of manual annotations as required for assessing the performance of the automated detectors. Acoustic data were annotated by visually inspecting spectrograms created with Raven Pro 1.5 (Cornell Lab of Ornithology). Predefined, fixed spectrogram settings were used: Hanning windows with 50% overlap and 512-point FFT. Annotations were performed on 10 min-long windows covering the full frequency range

TABLE I. Number of hours of data per interference type extracted for each recording basin.

Interference type	Duration	
	SIO	WS
Airgun	10h	10h
Earthquake	5h15	–
Ice tremors	3h15	–
Fin whale calls	10h	10h
Madagascan Pygmy blue whale	10h	–
Australian Pygmy blue whale	10h	–
Continuous waves	10h	–
Unidentified transient sounds	10h	–
Vessel noise	–	10h

of the spectrogram, using pre-defined brightness and contrast settings. Annotations of all manually identified Z-calls were logged in text files created with Raven. For later evaluation of the automated detector performance, a reference log was created containing only those Z-call annotations that were identified independently by both analysts, constituting the "conservative reference annotation log".

2. Inter-analyst variability

To study the effect of the analyst on manual annotation logs, annotations of both analysts were compared for the seasonal variation data set using the *Compare Tables* tool available in Raven Pro 1.5 (<http://www.birds.cornell.edu/brp/raven/RavenVersions.html>²⁸). Events were evaluated for each analyst by comparing them to the annotations of the other analyst, which functioned as truth table. Events were considered:

- True Positive (TP): if the selection in the test table matches a selection in the truth table by overlapping it such that the midpoint of the time of the selection in the test table falls within the time bounds of the selection in the truth table or vice versa.
- False Positive (FP): if the event in the test table is not found in the truth table.
- False Negative (FN): if the event in the truth table is not found in the test table.

Note that this implies that the false positives of analyst 1 equal the false negatives of analyst 2, and vice versa, implying that no absolute false positive or negative is available.

3. Intra-analyst variability

To investigate the reproducibility of the manual annotation logs, 6 days of the *seasonal variation data set*, *i.e.* 10% of these data, were re-processed two times by

both analysts. Data were selected by randomly choosing one day per call abundance scenario for one recording site for each ocean basin. In total, each of these 6 days was thus processed three times by each analyst. Different sets of days were re-processed by the analysts. Analysts performed these trials blind, *i.e.* without information on their previous events logged or the logs of the other analyst. Trials were performed with some days in-between. The intra-analyst variability was evaluated by comparing the annotation logs between the three processing runs using the Raven Compare Tables Tool.

D. Automated processing of the test data sets

In the present study, the performances of two commonly used automated detection methods^{11,12,27} were evaluated. The Spectrogram Correlation-detector¹¹, hereinafter referred to as "SC-detector", is based on cross-correlating spectrograms with a pre-defined spectrogram template⁽²⁹⁾. The detection template (frequency range 18.5-28 Hz, 12 s duration) was created by averaging 100 high-quality Z-calls from different recorders and different years (see¹¹ for details). Spectrogram cross-correlation was performed in time/frequency space within a frequency band from 17.5 to 29 Hz to take into account potential intra- and inter-annual variation in the frequency of Z-call unit A³⁰⁻³². Recorder-specific detection thresholds were chosen such as to keep an average false-alarm level of 1%, averaged over the entire duration of the study period (see¹¹ for more details). For the SIO data, the detection threshold was calculated for each of the recording sites according to the procedure outlined by Thomisch *et al.*¹¹ by using 3 randomly chosen days per month of the study period.

The other Z-call detector (known as the *Z-detector*^{12,33}) is based on a subspace-projection algorithm, therefore referred to as the "SSP-detector" (for "SubSpace Projection") in the following. This algorithm models the Z-call shape with a logistical function which requires two parameters, U and L , respectively the frequencies of units A and B of a Z-call (Figure 1). To ensure flexibility with respect to the intra- and inter-annual variation in the frequency of Z-call unit A as mentioned previously, the parameters U and L were bracketed in a ± 0.5 Hz interval and the parameter U was adapted depending on the year of the treated recordings. The algorithm has an adaptive detection threshold, which depends on the ambient noise level, and ensures a maximum false-alarm probability of 3% (see^{12,33} for more details). False-alarm probabilities differed between both detectors and were deliberately kept at their original settings that had been evaluated as optimal for processing data from either the SIO or WS basin. By retaining these settings, the performance of the detectors on data from other regions could also be evaluated.

E. Assessing detector performances

To assess the performances of both automated detectors in different call abundance contexts, automated detection results were compared to the "conservative reference annotation log" (*i.e.* the reference log comprising only the annotations logged by both analysts) created previously, using the Raven Compare table tool, for both test data sets.

1. Seasonal variation data set

For the *seasonal variation dataset*, in accordance with Roch *et al.*³⁴ and Širović *et al.*²³, precision and recall are used to quantify the detector performance. Recall is the fraction of calls from the reference annotation log that are found by the automated detector:

$$\text{recall} = \frac{\text{number of TP}}{\text{number of calls in the reference annotation log}}$$

and precision is the fraction of the detected calls that are part of the reference annotation log:

$$\text{precision} = \frac{\text{number of TP}}{\text{total number of detected calls}}.$$

Mean recall and precision were calculated per basin and per call abundance scenario for both the SC- and SSP-detector.

2. Interference data set

To understand how the two automated detection methods each cope with the different types of interference sounds, the number of FPs was extracted from the comparison between automated detection results and the *conservative reference annotation log* for each interference type. From these numbers, FP rates were calculated by dividing the number of FPs detected in each sound file by the maximum number of possible FPs contained in the corresponding file. The maximum number of possible FPs was determined by manually counting the number of interfering sounds (*e.g.* the number of air-gun shots, fin whale pulses, pygmy blue whale calls) in each file, or, in the case of continuous sounds (*e.g.* earthquakes, continuous waves, unidentified transient sounds, vessel noise), by dividing the duration of the file by the maximum number of detections that each automated detector can perform (*i.e.* file duration / 15 s for the SC-detector and file duration / 20 s for the SSP-detector). Indeed to avoid multiple detection of a single event, a minimum interval between two detections of 15 s for the SC-detector¹¹ and of 20 s for the SSP-detector³³ was defined in the detection process.

III. RESULTS

A. Manual analysis

The manual annotations showed considerable variability between different analysts (inter-analyst variability), but also between different rounds of data analysis

conducted by the same analyst (intra-analyst variability).

1. Inter-analyst variability

The amount of agreement between the two analysts varied both between ocean basins and among call abundance scenarios (Figure 5). For the SIO data, the agreement between the analysts was highest for the intermediate abundance scenario, with $50 \pm 7\%$ (mean \pm s.e.) of all detected events found by both analysts, while $31 \pm 4\%$ and $20 \pm 5\%$ of the total number of detected events were missed by either analyst 1 or analyst 2, respectively (Figure 5). For the high abundance scenario, $41 \pm 8\%$ of the detected events were found by both analysts, while $34 \pm 5\%$ and $26 \pm 5\%$ of the total number of detected events were missed by either one of the analysts. The level of agreement is lowest for the SIO low abundance scenario, with about $22 \pm 4\%$ of all events detected by both analysts, while $39 \pm 4\%$ and $39 \pm 5\%$ of all detected events are missed by analyst 1 and 2, respectively. For the WS data, the highest agreement between the analysts ($49 \pm 6\%$ of all detected calls) was found for the high abundance scenario, whilst $49 \pm 6\%$ and $3 \pm 1\%$ were missed by analyst 1 and 2, respectively (Figure 5). For the intermediate scenario, $15 \pm 2\%$ of all detected events were found by both analysts, while $72 \pm 5\%$ and $13 \pm 5\%$ were only detected by analyst 1 and 2, respectively. For the low abundance scenario, the analysts agreed on $27 \pm 4\%$ of all detected events, while $65 \pm 5\%$ and $8 \pm 3\%$ of all events were missed by analyst 1 and 2, respectively.

Table II sums up the total number of calls per scenario and ocean basin that was detected by both analysts (*conservative reference annotation logs*) and the total number of calls that was detected by either of the analysts (*permissive reference annotation logs*). Table II shows that the conservative and permissive reference annotation logs differ substantially, with the permissive logs containing between 66% and 560% more call detections on average than the conservative logs, which is also reflective of the inter-analyst variability.

2. Intra-analyst variability

Analyst 1 tended to detect less calls per day in the first analysis rounds compared to the second and third rounds, regardless of the recording basin and the call abundance scenario (Figures 6 A). In comparison to the first analysis rounds, the number of detected calls in the SIO data increased by a factor between 4 and 8, for the second and third rounds of analyses, respectively. Between 66% and 88% of the calls detected in the first analysis rounds were also detected during analysis rounds 2 and 3 for the SIO data. For the WS data, the number of detections increased by a factor between 2 and 31 in the second and third rounds of analyses, while the proportion of re-detected calls ranged between 52% and 96% in the second and third analysis round, respectively. For the SIO data, analyst 2 detected more or the same number of calls during the second analysis rounds compared

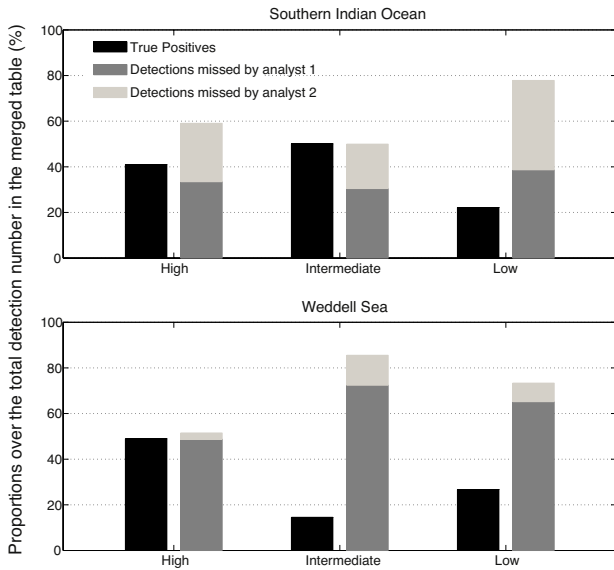


FIG. 5. Average percentage of TP (*i.e.* calls detected in common by both analysts) and of calls missed by either analyst 1 or analyst 2, over the total number of calls detected by either of the analysts.

TABLE II. Total number of calls detected in each abundance period per basin 1) in common between both analysts (Conservative reference annotation logs) and 2) combining detections from both analysts (Permissive reference annotation logs).

Basin	Period	Conservative reference annotation logs	Permissive reference annotation logs
SIO	High	3674	6082
	Intermediate	3290	5597
	Low	499	1618
WS	High	6047	11538
	Intermediate	571	3765
	Low	1571	5210

to the first analysis rounds, while in the third analysis rounds the number of detected call events is similar to or lower than the number of calls detected in the first rounds (Figures 6 B). Of all calls detected by analyst 2 in the first analysis rounds, between 63% and 76% were also detected in the second analysis rounds and between 31% and 60% were re-detected during the third rounds. For the WS data, the number of calls detected by analyst 2 decreased by a factor of 0.3 to 0.9 and of 0.3 and 0.8 in the second and third analysis rounds, respectively, compared to the first rounds. The proportion of re-detected calls ranged between 28% and 86% in the second analysis

rounds and between 31% and 76% in the third analysis rounds.

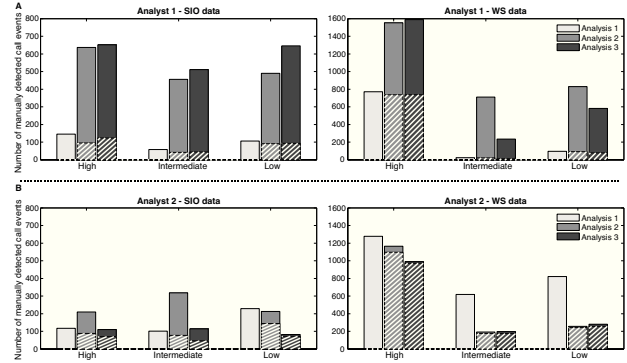


FIG. 6. Number of manually detected calls for each analysis round for A) analyst 1 and B) analyst 2, and part of these events which was re-detected during the second and third rounds in comparison to the first round (hatched part). Note that the re-processed days differ between analysts, thus figures A and B cannot be compared.

B. Assessment of the detector performances

1. Impact of call abundance

For both ocean basins and for each call abundance scenario, the SC-detector showed higher recall, but the SSP-detector performed with higher precision (Figure 7). However, both values remained below 0.6 for all but the WS high abundance scenario. For the SIO data, both methods had low recall (0.22 and 0.13 for the SC- and the SSP-detector, respectively) and precision (0.14 and 0.24 for the SC- and the SSP-detector, resp.) values for the low abundance scenario. These values were higher for the intermediate scenario (recall = 0.47 and 0.35, precision = 0.47 and 0.60 for the SC- and the SSP-detector, resp.) and the high abundance scenario (recall = 0.42 and 0.32, precision = 0.40 and 0.45). For the WS, recall values were generally slightly higher, with values above 0.3 for both methods and all abundance scenarios, but the precision remained below 0.4 for the low and intermediate abundance scenarios. Lower detector performances were observed for the low (0.42 and 0.34, precision = 0.23 and 0.33 for the SC- and the SSP-detector, resp.) and intermediate abundance scenarios (recall = 0.50 and 0.31, precision = 0.04 and 0.21), while both methods showed better performances for the high abundance scenario (recall = 0.86 and 0.72, precision = 0.30 and 0.63).

To examine the cause of these reductions in precision, Figure 8 shows the number of FPs for each scenario. It shows, that the number of FPs is larger for the SC-detector than for the SSP-detector. Moreover, the number of FPs is up to 10 times higher for the WS data than for the SIO data. The systematic double-check of each FP for both detectors shows that of all FPs, only a

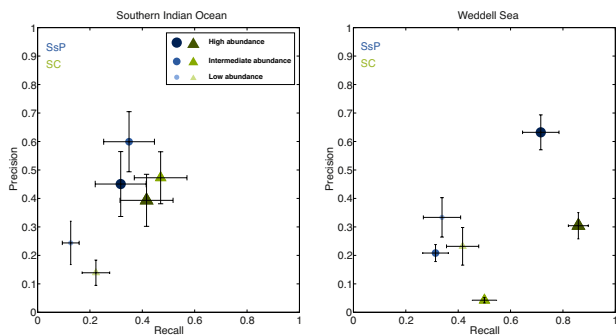


FIG. 7. (Color online) Recall and precision (means with standard errors) for the SsP (points) and the SC (triangles), for each abundance periods (light color and small marker for low abundance to dark color and big marker for high abundance) and each basin.

few can be attributed to the presence of interfering sound sources. All others represent detections within the ABW chorus: a noisy band generated by many overlapping Z-calls emitted far from the hydrophone, where individual calls are barely distincts (Figures 1 and 9). The hourly FP rate, calculated as the mean number of FPs caused by an interfering sound divided by the total number of hours per scenario for each basin (i.e. 240 h/period) is summarized in the Table III. For both detection methods, this hourly rate is low (below 0.15 FP/h).

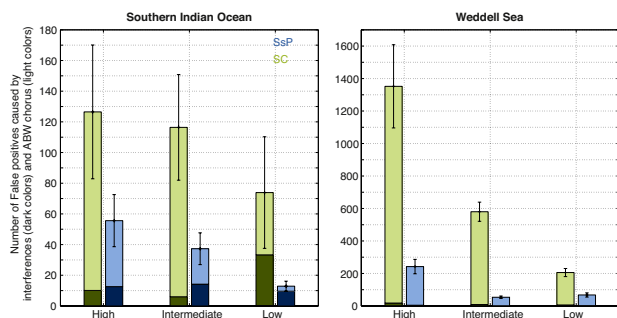


FIG. 8. Numbers of false positives (mean \pm s.e.) per call abundance period and basin for each detector (green : SC; blue : SsP) and their composition in FP caused by interfering sounds (dark colors) and false positives likely due to chorus (light colors).

2. Impact of interfering sound sources

When tested on data containing only interfering sound sources, the detectors sometimes display lower performances. Among all the interferences found in the SIO, the FP rate is particularly high for the SSP-detector when Australian pygmy blue whale calls (about 21%) and Madagascar pygmy blue whale calls (about 16%)

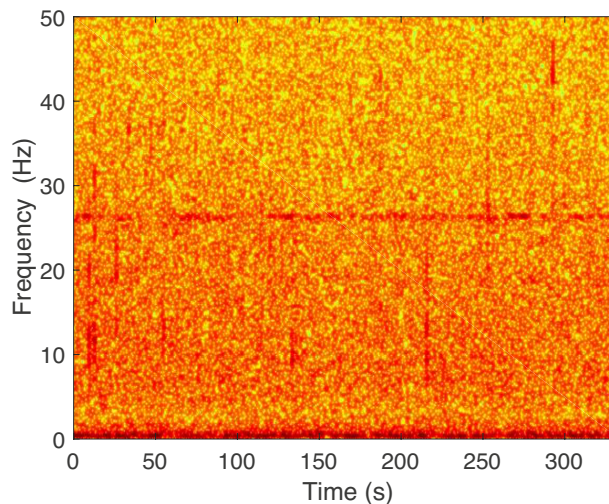


FIG. 9. (Color online) Antarctic blue whale chorus recorded in the Weddell Sea.

TABLE III. Mean number of FP/h per call abundance period and per basin for each automated detector.

Basin	Period	SC	SsP
SIO	High	0.04 FP/h	0.05 FP/h
	Intermediate	0.02 FP/h	0.06 FP/h
	Low	0.14 FP/h	0.04 FP/h
WS	High	0.07 FP/h	0.02 FP/h
	Intermediate	0.03 FP/h	0.006 FP/h
	Low	0.02 FP/h	0.009 FP/h

are present. FP rate furthermore is substantial (ca. 9%) in the presence of ice tremors. For the other interference types, FP rate remains below 3%. For the SC-detector, the FP rate is below 5% in all interference cases, except in the presence of earthquakes (12%). For the WS data, the FP rate is below 5% for both detection methods, except in the presence of airgun shots, which caused an FP rate of 18% for the SC-detector.

IV. DISCUSSION

A. How valid are reference data sets obtained by manual annotation?

In PAM studies, manual annotation often form the basis of initial evaluations of the performance of an automated detection algorithm before it is applied. However, despite the fact that manual annotation is known to be prone to subjectivity, its potential repercussions are rarely addressed by studies applying automated detection methods based on manually processed data. Urazghildiev *et al.*³⁵ reported differences in the performance of ex-

TABLE IV. False positive rate (mean \pm s.e.) of both automated detectors for each interference type found per basin. (pbw = pygmy blue whale)

Basin	Interference	SC	SsP
SIO	Airgun	0.5 \pm 0.2 %	3.0 \pm 1.4 %
	Earthquake	11.9 \pm 11.5 %	0.3 \pm 0.3 %
	Ice tremors	2.9 \pm 1.2 %	9.1 \pm 3.2 %
	Fin whale calls	0.5 \pm 0.2 %	2 \pm 0.9 %
	Madagascan pbw calls	4.7 \pm 1.7 %	16.2 \pm 15.1 %
	Australian pbw calls	3.1 \pm 3.1 %	20.6 \pm 9.6 %
	Continuous waves	4.7 \pm 4.3 %	2 \pm 1.1 %
	Unidentified transient sounds	0.4 \pm 0.2 %	0.5 \pm 0.1 %
WS	Airgun	17.9 \pm 5 %	4.4 \pm 1.1 %
	Fin whale calls	4.6 \pm 2.1 %	2.2 \pm 0.5 %
	Vessel noise	1.8 \pm 0.8 %	1.8 \pm 0.6 %

perienced human operators in detecting synthetic North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) calls and found analyst performance to decrease with decreasing SNRs of the calls, with the rate of decrease highly dependent on the individual analyst. In the current study, there was no such absolute knowledge of the number of calls against which the performance of the analysts could be evaluated. In high call abundance context, analysts agreement was largest, which likely relates to a higher number of calls with better SNRs compared to the other two scenarios. Overall, the inter-analyst differences also clearly indicated that one analyst logged more conservatively than the other analyst, suggesting an effect of analyst personality on the annotations, potentially analogous to the "splitter" and "lumper" analyst personalities³⁶. Both analysts annotated different subsets of the data for the intra-analyst comparisons, impeding comparisons of inter-analyst agreement after multiple runs. Urazghildiev *et al.*³⁵ also found that the number of calls that were detected varied within analysts, implying that an analysts sensitivity with which call events were detected is not constant over time. This is in accordance to the intra-analyst variability found here: analysts generally tended to become more conservative with successive rounds of analysis. Given that these repetitive trials took place throughout the analysis period, it is conceivable that this effect can be explained by the increasing experience of the analysts with analysis of SIO and WS data. Both analysts were inexperienced with passive acoustic data and the processing techniques. They were trained by annotating test data sets representative of the data that they would be processing. During this initial 10-day training period, they received feedback on the events they logged, while these data were not included in any of the actual data sets used for analyses. While the variability might have been somewhat less in the case of experienced analysts, ABW data are prone to variability in annotation behavior in experienced analysts, too. Given that trained

but (relatively) inexperienced interns play an important role in many labs in processing passive acoustic data, whether for initial quality control or creating reference annotation logs, we deliberately chose to conduct this work with trained, but inexperienced analysts.

The observed variability in the performance between and within analysts is most likely caused or mainly impacted by a combination of factors affecting the distinguishability of ABW Z-calls in passive acoustic recordings. In particular the presence of ABW chorus in the passive acoustic data likely affected the ability of human analysts to come to reproducible decisions when detecting single Z-call events. In the passive acoustic data recorded in the Weddell Sea, ABW chorus was present almost year-round, visible as a relatively narrow-band and often discontinuous tonal "line" (26-28 Hz) in the spectrographic view (Figure 9). In the presence of ABW chorus, faint Z-calls, consisting of only unit A, are easily blurred or (partly) masked. Under such circumstances, the analysts decision on whether an event should be classified as part of the chorus or as a single Z-call is rather subjective.

For the purpose of using the manually annotated data as reference for the detector evaluation, we decided to unify both references using a conservative approach: *i.e.* the reference data set represents an intersection, consisting of only those call detections which were found by all human analysts. The number of call detections in reference data sets varied by a factor of up to 7 on average (depending on the call abundance scenario) between the conservative and the permissive approach (Table II). Based on comparisons to the conservative reference data set, both automated detectors overall exhibited comparatively low values for precision and recall in most call abundance scenarios for both ocean basins, *e.g.* in comparison to the studies of Socheleau *et al.*³³ and Širović *et al.*²³. The overall lower number of events in the conservative reference data automatically results in a lower precision and recall of the automated detectors, compared to detector evaluations based on reference data collected by only one analyst³³.

B. Evaluation of the automated detectors

The SSP-detector showed higher precision values, while the SC-detector exhibited higher recall values for a given abundance scenario. Since the SC-detector detected more events than the SSP-detector, its probability to detect the same events as those detected by the analysts increases, explaining why it generally had higher recall values than the SSP-detector. On the other hand, this behavior also increased the number of false positives, leading to lower precision values for the SC-detector compared to the SSP-detector. However, the difference of performance between both detectors is mainly due to their different detection thresholds. Comparing both methods is not possible here: it would have required to set their detection thresholds in order to have a common

value of recall or precision, but was not the aim of the study.

The presence of interfering sounds can also considerably affect the performance of automated detectors by increasing their false positive rate, and hence decreasing the detectors precision value. When performance was tested for several types of interfering sound sources, the SSP-detector was found to be more sensitive than the SC-detector. This difference in sensitivity can be first explained by the different false alarm probabilities assumed for both detection methods. The detection threshold for the SC-detector is calculated to ensure an average false alarm rate of 1% (see¹¹ for more details), while the SSP-detector has a theoretical false alarm probability of 3%³³. Moreover, spectrogram-correlation, on which the SC-detector is based, is a more conservative method, given that it searches for the resemblance between a predefined, fixed template and the spectrogram. Unexpectedly, the most problematic interference types for the SSP-detector were the Australian and Madagascan pygmy blue whale calls. The Australian pygmy blue whale call contains a harmonic at around 18 Hz, which probably, for the SSP-detector, resembled a Z-call unit B. Madagascan pygmy blue whale calls with high signal-to-noise levels (SNRs) exhibit a downsweep at the beginning of the 25Hz-unit, which may mistakenly have been detected as the Z-call downsweep by the SSP-detector. The same explanation applies to the SSP-detectors false positive detections caused by fin whale pulses. Nevertheless, the number of false positives per hour caused by interferences contained in the *seasonal variation data set* was well below the false alarm probability theoretically assumed for both detectors (*i.e.* 1% for the SC-detector, 3% for the SSP-detector). For the SC-detector, which requires a minimum separation of 15 s between detected events, a 1% false alarm rate would correspond to a number of $3600/15 * 0.01 = 2.4$ *FP/h* on average. For the SSP-detector, which requires a delay of 20 s between two detections, a constant false alarm probability threshold of 3% would correspond to a maximum of $3600/20 * 0.03 = 5.4$ *FP/h*.

Alongside the manual analyses, the automated analyses were also significantly affected by the presence of the ABW chorus. This chorus is found in both the WS and the SIO data, but with characteristics that differ between basins. Indeed, in the SIO data the chorus consists of a broadband noise between ~ 18 Hz and ~ 27 Hz (see Figure 1 and¹²). Although to date this signal is acoustically not well understood, the SIO broadband chorus is thought to comprise both ABW Z-calls and fin whale 20 Hz-pulses. Since unit A of the ABW Z-call contains most energy, this unit likely contributes more energy to the chorus than the rest of the Z-call, while fin whale 20 Hz-pulses contribute energy throughout the ~ 18 to 27 Hz frequency band. In the WS, the chorus is mainly composed of acoustic energy from ABW Z-call units A, that is spectrographically represented by a more or less continuous narrow-band tone in the 26-28 Hz frequency range (see Figure 9). Since both detectors are able to

detect the remaining unit A of low SNR Z-calls which have lost their downsweep and/or unit B due to propagation effects, parts of the WS "narrow-band" chorus are more likely to be detected as Z-calls, compared to the SIO "broad-band" chorus. This is reflected in the higher FP rate due to chorus found for both detectors for the WS data. Also, the much higher number of chorus-related false positive detections for the SC-detector suggests its higher sensitivity to the chorus than the SSP-detector, explained by their different detection thresholds.

As the manual annotation, the automated detection was also influenced by Z-call abundance. As stated by Širović *et al.*²³, the precision of an automated detector with a constant false alarm rate will be worse in the case of a low call abundance, and comparatively better in the case of high call abundance. In addition, exploratory visual analyses of our data confirmed that the call abundance scenarios often also reflected different data qualities, with higher call abundances often related to an increasing presence of high SNR calls, and lower call abundances often related to an increasing presence of ABW chorus. As previously exposed, this chorus affects the ability of human analysts to come to reproducible decisions regarding the detections, in contrary to algorithms, which have fixed detection rules. This difference in behavior between human analyst and automated detectors regarding the chorus results in a lower agreement between them, explaining the low values of recall obtained for low abundance scenarios. The interrelationship between call abundance and ABW chorus presence, together with the difficulty of reliably distinguishing ABW chorus and single Z-calls, further complicates comparisons of performances of automated detection algorithms between data sets and studies.

C. Recommendations

Instead of recommending one of the detectors for future studies, this work has shown that a paradigm re-evaluation with respect to the role of manually processed ABW reference data, should have first priority. This study identified the presence of the ABW chorus as one of the main factors complicating reliable single ABW Z-call detection, but also reliable (manual) referencing of the data. In this context, a first step could be the development of appropriate metrics to assess the individual detection threshold of a human analyst as well as potential variation in this threshold and identify which acoustic conditions negatively affect the analysts performance. A promising approach to assess the detection performance of a human analyst is the use of artificial data sets for training purposes^{35,37}. Data sets containing a known number of ABW Z-calls under different acoustic conditions, *e.g.* in terms of ambient sound levels, presence of ABW chorus or other potentially interfering sound sources, can provide a tool with which the individual detection threshold of a human analyst and its potential variability can be objectively and reproducibly assessed. Artificial data sets containing a known num-

ber of Z-calls under varying acoustic conditions may furthermore be used in future studies to assess the performance of automated detection algorithms, without having to deal with analyst variability. Working with synthetic data sets however bears the risk that data are not sufficiently representative for in-situ acoustic conditions and their variability. Despite the fact that synthetic data sets can provide a standard for detector calibration, detector performance on real acoustic data sets may not necessarily be similarly predictable. Another approach to this problem might be constricting the definition of ABW Z-calls. In the current study, the presence of (at least) the ABW Z-call unit A was the main feature on which both manual and automated detection was based. Restricting annotations to only those signatures exhibiting (at least) both unit A and B, would block a significant part of the annotations, particularly for the WS data set, and increase the reproducibility of manual annotation. However, to avoid the effect of the analyst, the use of such restriction needs an objective criterium of decision, for instance a minimum value of SNR. For the detectors, increasing the detection threshold could function as a similar filter, provided that this threshold is based on the SNR of the event, and thus adapts to the ambient noise conditions. Such constraints would result in less detected single calls and the loss of acoustic presence information. However, if alongside the ABW single Z-call rate, a measure for chorus presence and intensity is provided as well, information regarding patterns in ABW acoustic presence will still be retained. Moreover, for the purpose of obtaining actual ABW call rates (*e.g.* in the context of density estimates) from automated analyses, it is desirable to restrict the detections to calls that are produced by animals that are within relative vicinity of the recorder so that the detection range can be determined. Restricting detections to calls with clear features would also restrict the spatial range over which calls are detected, automatically excluding calls from the chorus produced by more distant animals. A further solution could be to applying automated detection in a two-step process. In a two-step detection, the initial detection of potential call events could be followed by a second step applying a metric indicative of ABW chorus presence, for example by checking whether respective events exceeds a certain SNR threshold compared to neighboring time bins, after which the event is labeled as either chorus event or single event. Single events could then be weighted differently, or extracted for separate processing. Post-processing all detections by hand to remove false positives²³ is not a realistic approach for multi-year and/or multi-site data bases, such as for instance the SOHN project¹⁹. When the sheer size of the data set leaves automated processing as the only realistic solution, priority should be given to better understand the potential biases arising from the manual annotation so that automated detectors can be optimized or trained to reliably detect only the signals of interest.

ACKNOWLEDGMENTS

We wish to sincerely thank Lisa Ganz and Julia Mller for their manual analyses of the datasets and the precious work they have provided to this study. Many thanks the Captains and crews of RV Marion Dufresne for the successful deployments and recoveries of the hydrophones of the DEFLOHYDRO experiments. French cruises were funded by the French Polar Institute (IPEV; cruises MD157, VT95-MD165, VT96-OP2008), with additional support from INSU-CNRS and NOAA/PMEL. E.C.L. was supported by a Ph.D. fellowship from the University of Brest and from the Regional Council of Brittany (Conseil Régional de Bretagne).

- ¹D. K. Mellinger, K. M. Stafford, S. Moore, R. P. Dziak, and H. Matsumoto, "Fixed passive acoustic observation methods for cetaceans," *Oceanography* **20**(4), 36 (2007).
- ²S. M. Van Parijs, C. W. Clark, R. S. Sousa-Lima, S. E. Parks, S. Rankin, D. Risch, and I. van Opzeeland, "Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales," *Marine Ecology Progress Series* **395**, 21–36 (2009).
- ³S. E. Moore, K. M. Stafford, D. K. Mellinger, and J. A. Hildebrand, "Listening for large whales in the offshore waters of alaska," *BioScience* **56**(1), 49–55 (2006).
- ⁴C. W. Clark, C. L. Berchok, S. B. Blackwell, D. E. Hannay, J. Jones, D. Ponirakis, and K. M. Stafford, "A year in the acoustic world of bowhead whales in the bering, chukchi and beaufort seas," *Progress in Oceanography* **136**, 223–240 (2015).
- ⁵T. Dominello and A. Širović, "Seasonality of antarctic minke whale (*balaenoptera bonaerensis*) calls off the western antarctic peninsula," *Marine Mammal Science* (2016).
- ⁶S. Reilly, J. Bannister, P. Best, M. Brown, R. Brownell Jr, D. Butterworth, P. Clapham, J. Cooke, G. Donovan, J. Urbán, *et al.*, "Balaenoptera musculus. IUCN Red list of threatened species," , Gland, Switzerland: IUCN (2008).
- ⁷T. A. Branch, K. M. Stafford, D. M. Palacios, C. Allison, J. L. Bannister, C. L. Burton, E. Cabrera, C. A. Carlson, B. Galletti Vernazzani, P. C. Gill, *et al.*, "Past and present distribution, densities and movements of blue whales *Balaenoptera musculus* in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean," *Mammal Review* **37**(2), 116–175 (2007).
- ⁸A. Širović, J. A. Hildebrand, S. M. Wiggins, M. A. McDonald, S. E. Moore, and D. Thiele, "Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula," *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **51**(17), 2327–2344 (2004).
- ⁹B. S. Miller, J. Barlow, S. Calderan, K. Collins, R. Leaper, P. Olson, P. Ensor, D. Peel, D. Donnelly, V. Andrews-Goff, *et al.*, "Validating the reliability of passive acoustic localisation: a novel method for encountering rare and remote Antarctic blue whales," *Endangered Species Research* **26**(3), 257–269 (2015).
- ¹⁰N. E. Balcazar, J. S. Tripovich, H. Klinck, S. L. Nieukirk, D. K. Mellinger, R. P. Dziak, and T. L. Rogers, "Calls reveal population structure of blue whales across the southeast Indian Ocean and the southwest Pacific Ocean," *Journal of mammalogy* **96**(6), 1184–1193 (2015).
- ¹¹K. Thomisch, O. Boebel, C. W. Clark, W. Hagen, S. Spiesecke, D. P. Zitterbart, and I. Van Opzeeland, "Spatio-temporal patterns in acoustic presence and distribution of Antarctic blue whales *Balaenoptera musculus intermedia* in the Weddell Sea," *Endangered Species Research* **30**, 239–253 (2016).
- ¹²E. 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) (2016).

- ¹³D. K. Ljungblad, C. W. Clark, and H. Shimada, “Sc/49/sh17 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-International Whaling Commission **48**, 439–442 (1998).
- ¹⁴K. M. Stafford, D. R. Bohnenstiehl, M. Tolstoy, E. Chapp, D. K. Mellinger, and S. E. Moore, “Antarctic-type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans,” Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers **51**(10), 1337–1346 (2004).
- ¹⁵S. Rankin, D. Ljungblad, C. Clark, and H. Kato+, “Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 iwc/sower circumpolar cruises, Area v, Antarctica,” J. Cetacean Res. Manage **7**(1), 13–20 (2005).
- ¹⁶F. Samaran, K. M. Stafford, J. Gedamke, I. Van Opzeeland, B. Miller, O. Adam, M. Baumgartner, S. Mussoline, and G. Priesiat, “Acoustic trends in abundance, distribution, and seasonal presence of antarctic blue whales and fin whales in the southern ocean,” Annual Report of the Southern Ocean Research Partnership (SORP) 2011/12. Paper SC/64/O13 presented to the Scientific Committee of the International Whaling Commission, Panama City, Panama (2012).
- ¹⁷[Http://www.marinemammals.gov.au/sorp/antarctic-blue-whales-and-fin-whales-acoustic-program](http://www.marinemammals.gov.au/sorp/antarctic-blue-whales-and-fin-whales-acoustic-program).
- ¹⁸S. Childerhouse, “Southern ocean research partnership workshop: summary of outcomes,” International Whaling Commission. SC/61/O17 1–6 (2009).
- ¹⁹I. Van Opzeeland, F. Samaran, K. Stafford, K. Findlay, J. Gedamke, D. Harris, and B. S. Miller, “Towards collective circum-antarctic passive acoustic monitoring: the southern ocean hydrophone network (sohn),” Polarforschung **83**(2), 47–61 (2013).
- ²⁰F. Samaran, K. M. Stafford, T. A. Branch, J. Gedamke, J.-Y. Royer, R. P. Dziak, and C. Guinet, “Seasonal and geographic variation of southern blue whale subspecies in the Indian Ocean,” PloS one **8**(8), e71561–e71561 (2013).
- ²¹T. 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,” Biological Reviews **88**(2), 287–309 (2013).
- ²²T. M. Yack, J. Barlow, M. A. Roch, H. Klinck, S. Martin, D. K. Mellinger, and D. Gillespie, “Comparison of beaked whale detection algorithms,” Applied Acoustics **71**(11), 1043–1049 (2010).
- ²³A. Širović, “Variability in the performance of the spectrogram correlation detector for North-east Pacific blue whale calls,” Bioacoustics **25**(2), 145–160 (2016).
- ²⁴L. Thomas and T. A. Marques, “Passive acoustic monitoring for estimating animal density,” Acoustics Today **8**(3), 35–44 (2012).
- ²⁵J.-Y. Royer, R. Chateau, R. P. Dziak, and D. R. Bohnenstiehl, “Seafloor seismicity, antarctic ice-sounds, cetacean vocalizations and long-term ambient sound in the Indian Ocean basin,” Geophysical Journal International **202**(2), 748–762 (2015).
- ²⁶S. Rettig, O. Boebel, S. Menze, L. Kindermann, K. Thomisch, and I. van Opzeeland, “Local to basin scale arrays for passive acoustic monitoring in the Atlantic sector of the southern ocean,” (2013).
- ²⁷K. Thomisch, O. Boebel, D. P. Zitterbart, F. Samaran, S. Van Parijs, and I. Van Opzeeland, “Effects of subsampling of passive acoustic recordings on acoustic metrics,” The Journal of the Acoustical Society of America **138**(1), 267–278 (2015).
- ²⁸(2016), <http://www.birds.cornell.edu/brp/raven/RavenVersions.html>.
- ²⁹D. K. Mellinger and C. W. Clark, “Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation,” The Journal of the Acoustical Society of America **107**(6), 3518–3529 (2000).
- ³⁰M. A. McDonald, J. A. Hildebrand, and S. Mesnick, “Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs,” Endangered Species Research **9**(1), 13–21 (2009).
- ³¹A. N. Gavrilov, R. D. McCauley, and J. Gedamke, “Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of Antarctic blue whales,” The Journal of the Acoustical Society of America **131**(6), 4476–4480 (2012).
- ³²B. S. Miller, R. Leaper, S. Calderan, and J. Gedamke, “Red Shift, Blue Shift: Investigating Doppler Shifts, Blubber Thickness, and Migration as Explanations of Seasonal Variation in the Tonality of Antarctic Blue Whale Song,” PloS one **9**(9), e107740 (2014).
- ³³F.-X. Socheleau, E. Leroy, A. C. Pecci, F. Samaran, J. Bonnel, and J.-Y. Royer, “Automated detection of Antarctic blue whale calls,” The Journal of the Acoustical Society of America **138**(5), 3105–3117 (2015).
- ³⁴M. A. Roch, T. S. Brandes, B. Patel, Y. Barkley, S. Baumann-Pickering, and M. S. Soldevilla, “Automated extraction of odontocete whistle contours,” The Journal of the Acoustical Society of America **130**(4), 2212–2223 (2011).
- ³⁵I. R. Urazghildiiev and C. W. Clark, “Detection performances of experienced human operators compared to a likelihood ratio based detector,” The Journal of the Acoustical Society of America **122**(1), 200–204 (2007).
- ³⁶T. L. Rogers, “Factors influencing the acoustic behaviour of male phocids seals,” Aquatic mammals **29**(2), 247–260 (2003).
- ³⁷J. Ward, L. Thomas, S. Jarvis, N. DiMarzio, D. Moretti, T. A. Marques, C. Dunn, E. Hartvig, P. Tyack, *et al.*, “Passive acoustic density estimation of sperm whales in the tongue of the ocean, bahamas,” Marine Mammal Science **28**(4), E444–E455 (2012).

APPENDIX: SUPPLEMENTARY MATERIAL

TABLE V. Overview of selected days representing different call abundance scenarios forming the *seasonal variation data set* for the Southern Indian Ocean.

Recording position	Call abundance scenario	Analyzed recording days
26°S, 58°E (MAD)	High	07/17/2007
		07/29/2007
		08/18/2007
		08/29/2007
		08/31/2007
	Intermediate	04/02/2007
		04/25/2007
		06/03/2007
		10/02/2007
		10/23/2007
	Low	01/15/2007
		02/28/2007
		03/27/2007
		12/07/2007
		12/15/2007
43°S, 74°E (SWAMS)	High	08/10/2007
		08/14/2007
		08/19/2007
		08/25/2007
		08/28/2007
	Intermediate	09/06/2007
		10/04/2007
		10/21/2007
		11/09/2007
		11/23/2007
	Low	01/02/2007
		01/25/2007
		02/16/2007
		02/20/2007
		04/30/2007

TABLE VI. Overview of selected days representing different call abundance scenarios forming the *seasonal variation data set* for the Weddell Sea.

Recording position	Call abundance scenario	Analyzed recording days
59°S, 0°E (G59)	High	02/02/2013
		02/08/2013
		02/16/2013
		02/22/2013
		02/23/2013
	Intermediate	01/14/2013
		01/24/2013
		01/28/2013
		06/17/2013
		06/21/2013
	Low	04/03/2013
		04/04/2013
		04/16/2013
		05/11/2013
		05/20/2013
69°S, 0°E (G69)	High	02/05/2013
		02/12/2013
		02/19/2013
		02/20/2013
		03/01/2013
	Intermediate	03/17/2013
		03/20/2013
		03/21/2013
		03/27/2013
		03/28/2013
	Low	21/04/2013
		01/12/2013
		05/19/2013
		19/20/2013
		22/01/2013

TABLE VII. Overview of selected recordings containing different types of acoustic sources forming the *interference data set* for the Southern Indian Ocean.

Interference type	Recording position	Analyzed recording days	Amount of data analyzed per day
Airguns	26°S, 58°E (MAD)	03/14/2007	2h
	26°S, 58°E (MAD)	03/29/2007	0h30
	26°S, 58°E (MAD)	09/22/2007	2h30
	43°S, 74°E (SWAMS)	03/17/2007	2h
	43°S, 74°E (SWAMS)	12/09/2007	3h
Australian pygmy blue whale calls	43°S, 74°E (SWAMS)	04/16/2007	2h
	43°S, 74°E (SWAMS)	04/20/2007	3h
	43°S, 74°E (SWAMS)	04/25/2007	5h
Continuous waves	26°S, 58°E (MAD)	01/09/2007	2h
	26°S, 58°E (MAD)	01/19/2007	2h
	26°S, 58°E (MAD)	06/07/2007	1h
	43°S, 74°E (SWAMS)	06/16/2007	2h
	43°S, 74°E (SWAMS)	08/13/2007	3h
Earthquake	26°S, 58°E (MAD)	04/16/2007	0h10
	26°S, 58°E (MAD)	08/24/2007	0h05
	43°S, 74°E (SWAMS)	09/30/2007	5h
Fin whale calls	26°S, 58°E (MAD)	06/03/2007	2h
	26°S, 58°E (MAD)	08/09/2007	3h
	43°S, 74°E (SWAMS)	05/06/2007	2h30
	43°S, 74°E (SWAMS)	10/09/2007	1h
	43°S, 74°E (SWAMS)	10/10/2007	1h30
Ice tremors	26°S, 58°E (MAD)	01/05/2007	0h40
	26°S, 58°E (MAD)	01/17/2007	0h10
	26°S, 58°E (MAD)	02/26/2007	0h05
	26°S, 58°E (MAD)	04/30/2007	0h20
	26°S, 58°E (MAD)	07/16/2007	0h10
	43°S, 74°E (SWAMS)	01/17/2007	0h10
	43°S, 74°E (SWAMS)	06/01/2007	0h45
	43°S, 74°E (SWAMS)	06/02/2007	0h10
	43°S, 74°E (SWAMS)	07/15/2007	0h15
	43°S, 74°E (SWAMS)	10/03/2007	0h30
Madagascan pygmy blue whale calls	26°S, 58°E (MAD)	04/16/2007	2h30
	26°S, 58°E (MAD)	04/20/2007	6h
	26°S, 58°E (MAD)	04/25/2007	2h30
Unidentified transient sounds	43°S, 74°E (SWAMS)	06/19/2007	5h
	43°S, 74°E (SWAMS)	06/25/2007	5h

TABLE VIII. Overview of selected recordings containing different types of acoustic sources forming the *interference data set* for the Weddell Sea.

Interference type	Recording position	Analyzed recording days	Amount of data analyzed per day
Airguns	59°S, 0°E (G59)	03/21/2013	1h
	59°S, 0°E (G59)	03/21/2013	1h
	64°S, 0°E (G64)	02/06/2013	1h
	66°S, 0°E (G66)	02/13/2013	1h
	66°S, 0°E (G66)	02/21/2013	1h
	66°S, 0°E (G66)	03/01/2013	1h
	69°S, 0°E (G69)	02/05/2013	1h
	69°S, 0°E (G69)	02/08/2013	1h
	69°S, 0°E (G69)	02/12/2013	1h
	69°S, 0°E (G69)	02/18/2013	1h
Fin whales calls	59°S, 0°E (G59)	03/21/2013	2h
	59°S, 0°E (G59)	03/23/2013	2h
	59°S, 0°E (G59)	03/25/2013	1h
	59°S, 0°E (G59)	03/27/2013	1h
	59°S, 0°E (G59)	03/28/2013	1h
	59°S, 0°E (G59)	04/01/2013	1h
	59°S, 0°E (G59)	04/02/2013	2h
Vessel noise	59°S, 0°E (G59)	12/12/2013	1h
	64°S, 0°E (G64)	12/14/2013	2h
	69°S, 0°E (G69)	12/18/2013	3h
	69°S, 0°E (G69)	12/19/2013	1h
	69°S, 0°E (G69)	12/20/2013	3h

2.2.3 Conclusion de l'étude

Le travail réalisé en collaboration avec les chercheurs de l'AWI met bien en évidence la difficulté de construire une base de données de référence la plus objective possible, et la difficulté qui en découle pour estimer les performances de méthodes de détection. La variabilité inter- et intra-analyste est notamment accrue par la présence de vocalisations de faible RSB, ainsi que par la présence de chorus. Dans ces cas, la décision d'annoter un évènement dépend fortement de facteurs liés à l'analyste (*e.g.* sensibilité, concentration, choix des paramètres du spectrogramme). Cette forte variabilité dans la construction de la *vérité terrain* pour tester les performances de détection est extrêmement problématique. En effet, la caractérisation des performances de détection cherche principalement à comparer quantitativement des résultats obtenus par des méthodes différentes, mais est également nécessaire pour l'estimation de densité de cris ou d'individus par acoustique. Or, notre étude montre que deux analystes auraient obtenus des performances différentes pour la même méthode de détection, en la testant sur leurs *vérités terrains* respectives. L'évaluation des performances de méthodes de détection différentes à partir de données de référence créées par des analystes différents relève alors du non-sens puisque rien n'est finalement comparable. Il est donc nécessaire que la communauté bioacoustique prenne conscience de cette problématique.

Des solutions sont envisageables pour limiter cette variabilité dans la création de la *vérité terrain*. La première est d'annoter les évènements uniquement au-delà d'un certain RSB, afin de ne conserver que les vocalisations de plus fort RSB, donc de meilleure qualité, dont l'annotation serait moins ambiguë. Cependant, fixer un seuil de RSB restreindra le rayon de détection (on gardera néanmoins à l'esprit que la relation entre RSB et rayon de détection n'est pas linéaire). Une seconde proposition serait de créer une base de données simulées de RSB différents. Il est cependant nécessaire de tester les détecteurs en conditions réelles de bruit et de propagation et en présence d'interférences. En combinant des conditions réelles de bruit ambiant aux vocalisations simulées, on disposerait d'une référence réaliste, complètement contrôlée pour tester des algorithmes de détections.

2.3 Discussion

L'étude avec l'équipe de l'AWI a été réalisée durant la troisième année de ce doctorat, ce qui signifie que la majorité des analyses présentées dans la suite de ce manuscrit avaient déjà été faites. La validation du *Z-detector* a, quant à elle, eu lieu en début de doctorat. Depuis ce travail de validation et l'analyse des résultats

de détection, les discussions, les rencontres, les travaux à l'AWI ou les problèmes rencontrés ont permis de mûrir mon point de vue sur le détecteur, mais aussi sur les méthodes de traitement ou de présentation des données. Cette section détaille ces réflexions, avec le recul de l'expérience.

2.3.1 Le problème de la détection de parties du chorus

La comparaison du *Z-detector* utilisé dans cette thèse avec la méthode de détection par corrélation de spectrogrammes mise en place à l'AWI a souligné une fois de plus l'intérêt de disposer d'une méthode aux performances contrôlées avec un seuil de détection automatiquement adapté aux conditions de bruit ambiant. En effet, la stratégie des chercheurs de l'AWI (*cf.* Thomisch et al., 2016) de choisir un seuil constant sur toute l'année s'est avérée inadaptée. Trop faible à certaines périodes de l'année, le seuil choisi a entraîné un nombre extrêmement important de détections dans le chorus. Cette étude a mis en lumière le problème que pose ce chorus tant pour les détecteurs automatiques que pour les opérateurs humains, et la nécessité de trouver des métriques indiquant la "qualité" des détections, et la présence de détections lointaines ou liées au chorus. L'estimation du rayon de détection des Z-calls individuels, évalué à environ 200 km (Samaran et al., 2010a; Širović et al., 2007), reste très incertaine du fait de sa dépendance aux conditions environnementales autour des instruments (Helble et al., 2013b,a; Širović et al., 2015). Le rayon de détection du chorus est quant à lui totalement inconnu. Il est cependant probable que le chorus se propage sur des distances beaucoup plus importantes. Considérer des détections issues du chorus avec un poids égal aux détections de cris émis à proximité des instruments fausse très probablement les conclusions sur la présence de l'espèce dans la zone d'écoute, surtout si le nombre de détections est considérable. La mesure du RSB des détections pourrait être une solution pour distinguer les détections selon leur qualité. Malgré la méconnaissance du rayon de détection des Z-calls, cette métrique permettrait d'estimer grossièrement si les cris détectés ont été émis à proximité ou non du site instrumenté et ainsi de nuancer ces conclusions.

2.3.2 Limites du *Z-detector*

L'étude des performances des détecteurs réalisée à l'AWI a mis en exergue quelques faiblesses de notre méthode de détection, notamment une sensibilité aux interférences supérieure à ce qui avait été estimé en début de thèse pour valider la méthode. Le taux de fausses alarmes observé est particulièrement élevé en présence de signaux de baleines bleues pygmées du type Australie. Ceux-ci présentent en effet

une harmonique autour de 18 Hz (Fig. 2.2 a), confondue alors par le détecteur avec l'unité B du Z-call, et génèrent de fausses détections. Ce type de signal interférent n'avait pas été testé lors de la validation du détecteur car il était absent des données utilisées. De même, la vocalisation de baleine bleue pygmée de type Madagascar présente un “*upsweep*”, c'est-à-dire une augmentation de fréquence avant l'unité à ~ 35 Hz (Fig. 2.2 b), qui peut être confondu avec le *downsweep* du Z-call. Ces erreurs de détection sont liées au fait que le *Z-detector* tient compte de la possible absence d'une ou plusieurs parties du Z-call, sans poser de condition sur la partie restante. De manière générale, l'unité A du Z-call est l'unité la plus énergétique, et donc la dernière perdue par propagation. Les Z-calls incomplets sont donc presque exclusivement des Z-calls composés de l'unité A et éventuellement du *downsweep*. Appliquer cette condition réduirait sans doute la part de fausses détections dues aux signaux des baleines bleues pygmées. Toutefois, pour ces vocalisations, les unités problématiques pour le détecteur ne sont visibles que sur des signaux de forts RSB. On peut donc supposer qu'ils sont relativement peu fréquents dans notre base de données.

Notre étude de performances pour la validation du *Z-detector* avait déjà remarqué la faiblesse de la méthode pour distinguer les pulses de rorquals communs (Fig. 2.2 c) du *downsweep* des Z-calls. Pour y remédier, une métrique avait été ajoutée au détecteur ; elle désigne comme “correcte” une détection dont l'énergie de l'unité A est supérieure à l'énergie du *downsweep* et de l'unité B. En revanche, si le *downsweep* et/ou l'unité B ont une énergie supérieure à celle de l'unité A, la détection est classée comme “fausse”. Ce critère a été testé avec succès sur les enregistrements du mois d'octobre 2010 au site MAD, qui contenaient un nombre important de pulses de rorqual commun. Sur 1728 évènements classés comme “fausses détections”, 98.5% se sont révélés de “vraies” fausses détections. Sur 3272 détections classées comme étant correctes, 97.5% se sont révélées être effectivement des Z-calls. Pour éliminer les fausses détections restantes, un simple tri basé sur les fréquences du pic d'amplitude des détections est opéré. Cette mesure de fréquence est réalisée en post-traitement de la détection et intégrée dans le code Matlab du *Z-detector*. Les détections dont la fréquence est trop éloignée de celle de l'unité A du Z-call pour l'année considérée sont classées comme fausses détections.

La méthode de l'AWI, fondée sur la corrélation de spectrogrammes avec un modèle de référence basé sur la concaténation de plusieurs Z-calls, s'est avérée plus robuste aux interférences que le *Z-detector*. Comme expliqué plus haut, cette robustesse est liée à la nature de la méthode de corrélation de spectrogrammes,

qui est plus stricte puisqu'elle cherche la ressemblance entre un modèle donné et le signal étudié à la fois dans la dimension temporelle et fréquentielle. La faiblesse de la méthode réside dans le choix du seuil de corrélation. Le développement d'une méthode hybride, basée sur la corrélation de spectrogrammes mais avec un seuil de détection auto-adaptatif au niveau de bruit ambiant, pourrait être un compromis intéressant.

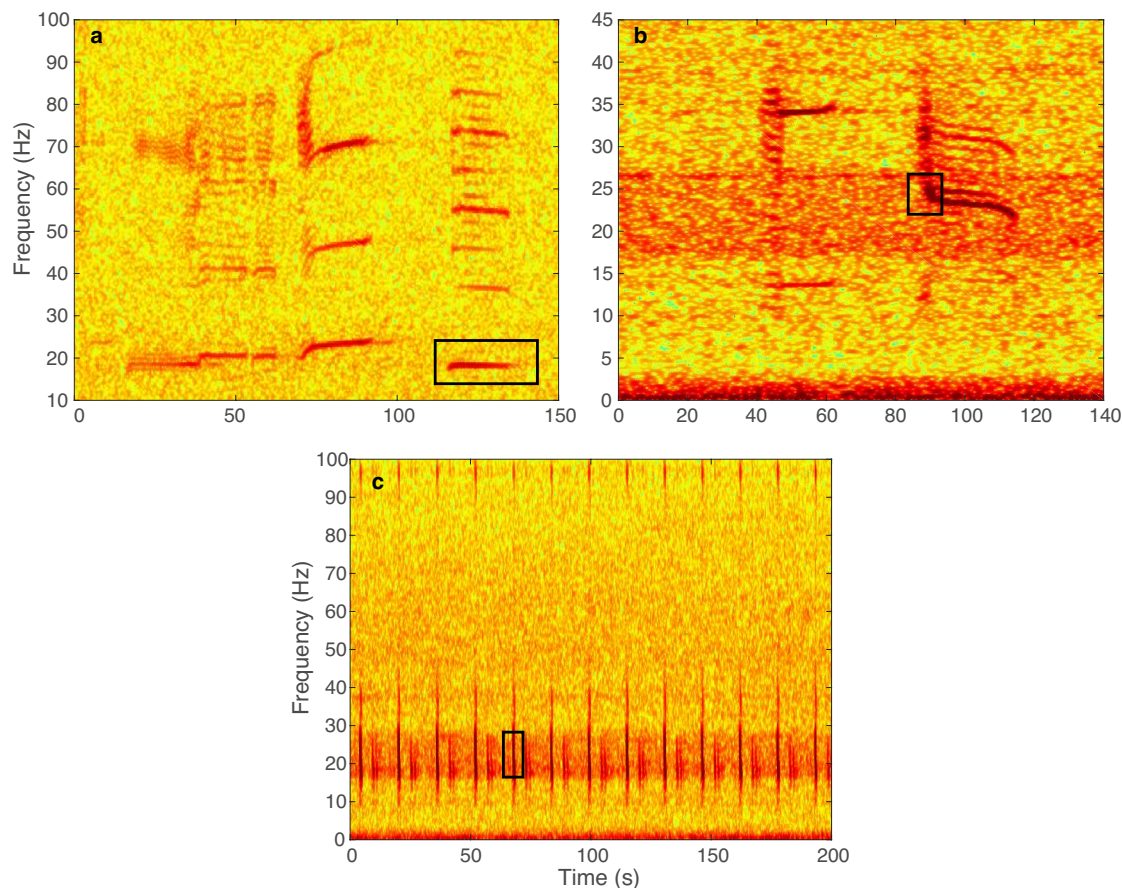


FIGURE 2.2 – Vocalisations de baleines bleues pygmées de type : a) Australie, b) Madagascar ; et c) pulses de rorqual commun. Les unités qui peuvent être confondues par le *Z-detector* comme parties de *Z-call* sont encadrées en noir.

2.3.3 Limites de l'étude réalisée à l'AWI

L'étude réalisée avec les chercheurs de l'AWI avait initialement pour but, entre autres, de comparer les performances des détecteurs utilisés dans la thèse de Karolin Thomisch (Thomisch, 2017) et dans cette thèse. Pour cette étude, les détecteurs ont été mis en oeuvre tels qu'utilisés lors de ces deux thèses, notamment sans en modifier les seuils de détection. Il s'agissait de comparer leurs performances sur un même jeu de données. En fait, parce qu'ils utilisent des seuils de détection différents, il est impossible de comparer ces détecteurs entre eux et de conclure

qu’une méthode est meilleure que l’autre. Pour une comparaison rigoureuse, il conviendrait de faire varier les seuils de détections des deux algorithmes et évaluer les valeurs de *recall*² et *precision*³, et alors seulement comparer les valeurs de *precision* obtenues pour des valeurs de *recall* identiques.

Enfin, cette étude fait apparaître que les deux méthodes donnent des résultats différents lorsqu’elles sont appliquées à un même jeu de données. Il n’est pas certain, cependant, que la méthode de détection influe sur les conclusions en termes de saisonnalité de présence des Z-calls. En effet, l’étude des patrons saisonniers se base principalement sur le rapport entre les nombres de cris détectés d’un mois à un autre. Même si le nombre global de détections varie selon le détecteur choisi, les rapports entre nombres de détections par mois devraient être identiques et les conclusions ne changeront pas. L’inverse se révélerait beaucoup plus problématique et remettrait en question la plupart des études sur la saisonnalité de présence des différentes espèces par acoustique passive. Pour lever ce doute, il faudrait appliquer ces deux détecteurs à une année entière de données et comparer statistiquement les résultats de détection des deux algorithmes.

On peut également relever que pour cette étude, les bases de données test ont été annotées par deux stagiaires sans véritable expérience préalable de cet exercice. Bien que les stagiaires aient été entraînés sur des données provenant des mêmes enregistrements, on ne peut pas les considérer comme des “analystes expérimentées”. Cette faiblesse reflète cependant une certaine réalité dans la majorité des laboratoires de recherche, où l’on a couramment recours à des stagiaires pour ce travail analytique “de base” assez fastidieux et répétitif. Notre étude n’en est que plus représentative des biais existants dans l’annotation manuelles des données.

2.3.4 Apports du meeting SORP

Une des propositions de l’article avec l’AWI était de ne travailler qu’avec des Z-calls de forts RSB pour diminuer la variabilité inter- et intra-analyste dans la création de la *vérité terrain*, notamment dans le cadre des études d’estimation de densité d’individus (par acoustique). Cette suggestion a trouvé un écho lors

2.

$$recall = \frac{\text{nb de vraies détections}}{\text{nb de détections dans la vérité terrain}}$$

3.

$$precision = \frac{\text{nb de vraies détections}}{\text{nb total de détections automatiques}}$$

de la réunion de travail du groupe *Acoustic trend* du SORP, qui s'est tenue à Bled en Slovénie, en mai 2017. Cette réunion visait notamment à définir une méthode pour comparer des résultats de détections entre différentes études. Il a, entre autres, été mentionné qu'à défaut d'accéder à une densité d'individus par acoustique passive, qui se heurte encore à des verrous importants, accéder à une densité de cris (*call density*) serait une solution tangible à court terme. Ce calcul nécessiterait de restreindre les détections aux Z-calls de fort RSB, pour s'affranchir des ambiguïtés liées à la détection des cris de faible RSB, et, à partir de celles-ci, d'estimer les performances du détecteur utilisé, ainsi que le rayon de détection associé au seuil de RSB choisi. On pourrait alors en déduire un nombre de cris par unité de temps et de surface (km²). Cependant, comme mentionné plus haut, l'estimation du rayon de détection demandera encore beaucoup d'efforts, puisqu'il est dépendant des conditions environnementales (*i.e.* conditions de propagation) autour du site d'enregistrement, de la puissance d'émission de la vocalisation, et de la profondeur de la source, qui sont autant d'inconnues.

Conclusion générale

Ce chapitre méthodologique a permis dans un premier temps de valider les performances du *Z-detector*, une méthode de détection par projection en sous-espace appliquée pour la première fois aux vocalisations de baleines bleues Antarctique. Dans un second temps il a souligné la difficulté de comparer les performances de détecteurs, en raison de la difficulté de construire une base de données de référence fiable. Cette observation ne remet cependant pas en cause la validation expérimentale du *Z-detector*. En effet, même si la *vérité terrain* utilisée pour cette validation peut être remise en question, les deux détecteurs (*i.e.* *XBAT* et le *Z-detector*) ont été confrontés à la même *vérité terrain*. On pourrait alors argumenter, que, comme le souligne l'étude réalisée à l'AWI, les performances de *XBAT* et du *Z-detector* ne sont pas comparables puisque leur seuil de détection diffère. Néanmoins, une fois encore, l'avantage du *Z-detector* réside avant tout dans le fait que l'algorithme s'affranchit de choix subjectifs *a priori*, adapte son seuil de détection au bruit ambiant et a des performances théoriques connues. A ce titre, il est moins dépendant de l'opérateur. Le *Z-detector* est donc un outil de détection puissant, parfaitement adapté aux objectifs de ces travaux de thèse et à l'analyse des données acoustiques disponibles.

Chapitre 3

Répartition géographique et saisonnnière des baleines bleues Antarctique dans l’océan Indien austral

Introduction

La validation du *Z-detector* sur une partie de la base de données acoustiques enregistrée en 2007 par le réseau d’hydrophones DEFLOHYDRO a permis de s’assurer de la fiabilité de la méthode et de ses avantages (voir Chapitre 2). L’algorithme a donc pu être appliqué avec confiance à l’ensemble des données enregistrées entre 2010 et fin 2015 par le réseau OHASISBIO, afin d’y détecter la présence de la signature vocale stéréotypée de baleine bleue Antarctique. L’étude de cette base de données multi-site et pluri-annuelle inédite dans cette zone sub-antarctique de l’océan Indien austral a permis de compléter deux études antérieures réalisées dans cette même zone, à des échelles spatio-temporelles plus réduites. A partir des enregistrements de la station permanente de l’OTICE à proximité de l’île de Crozet, qui a fonctionné 14 mois en 2003-2004, Samaran et al. ont révélé l’importance de cet archipel pour les deux sous-espèces de baleines bleues Antarctique et pygmée (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b). Leur présence toute l’année indique que cette région est non seulement une aire d’hivernage pour les baleines bleues Antarctique, mais aussi une zone d’alimentation privilégiée pour les baleines bleues pygmées. Les données du réseau DEFLOHYDRO ont permis d’étendre les observations sur ces deux sous-espèces à une aire géographique plus importante et de mettre en évidence des patrons saisonniers de présence de leur signature vocale différents selon les sites d’enregistrement (Samaran et al., 2013). Cette étude, à

nouveau limitée à un an de données (2007), ne permet cependant pas de généraliser ces observations sur le long terme.

Les enregistrements du réseau OHASISBIO permettent à la fois d'élargir le cadre de l'étude sur la répartition géographique de la baleine bleue Antarctique dans l'océan Indien austral, avec 7 sites instrumentés couvrant un large gradient latitudinal et longitudinal (4 à 46° S, 53 à 81° E), et de suivre l'évolution d'une année à l'autre des patrons de distribution géographique et saisonnière, avec 6 ans d'observation continue. Leur analyse a notamment montré la présence annuelle de Z-calls de baleine bleue Antarctique à tous les sites, à l'exception du site RAMA situé dans les eaux équatoriales (4° S, 80° E), et pour toutes les années d'enregistrement disponibles. Elle a également mis en évidence une forte saisonnalité dans l'occurrence des vocalisations, stable d'une année à l'autre pour un même site, mais différente selon les sites. Les patrons saisonniers observés indiquent une plus forte présence de l'espèce au sein du réseau de l'automne au printemps, et une plus faible fréquentation durant l'été austral. Ces observations renforcent l'idée que les eaux sub-antarctiques et sub-tropicales de l'océan Indien sont une aire d'hivernage voire de reproduction pour les baleines bleues Antarctique. La présence de Z-calls dans ces eaux pendant l'été austral, période durant laquelle l'espèce est sensée s'alimenter en Antarctique, suggère soit une migration partielle de la population, avec des individus restant dans les eaux sub-antarctiques pour s'alimenter, soit une migration étalée dans le temps selon la condition physique des individus. Ces propositions rejoignent celles de Samaran et al. (2010b, 2013). Enfin, l'étude met en évidence l'existence de patrons nycthémeraux d'émission des Z-calls, avec plus de détections le jour que la nuit. Ces patrons reflèteraient l'activité d'alimentation des individus et la migration nycthémeraie du krill dans la colonne d'eau, plus accessible la nuit, et remettraient alors en cause l'idée admise selon laquelle les individus jeûneraient totalement pendant la période de migration et d'hivernage. Tous ces résultats font l'objet de l'article paru en Novembre 2016 dans le journal Plos One et reproduit ci-après.

3.1 Article paru dans le journal *Plos One*

RESEARCH ARTICLE

Seasonal and Diel Vocalization Patterns of Antarctic Blue Whale (*Balaenoptera musculus intermedia*) in the Southern Indian Ocean: A Multi-Year and Multi-Site Study

Emmanuelle C. Leroy^{1,2}, Flore Samaran², Julien Bonnel², Jean-Yves Royer^{1*}

1 University of Brest and CNRS, Laboratoire Geosciences Brest, IUEM, 29280 Plouzané, France, **2** UMR CNRS 6285 Lab-STICC, ENSTA Bretagne, 29806 Brest, France

* jean-yves.royer@univ-brest.fr



CrossMark
click for updates

Abstract

Passive acoustic monitoring is an efficient way to provide insights on the ecology of large whales. This approach allows for long-term and species-specific monitoring over large areas. In this study, we examined six years (2010 to 2015) of continuous acoustic recordings at up to seven different locations in the Central and Southern Indian Basin to assess the peak periods of presence, seasonality and migration movements of Antarctic blue whales (*Balaenoptera musculus intermedia*). An automated method is used to detect the Antarctic blue whale stereotyped call, known as Z-call. Detection results are analyzed in terms of distribution, seasonal presence and diel pattern of emission at each site. Z-calls are detected year-round at each site, except for one located in the equatorial Indian Ocean, and display highly seasonal distribution. This seasonality is stable across years for every site, but varies between sites. Z-calls are mainly detected during autumn and spring at the subantarctic locations, suggesting that these sites are on the Antarctic blue whale migration routes, and mostly during winter at the subtropical sites. In addition to these seasonal trends, there is a significant diel pattern in Z-call emission, with more Z-calls in daytime than in nighttime. This diel pattern may be related to the blue whale feeding ecology.

OPEN ACCESS

Citation: Leroy EC, Samaran F, Bonnel J, 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

Editor: Songhai Li, Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, CHINA

Received: May 19, 2016

Accepted: September 12, 2016

Published: November 9, 2016

Copyright: © 2016 Leroy et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: The raw data underlying this analysis (date and time of each detection at each site, plus signal-to-noise ratio) are all accessible through <http://doi.org/10.17882/46124>.

Funding: Deployment and recovery cruises were funded by the French Polar Institute (IPEV; MD174/175, MD185, MD189, MD193, MD197, MD200, MD201 cruises) and by NOAA/PMEL and INCOIS (SK 307). Additional support for the acoustic experiments was provided by the Institut National

Introduction

As the preferred target of commercial whalers, the Antarctic blue whales (*Balaenoptera musculus intermedia*) were largely decimated during the 20th century. With a remaining population estimated in the mid-1970s at 0.15% of its initial size [1], Antarctic blue whales are listed as Critically Endangered by the International Union for Conservation of Nature (IUCN) [2]. Information about the population recovery and its current distribution is limited, since our knowledge about this species comes mainly from whaling data [3], and from extensive visual sighting surveys from the IDCR/SOWER program [4]. This species is found all around the Antarctic continent during austral summer [5–7], feeding on the dense patches of Antarctic

des Sciences de l’Univers of CNRS. E.C.L. was supported by a Ph.D. fellowship from the University of Brest and from the Regional Council of Brittany (Conseil Régional de Bretagne). Moorings and hydrophones were funded by the Regional Council of Brittany (CPER). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

krill (*Euphausia superba*), and migrates, at least for a major part of the population, to northern locations during winter. Wintering areas are believed to be off the southern African coast [5], in the eastern tropical Pacific, the Central Indian Basin [6], southwest of Australia [8, 9], and off northern New Zealand [10]. Two recent studies describe their presence in the Southern Indian Ocean [11, 12]. Acoustic data acquired near Crozet Islands in 2004 unveiled the importance of this highly productive area for two southern blue whale subspecies: the Antarctic and pygmy blue whales, with a year-round presence in the area [11]. Other acoustic records at three sites in the Southern Indian Ocean, collected in 2007, provide further evidence about the seasonal presence of blue whales in this region [12] and demonstrated that blue whale subspecies use a much wider habitat than previously proposed [5]. Because of the large and remote distribution area of the species, and of often-poor weather conditions in the Southern Ocean, passive acoustic monitoring (PAM) is probably the most efficient way to study the Antarctic blue whale, compared to traditional visual observations, that are costly, difficult, and thus sparse at high latitudes [11, 13]. For instance, during 32 years of multi-vessel visual sighting surveys around Antarctica, only 216 Antarctic blue whale encounters were reported (IDCR/SOWER program, 4112 vessel-days and 216,000 nautical miles of transect lines; [14]). On the other hand, PAM is appropriate for monitoring this species since its repertoire is composed of intense, repetitive low-frequency vocalizations, known as Z-calls from their Z-shape in the time-frequency domain (Fig 1). Z-calls are constituted of three parts: a tonal unit A, lasting about 7 to 12 s at a frequency near 28 Hz [6, 15, 16], a short downsweep of 1 to 2 s, and a tonal unit B, lasting between 7 and 12 s, at a frequency around 18 Hz. Frequency of unit A appears to be decreasing in the past decades [17–20]. Z-calls are repeated in sequences, every 40 to 70 s during several minutes to hours [6, 10, 15, 21, 22]. The highly stereotyped characteristics of Z-

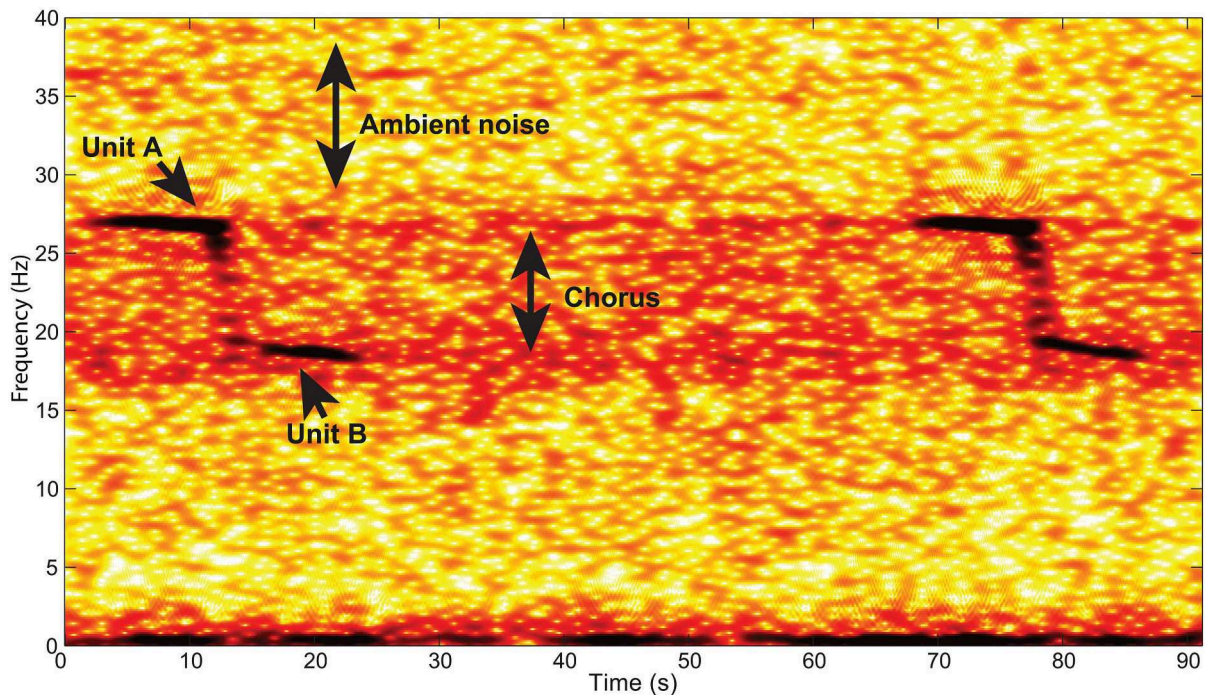


Fig 1. Spectrogram of two consecutive Z-calls. The noisy frequency band between 18 and 28 Hz is formed by the Antarctic blue whale and fin whale chorus.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g001

calls make the Antarctic blue whale presence easy to detect and monitor. In this study, Z-calls are used as a clue for Antarctic blue whale presence. However, since this call is likely to be emitted only by males, as noted for other baleen whale and blue whale (sub)species [23, 24], this acoustic indicator would be mainly representative of the presence patterns of the vocally active males. Nevertheless it appears that blue whales emit calls year-round, during reproductive as well as non-reproductive periods [7, 21, 24, 25], allowing for a year-round acoustic monitoring of this species. Unlike previous studies, generally limited in time or in geographic coverage and providing only clues about the long-term presence and distribution of Antarctic blue whales, this study uses a hydrophone network covering a wide range of latitudes and longitudes, spanning the central and south Indian Ocean (4 to 46°S, 53 to 81°E), and deployed for six continuous years from 2010 to 2015. The network consists of five to seven instrumented sites, 700 to 1500 km apart. Three sites are at the same locations as in a previous experiment in 2007 [12], which expands the period of observation.

Here, we present the results from this first six-year-long continuous acoustic monitoring of Antarctic blue whale on a broad scale in the Southern Indian Ocean. First, Antarctic blue whale Z-calls are automatically detected at each station. Second, the seasonal distribution of Z-calls and its variations across years are explored. Finally, the diel pattern of Z-call emission is examined. Results and their ecological implications are discussed in the last section.

Materials and Methods

Data Acquisition

The hydrophone network—known as OHASISBIO—was initially deployed in December 2009 at five sites in the Southern Indian Ocean. This experiment was designed to monitor low-frequency sounds, produced by seismic and volcanic events [26, 27], and by large baleen whales. Instruments are distributed south of La Reunion Island in the Madagascar Basin (MAD), northeast of the St Paul and Amsterdam plateau (NEAMS), mid-way between the Kerguelen and Amsterdam islands (SWAMS), north of Crozet Island (NCRO) and west of Kerguelen Island (WKER). The geometry of the OHASISBIO-network slightly changed through the years, but these five sites remained the same during the whole experiment. Additional sites were temporarily instrumented, such as the RAMA site, near the Equator in the Central Indian Basin, deployed for 16 months in 2012–2013. In 2014, a new site was instrumented, just south of the Southeast Indian Ridge (SSEIR) (Fig 2). Most of the sites are equipped with a single hydrophone. However, some years, triads of hydrophones forming a triangle were deployed at some sites: in 2010 and 2011, triads with a 30 km side were deployed at NCRO and WKER sites; in 2012 and 2013, only the WKER-triad was redeployed, and in 2014 and 2015, the triad was moved to the SWAMS site, and the distance between hydrophones reduced to 10 km. Each mooring consists of an anchor, an acoustic release, and an autonomous hydrophone set to record acoustic waves continuously at a rate of 240 Hz using a 24-bit analog-to-digital conversion. Hydrophones are deployed in the axis of the sound fixing and ranging (SOFAR) channel, from 500 to 1300 m below sea surface depending on the site. The hydrophones (and data) were recovered and redeployed every year in January–February, during the annual voyages of the R/V Marion Dufresne to the French Southern and Antarctic Territories in the Southern Indian Ocean. However, in 2011, the instruments located at NEAMS and SWAMS sites could not be recovered, and remained on site until the next voyage, in 2012. The NEAMS hydrophone had enough battery to record until November 2011 (20 months), whilst the SWAMS one stopped in November 2010, after only 8 months of operation. In 2011 at WKER site, one of the three instruments was lost, and another stopped after 2 months. In 2015, the NEAMS hydrophone was lost during recovery, and in 2016, poor weather conditions prevented the recovery of

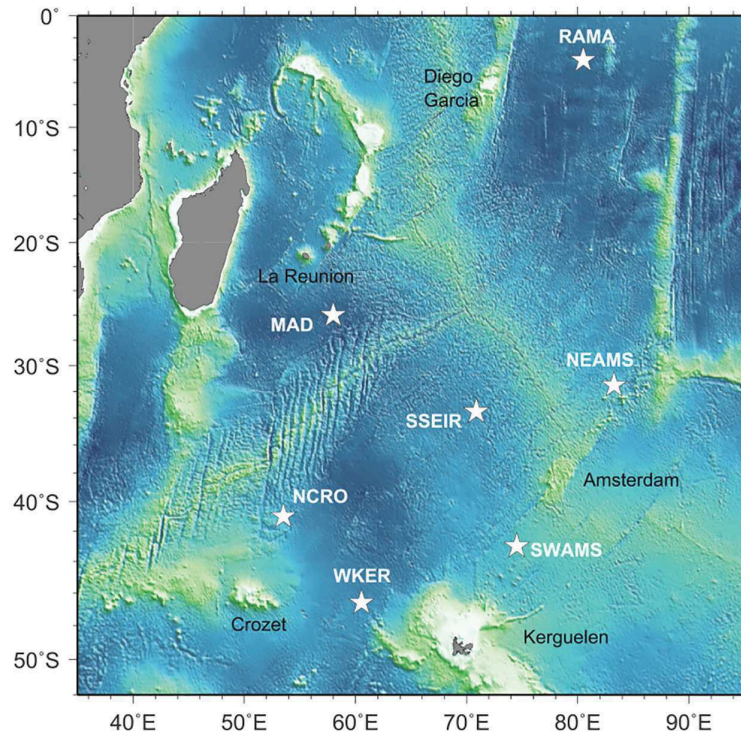


Fig 2. Hydrophone locations of the OHASISBIO network in the Indian Ocean (stars).

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g002

WKER and NEAMS instruments. Locations of the hydrophones and the available data are listed in [Table 1](#). Periods of continuous recordings analysed in this study are presented in [Fig 3](#).

Acoustic data processing

Except for the NCRO data in 2010 and 2013, all the data are exploitable. The analysis of the NCRO-triad in 2010 and in 2013 is hindered by a high noise-level probably generated by the mooring line and occurring in the same frequency band than whale calls.

Call detection. For such a large amount of acoustic data, we resorted to an automatic Z-detector based on a subspace-detection algorithm [28]. The main advantage of this detector is that it does not suffer from the inherent limitations of the classical correlation-based detectors. In particular, it does neither require an *a priori* fixed template nor a user-chosen detection threshold. Indeed, the algorithm has an adaptive detection threshold, which depends on the ambient noise level, which ensures a maximum false-alarm probability of 3%, even in presence of interfering signals. The algorithm models the Z-call shape with a logistical function (i.e. a mathematical equation which, when plotted, has a Z-shape), which requires four parameters: U and L to set the upper and lower frequencies of the model (i.e. frequencies of units A and B), a growth rate α , set to 2.1, and M , the time shift of the logistic function (related to unit A duration), fixed to 10.23. The frequency parameters U and L are adapted depending on the year of the treated recordings. Indeed, the frequency of the unit A of Z-calls appears to be decreasing in the past decades [17–20], at an estimated rate of 0.135 Hz per year [19]. The Z-detector is robust to frequency variations between calls and to intra-annual changes, but to ensure this flexibility while limiting the number of false detections, the frequency interval into which the model can vary is limited to 0.5 Hz. Three values define the frequency parameters U and L . Because the

Table 1. OHASISBIO autonomous hydrophone network. The character “-” indicates continuous recordings without data recovering, “x” indicates that there is no available data. A site name followed by a number (1, 2 or 3) indicates the instruments of a triad.

Site	Geographic coordinates	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
		Start	Stop	Start	Stop	Start	Stop	Start	Stop	Start	Stop	Start	Stop
RAMA	03 50'S, 080 30'E	x	x	x	x	05/05/12	-	-	09/19/13	x	x	x	x
MAD	26 05'S, 058 08'E	12/20/09	02/19/11	02/19/11	03/09/12	03/10/12	03/09/13	03/09/13	02/16/14	16/02/14	01/18/15	02/08/15	01/28/16
NEAMS	31 35'S, 083 14'E	02/13/10	-	-	11/25/11	03/04/12	03/04/13	03/04/13	02/10/14	x	x	not yet recovered	
SWAMS	42 59'S, 074 35'E	01/17/10	11/21/10	x	x	02/29/12	02/27/13	02/28/13	02/07/14	x	x	x	x
SWAMS 1	42 02'S, 074 36'E	x	x	x	x	x	x	x	x	02/07/14	12/02/14	01/27/15	01/20/16
SWAMS 2	42 58'S, 074 31'E	x	x	x	x	x	x	x	x	02/07/14	01/27/15	01/27/15	01/20/16
SWAMS 3	42 57'S, 074 39'E	x	x	x	x	x	x	x	x	02/08/14	01/27/15	01/27/15	01/21/16
NCRO 1	41 00'S, 052 49'E	12/25/09	01/19/11	01/20/11	01/30/12	x	x	x	x	x	x	x	x
NCRO 2	41 00'S, 053 10'E	12/25/09	01/20/11	01/21/11	01/31/12	x	x	x	x	x	x	x	x
NCRO 3	41 14'S, 052 59'E	12/25/09	01/20/11	01/20/11	01/31/12	01/29/12	02/10/13	02/12/13	01/10/14	01/11/14	01/11/15	01/11/15	01/08/16
WKER 1	46 38'S, 060 07'E	12/28/09	01/24/11	01/25/11	02/03/12	02/04/12	02/14/13	02/15/13	01/15/14	x	x	x	x
WKER 2	46 34'S, 060 31'E	12/28/09	01/25/11	x	x	02/05/12	02/15/13	02/17/13	10/23/13	01/15/14	01/01/15	not yet recovered	
WKER 3	46 50'S, 060 24'E	12/28/09	01/25/11	01/25/11	03/10/12	02/03/12	02/16/13	02/16/13	01/16/14	x	x	x	x
SSEIR	33 30'S, 070 52'E	x	x	x	x	x	x	x	x	02/13/14	02/04/15	02/05/15	01/18/16

doi:10.1371/journal.pone.0163587.t001

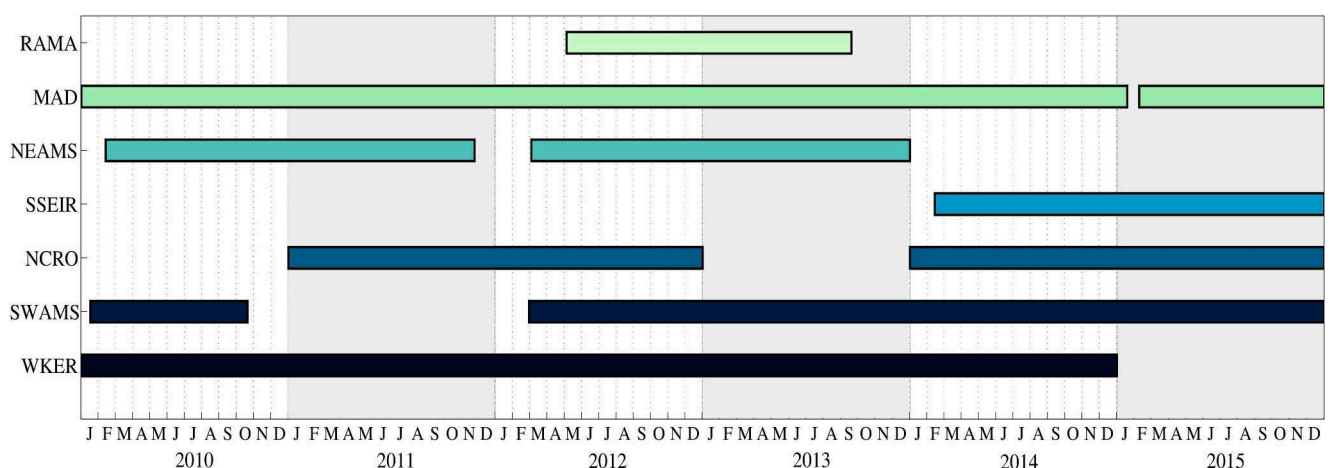


Fig 3. Periods of continuous recordings analysed for each site.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g003

Table 2. Parameter *U*, defining the unit A frequency to model the Z-call for each year of data.

	U1	U2	U3
2010	26.75 Hz	26.5 Hz	26.25 Hz
2011	26.75 Hz	26.5 Hz	26.25 Hz
2012	26.60 Hz	26.35 Hz	26.10 Hz
2013	26.50 Hz	26.25 Hz	26.00 Hz
2014	26.30 Hz	26.05 Hz	25.80 Hz
2014	26.05 Hz	25.80 Hz	25.55 Hz

doi:10.1371/journal.pone.0163587.t002

unit B frequency remains stable over the years, the same parameters *L* are used for any year of data: $L1 = 19$ Hz, $L2 = 18.75$ Hz and $L3 = 18.5$ Hz. Parameters for Unit A are in [Table 2](#).

False detection discrimination. In any acoustic database, interferences of various types can occur (e.g. airguns, other baleen whale calls, seismic events, etc). Yet, the number of false detections generated by such interferences are limited due to the Z-detector characteristics [28]. Nevertheless we develop a method for removing potential false detections. For each detection, the Z-detector output the frequency of the signal at its maximum amplitude. If this frequency departs from the frequency of unit A of the Z-call, which is the most energetic part of the call, it is likely that the detection is not a Z-call, but rather a false detection. Thus, we exclude all the detections with a frequency above and below the selected frequency for unit A for the processed year.

Ambient noise measurement. To measure the evolution of the ambient noise in our study area over the years, and its possible impact on the number of detected calls, the ambient noise level is calculated in the 40–60 Hz frequency band for each station and each year. This frequency range is dominated by distant shipping, seismic airgun signals, and biological sounds [29]. This band does not contain Antarctic blue whale calls, or very short ones (such as D-calls). Ambient noise level is estimated over 300s-windows with 0.0018 Hz-bins, averaged per month, and reported in decibels (dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$).

Chorus to Noise-without-chorus Ratio (CNR). In the presence of numerous Antarctic blue whales, the overlay of distant calls creates a “chorus” ([Fig 1](#)) that sometimes makes impossible the identification of individual calls. This chorus could indicate that whales are in the area, but not close enough to the hydrophone to be detected. The power of this chorus and more precisely, the Chorus to Noise-without-chorus Ratio (CNR) may thus usefully complement the detection results, since a lack of detection does not necessarily mean an absence of calling whales. To estimate this CNR, the chorus level is calculated in a frequency band set to 25.5–26.8 Hz for 2010 and 2011 datasets; 25.5–26.7 Hz for 2012 data; 25.5–26.5 Hz for 2013 and 2014; and 25.5–26.1 Hz for 2015. These bands are chosen to take only into account the Unit A of Z-calls and to avoid the 20-Hz fin whale pulses very abundant in our recordings. The 20-Hz fin whale pulses are centered around 20 Hz, but begin at around 15 Hz and end at around 30 Hz, with a maximum amplitude at about 18 Hz. This chorus level (in dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) is then subtracted from the noise level in the 30–33 Hz frequency band, and averaged per month. Note that the frequency band of noise used to estimate the CNR is different from the frequency band used for the noise level estimation (40–60 Hz). Indeed, this range is chosen to be as close as possible to the chorus, and not too wide compared to the chorus frequency range.

Detection results analysis

Statistical analysis of detection results. As described previously, depending on the year, some sites were instrumented with hydrophone triads. The monthly distributions of detection

results obtained for each hydrophone of a triad are compared, in order to check if they differ between instruments 30 km or 10 km apart. This comparison will tell 1) whether any instrument is representative of the triad, i.e. whether the analysis of only one instrument of a triad does not introduce any bias, and 2) the relevance of detection numbers for characterizing the Antarctic blue whale presence at a large spatial scale.

To enable the comparison between years and stations since some years of recording are incomplete, the number of detections per day is estimated using a Generalized Linear Mixed Model (GLMM). This GLMM is performed using a negative binomial distribution, which is suitable for overdispersed count data, using month and year taken as random effects [30].

To test whether seasonality varies from year to year at a given station, monthly distributions of detections are normalized by the total number of detected Z-calls in the given year. The normalization makes the observation independent from variations in the absolute detection numbers between years and emphasizes their seasonality.

Finally, to study the diel calling pattern of Antarctic blue whales, Z-call detections are sorted into four light regimes based on the altitude of the sun: dawn, light, dusk and night. Dawn hours start when the sun is 12° below the horizon (i.e. morning nautical twilight) and end at sunrise; light hours are between sunrise and sunset; dusk is between sunset and the evening nautical twilight; and night hours are between dusk and dawn, when the altitude of the sun is less than -12° . Daily hours of sunset, sunrise and nautical twilights were obtained from the United States Naval Observatory Astronomical Applications Department Web site (<http://aa.usno.navy.mil>) for each year and each site location. The daily number of Z-calls in each light regime is calculated, and divided by the duration of the corresponding light period for a given day, to account for the difference of duration between the four light regimes and their seasonality. The resulting normalized detection rates (in detections/hr), for each light regime and each day, are then adjusted by subtracting the mean number of detection per hour of the corresponding day [31, 32]. These adjusted means of Z-calls per light period are then averaged over the seasons of Z-call main presence, depending on the site location. Seasons are defined by the dates of the solstices and equinoxes for each year.

Distribution of Z-calls per site, per year or month or light regime are not normally distributed. So to compare distributions between sites of a triad, or between years or light regimes at a same site, we use Friedman or Kruskal-Wallis tests [33]. In cases of significant differences between distributions, additional Wilcoxon pairwise comparison tests with Bonferroni correction are used [34, 35].

Statistical analyses were performed using R [36], and GLMM was run using STAN called from R with the package RStanArm (<http://mc-stan.org/>) [37].

Results

Ambient noise level

Since a high ambient noise level would decrease the signal-to-noise ratio (SNR) of calls, and thus the detection probability (e.g. [38]), we examine the ambient noise level in the 40–60 Hz frequency band for each available year of data at each station (Fig 4). The ambient noise level is higher at RAMA (around 85 dB/Hz) than at the other sites, which all display a decreasing noise level between 2010 and 2015, especially at MAD and NEAMS. Aside some peaks (e.g. in April 2012 and October–November 2014 at site NCRO, or April 2010 at SWAMS), the levels of noise are fairly constant throughout the year at each site, which ensures that variations in Z-call detection are not artifacts of the ambient noise level. A further analysis of the ambient noise level can be found in [39].

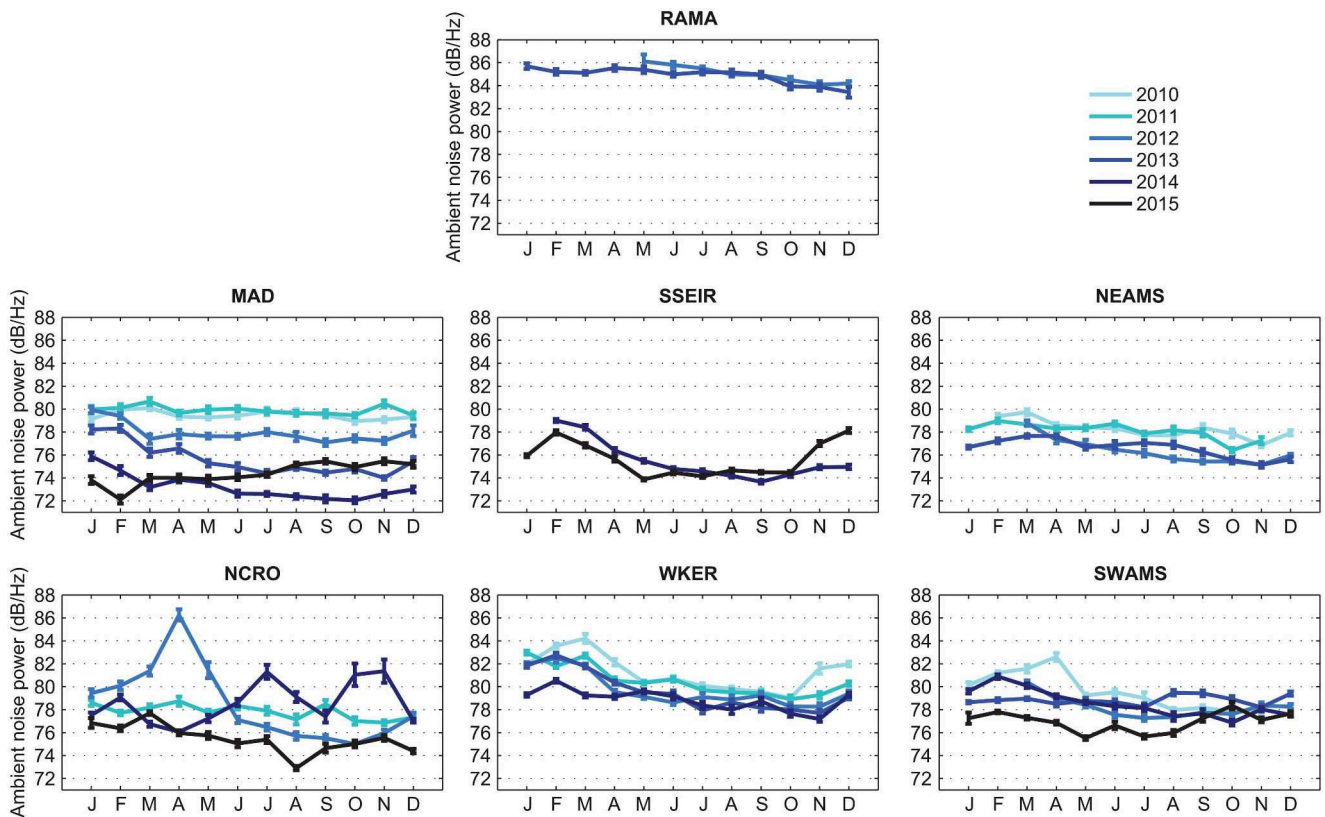


Fig 4. Ambient noise level in the 40–60 Hz frequency band for each available year at each site.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g004

Inside triad comparison

Kruskal-Wallis comparison tests reveal no significant difference between monthly detections at each instrument of a triad, either for the 30 km-triad, or for the 10 km-triad. Thus, we assume that one instrument per triad is representative of the site. We selected the hydrophone according to the quality, the continuity and length of the recordings. For the WKER-triad, hydrophone 1 (WKER 1) was chosen for 2010 to 2013. For the NCRO-triad, hydrophone 2 (NCRO 2) was chosen in 2011, and hydrophone 3 (NCRO 3) in 2012. Finally, for 2014 and 2015, recordings of the hydrophone 2 of the SWAMS-triad were chosen.

In addition, this comparison confirms the relevance of assessing the presence of Antarctic blue whales using detected calls from sparse and distributed hydrophones. Indeed, significant differences in Z-call detections between instruments only 30 km or 10 km apart would have meant that the Z-call detection range is greatly lower than expected [40, 41], making the detection of calls only relevant locally.

Site frequentation and inter-annual variation

Automated detection results show that Antarctic blue whale Z-calls are detected at every OHA-SISBIO sites and for each available year of data, except at RAMA, where no Z-call is detected in the 16 months of recording. A total of 252,333 Z-calls are detected at MAD station across the 6 years of recordings (2010–2015), 161,885 Z-calls at NEAMS station throughout 4 years of data

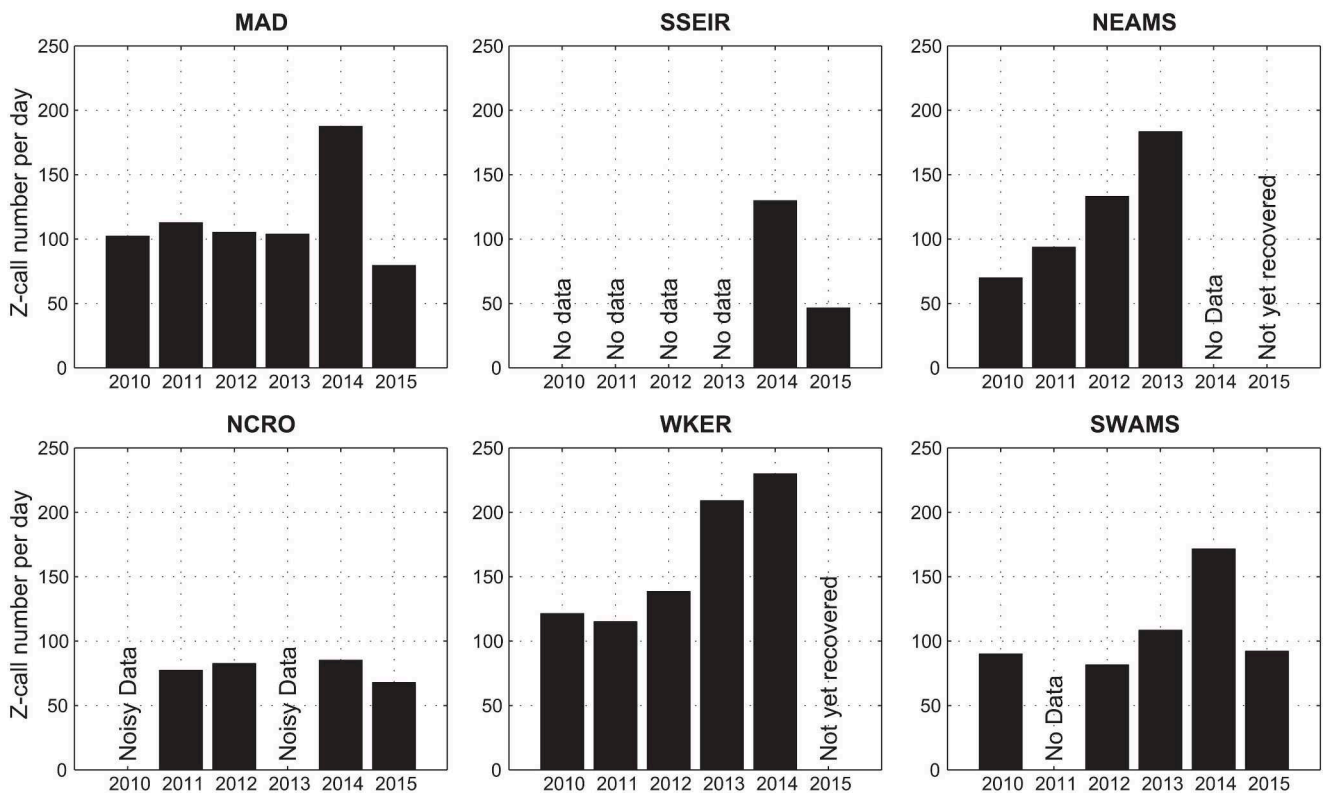


Fig 5. Number of Z-calls per day for each available year at each station.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g005

(2010–2013), 191,939 Z-calls at SWAMS site in 5 years (2010, 2012–2015), 111,576 Z-calls at NCRO for the 4 years of exploitable recordings (2011–2012, 2014–2015), 297,451 Z-calls at WKER during 5 years (2010–2014), and 59,506 Z-calls at SSEIR for the two years 2014–2015.

Fig 5 presents an estimate of the number of detected Z-calls per days of recordings for each year of data at each station. This metric is necessary since some years of data are not complete. Globally, NCRO station shows a lower number of detections (below 85 Z-calls/day) than the others, as SSEIR in 2015 (around 47 Z-calls/day). Moreover, 2014 seems to be an abnormal year, with a higher number of detections than the other years, which is especially obvious at MAD station. It could be argued that this higher detection rate is due to a lower ambient noise level in 2014. Still, it can be noticed that from 2010 to 2013, the noise level at MAD decreased by around 2 dB every year whilst the number of detection remained constant. In addition, SWAMS shows a constant noise level throughout the years, but a sharp increase in the number of calls in 2014. So we conclude that the 2014 increase in the detection rate is significant and not solely imputable to a decrease in the ambient noise level.

Finally, results show no homogeneous pattern. Indeed, the detection number varies between years and stations, and no overall trend can be observed on all sites, neither global increase nor decrease of the total detection number along the years.

Seasonal patterns

For MAD, NEAMS, NCRO, WKER and SWAMS sites, statistical comparisons show no significant difference among the normalized monthly distributions of Z-calls between years (Friedman

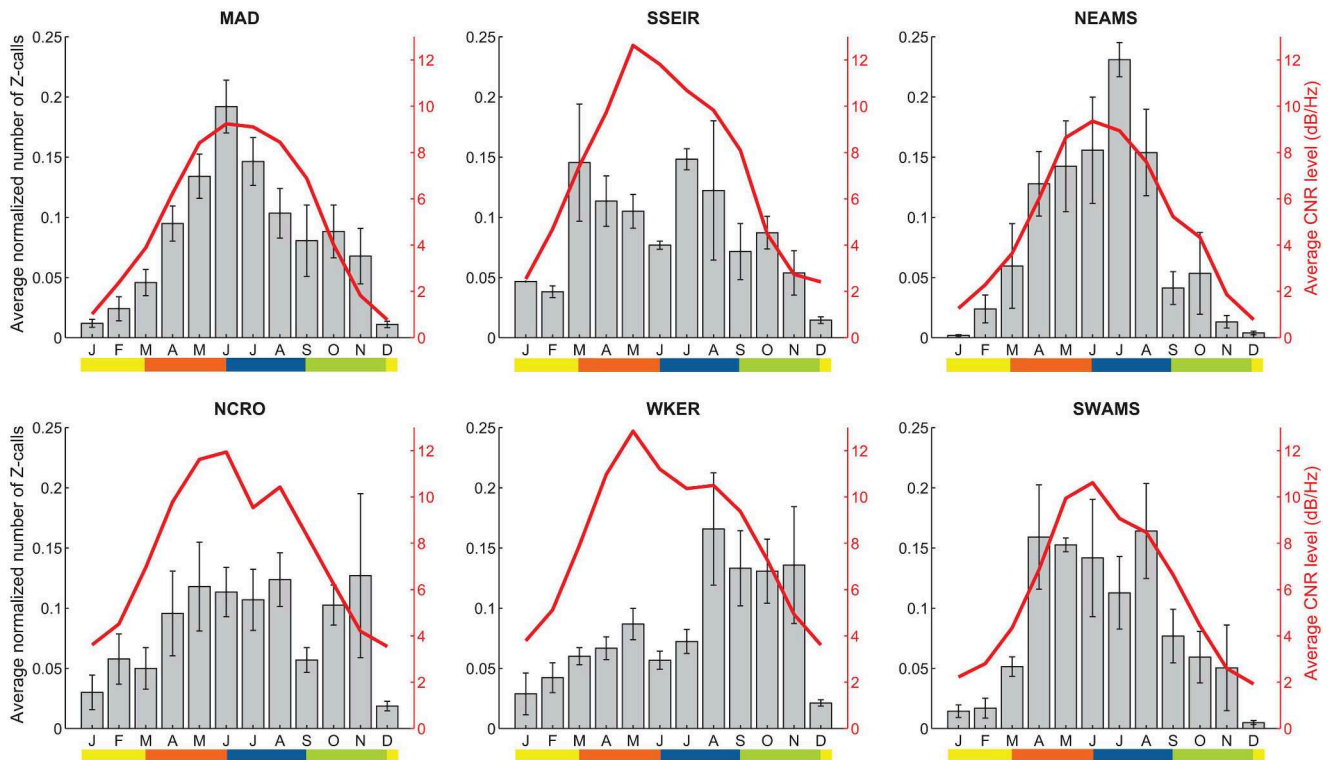


Fig 6. Normalized number of Z-calls detected per month averaged over the available years of data for each station, and corresponding Chorus to Noise-without-chorus Ratio (CNR) level (red curves). The color bar represents the seasons (yellow: summer; brown: autumn; blue: winter; green: spring).

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g006

tests, respectively for MAD, NEAMS, NCRO, WKER and SWAMS, *Friedman chi – squared* = 0.8; 1.13; 1.84; 3.1; 0.26; all with a probability p in favor of the null hypothesis > 0.05). For SSEIR site, a Wilcoxon test for paired data (V) shows no significant difference between the two years of data (Wilcoxon paired test, $V = 34$, $p = 0.96$). This allows averaging the normalized monthly distributions over the available years for these sites and to compare them with the corresponding averaged Chorus to Noise-without-chorus Ratio (CNR) levels (Fig 6).

At these six sites, Z-calls are recorded throughout the year, but with strong seasonal patterns that differ between locations. At MAD station, Z-calls are mainly detected from April to November (austral autumn to spring), with a detection peak in June (during winter). The mean CNR fits the average monthly distribution, and thus confirms the information provided by the detections. A very low number of Z-calls is detected during austral summer, consistent with the very low CNR level (around 1 dB/Hz). This is also the case for the NEAMS station. At this station, Z-calls are also detected from autumn to spring, with a more important presence from April to August (from late autumn to early spring), and a detection peak in July. Here again, the averaged CNR ratio fits pretty well with the detection number.

Only two years of recordings are currently available at the SSEIR site, deployed since 2014. Z-calls are mainly detected from March to November (autumn to spring), with a higher presence in the beginning of autumn and in winter. However there is no simple pattern, and this distribution differs from the CNR level, which reaches its maximum in May and progressively decreases until November.

Seasonality at NCRO station is also unclear. Z-calls are mostly present from April to November (autumn to late spring), with no detection peak. The CNR level does not match the detection numbers: beginning at a higher summer level than in the previously described stations (around 3 dB/Hz), it shows a level increase in autumn, until May-June, a slight decrease in June-July, a small increase from July to August, and then a steady decrease until December. Furthermore, the number of detected Z-calls during the austral summer, although lower than the rest of the year, is greater than for the northernmost stations, which is consistent with the higher CNR level observed at this period. This last observation also stands for WKER, where Z-calls are detected throughout the year, with a main presence from August to November, during spring. Despite the lower presence of Z-calls in autumn, the CNR level sharply increases from February to May, then decreases until July, levels in August, and finally decreases until December. Visual inspections of some of these periods with high CNR level and low detection numbers indicate the presence of highly degraded signals that cannot be called “Z-calls” anymore (i.e. an experimented human perator would not have annotated them as Z-calls). Thus, such a low detection number is not due to a large miss-detection number. Finally, at SWAMS station, Z-calls are detected from March to November, with a strong increase in the detection number in April (mid-autumn), and again in August (late winter), both followed by a progressive decrease of Z-calls. During the summer months, very few Z-calls are recorded. The CNR confirms these observations, with a level increase (initially at about 2 dB/Hz) from March to June, a decrease until July and August, followed by a steep decrease until December.

Diel pattern

Detection rates per light regime were averaged over the seasons of Antarctic blue whale presence, depending on the site. At MAD, SSEIR, NEAMS and SWAMS, they were averaged over autumn, winter and spring; and over the entire year at NCRO and WKER (see Seasonal patterns). For each station, the null hypothesis that the call rate is the same for the four light regimes is rejected by Kruskal-Wallis tests (*KW*) (respectively for MAD, SSEIR, NEAMS, NCRO, WKER and SWAMS: $KW = 195.1; 98.9; 43.6; 101.2; 342.4; \text{ and } 184.9$; all with a probability $p < 0.001$). Wilcoxon pairwise comparison tests (*W*) show that for all stations, day and night periods are significantly different from one another, with more Z-calls emitted in daytime than in nighttime (respectively for MAD, SSEIR, NEAMS, NCRO, WKER and SWAMS: $W = 1,270,400; 208,642; 632,154; 997,499; 2,131,618; 1,127,672$; all with $p < 0.001$) (Fig 7). For dawn and dusk periods, there is an important variance in the calling rate for both light regimes, with a great number of outliers, which explains the large difference between mean and median. Thus no trend can be found for these intermediate periods.

Discussion

In 2007, Branch et al. [5] reviewed existing datasets of catches, sightings and acoustic records, and concluded that, despite records in the northern Indian Ocean, along the Australian coast, and south of 35°S, blue whales were absent in the south-central Indian Ocean. In 2010 and 2013, Samaran et al. [11, 12] showed, however, that Antarctic blue whales are in fact present in this area, especially during winter months. Furthermore, these authors found that the central and southern Indian Ocean could be a year-round habitat for at least four populations of blue whales, including the Antarctic subspecies. Although this evidence changed our view of the Antarctic blue whale seasonal distribution in the Southern and Indian oceans, they are based on limited sites and years of observation. Our extended data set, spanning six years and a wide range of latitudes and longitudes in the central and southern Indian Ocean provides a more complete view of the Antarctic blue whale presence and seasonality in this region and how they evolve through time.

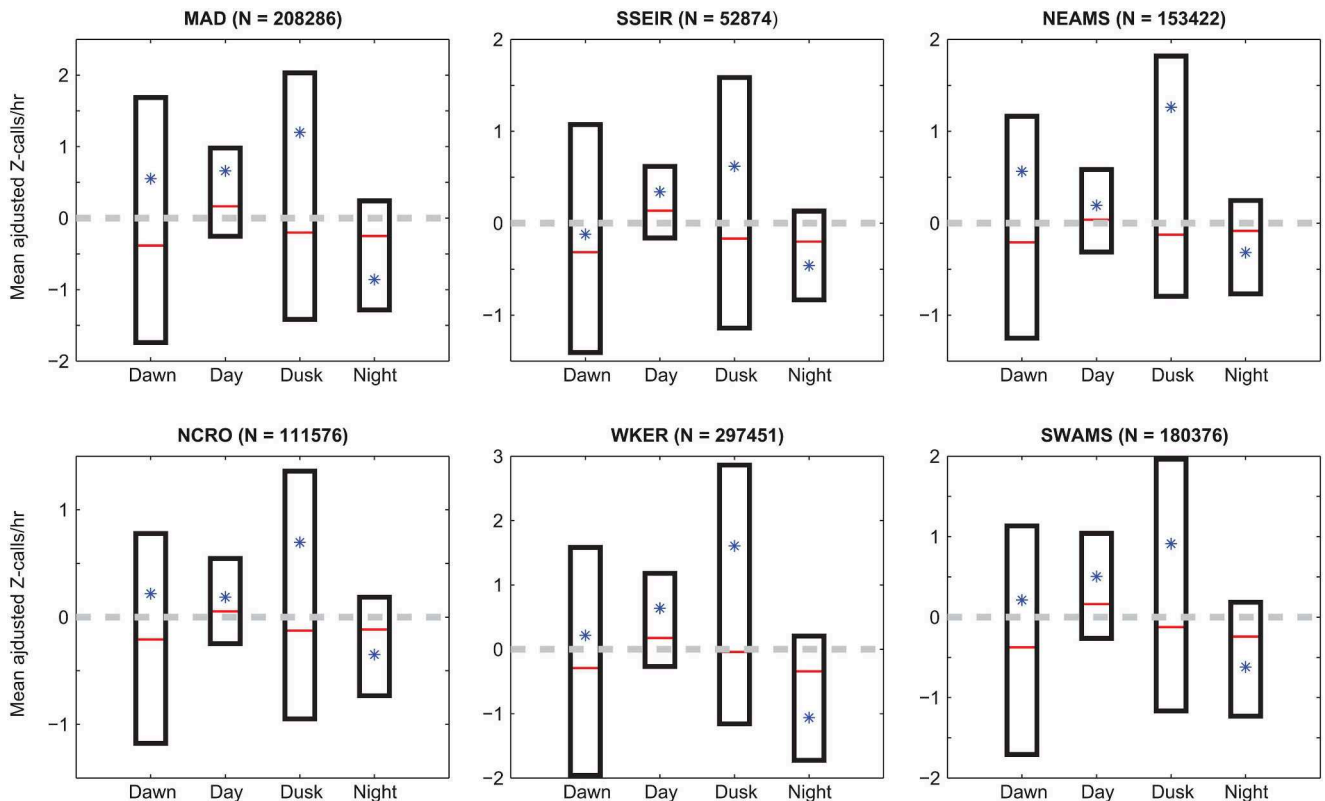


Fig 7. Boxplot of mean-adjusted number of detections per hour during four light regimes, averaged over available years of data for each station and over seasons of Antarctic blue whale presence of the corresponding station (autumn, winter and spring for MAD, NEAMS, SSEIR and SWAMS; the entire year for NCRO and WKER). Lower and upper bounds of boxes represent lower and upper quartiles, respectively. Red lines are median values and asterisks are mean values. Note that means (asterisks) sometimes differ from median due to many outliers, not shown in the graphic for more readability. *N* is the total number of detections during the seasons of presence.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g007

Ambient noise

A clear higher level in the ambient noise is observed at the RAMA station, in the Central Indian Basin, than in the rest of the OHASISBIO sites; it is likely due to a greater contribution of shipping noise at these latitudes [39]. Contrary to what is expected and generally observed [42], the deep water ambient noise level measured at our stations in the 40–60 Hz frequency band is decreasing from 2010 to 2015, especially at MAD and NEAMS sites. This notable decrease is not totally surprising, since a similar observation is made in the South Atlantic Ocean [43]. However, at Diego Garcia Island, ambient noise in the 40–60 Hz frequency-band has been increasing in the past decades [29]. Further analyses of these long-term inter-annual changes in the ambient noise are beyond the scope of our study. Our purpose, here, is to make sure that changes in the number of detected Z-calls are unrelated to changes in the ambient noise level. Indeed, looking at the inter-annual variation of the total number of Z-calls per day throughout the years, it can be observed, for example at MAD station, that despite the ambient noise level decreasing over the years, the detection numbers remain quite stable, except in 2014 where it is higher, but not linked to any major decrease of the ambient noise. Furthermore, the observed seasonality in the number of Z-calls is also not linked to the intra-annual variations in the noise level. As an example, at MAD and NEAMS stations, Z-calls are mainly detected during

austral winter and are scarce during summertime, whilst the ambient noise level remains stable throughout the year. Thus, the observed seasonal patterns do reflect variations in the whale presence, and are not due to better or lesser performances of our Z-detector in a varying ambient noise.

Site frequentation

Antarctic blue whale Z-calls are detected at every site of the network, except at RAMA. Their absence at 4°S is not surprising, since Antarctic blue whales would not migrate much above subtropical latitudes [6]. The year-round presence of Z-calls at all other sites, the consistency of these detections over the years and the important number of detected calls demonstrate that the south-central and the southern Indian Ocean is a wintering area for the Antarctic Blue whales, as previously suggested [11, 12]. The number of detected Z-calls per year is quite important at every site, indicating that all sites are attended, and that the entire region covered by our network is within the distribution area of Antarctic blue whales. The global attendance is however lesser at NCRO station, which is surprising, given the very high number of Z-calls reported near Crozet in 2004-2005 [22]. In this latter study, the monthly number reached a maximum of about 20,000 Z-calls and was usually comprised between 5,000 and 10,000 calls for most of the other months, whereas over all our years of data, this number reaches a maximum of about 10,000 Z-calls and is below 5,000 for most of the other months. The location near Crozet Islands of the hydrophones used in [22] may explain these differences, since the shallow environmental conditions off Crozet Islands [11] would make the habitat more favorable than in the open ocean. But it is also possible that changes in these conditions and/or in the attendance of the area occurred since 2005. SSEIR station is also globally less attended than the other sites, meaning that its location is less favorable in terms of environmental conditions, but two years of data are insufficient to draw any definitive conclusion. Additional records from the coming years will help refining this observation.

The species thus seems to spread over a wide range of longitudes in the subtropical and subantarctic waters of the Indian Ocean, since Z-calls have been recorded off Australia [6, 8, 9, 12]. Nevertheless, the number of calls reported in these studies is much lower than at our stations. Indeed, Stafford et al. [6] detected a maximum of 700 Z-calls in a single month, when it can reach up to about 19,000 detections at our stations. Tripovich et al. [9] detected 15,064 Z-calls over 15 months, that average to about 33 calls per day, whereas the lowest number of detections per day in our data set is about 47. Keeping in mind that the detection methods are different between studies, and that the number of detected calls depends on the detection range of each station, it can be carefully assumed that Antarctic blue whales are less present in the eastern part of the Indian Ocean and seem to prefer the west and central parts. Extending acoustic monitoring in the eastern longitudes would help refining this result.

The spread of vocalizing individuals in the study area changes from year to year, since the annual number of detections varies between years at a station and non-homogeneously among stations. It suggests that, given that the migration movements govern the whale attendance at different locations, these movements vary from year to year. In other words, one station can be more frequented one year, and less the following year. Thus, individuals or groups of individuals do not always use the same migration routes and/or change of wintering area between years, as noticed during commercial whaling [6]. Environmental conditions could be responsible for these changes, making sites more or less suitable. Although it was traditionally thought that baleen whales fast during migration and at breeding grounds, wintering areas seem to be determined by the availability and abundance of krill during the austral winter [5, 44]. Analyzing how the environmental conditions change over the years may help exploring this

hypothesis and understanding, for instance, the large increase of detected calls in 2014. It is also possible that changes in migration routes reflect changes of breeding areas, which would lead to a genetic mixing, given that the stereotyped Z-calls are likely emitted by solitary traveling males and may have a reproductive function, by analogy with the eastern North Pacific blue whale calls [24].

Furthermore, from this non-homogeneous variation in the annual detections between stations, it is impossible to infer an evolution in the overall population size or at least of its calling part, under the basic assumption that Z-call numbers are a proxy for the number of individuals [12]. These results emphasize the importance of multi-site studies, and the danger of hasty conclusions about the evolution of a population size with a single site. For example, looking at the Z-call numbers at NEAMS site only would lead to the conclusion that the population size is growing over the years, whereas looking at MAD or NCRO stations, the conclusion would be that the population is stagnating.

Differences in the detection numbers between sites may also reflect differences in the detection range. Z-call detection range has been estimated at up to 200 km [40, 41], but is likely to vary with the environmental conditions surrounding the hydrophone, according to the latitude and season (e.g. [45–47]). Detection range will also depend on the noise level, the source level and the depth of the vocalizing whale. These parameters are poorly known and small variations in their estimate greatly impact the detection range. Simple Monte-Carlo simulations, assuming realistic input parameters, show that the detection range can vary from a few hundred kilometers to nearly 1000 km (Rémi Emmetière, personal communication 2016). Given the large uncertainties in predicted detection ranges (e.g. [45]), we believe that normalizing the detection numbers by these distances would introduce a more arbitrary bias than assuming equal (unknown) detection ranges for all sites at all seasons.

Seasonal patterns

Despite the fact that individuals could change their migration routes and wintering areas, and spread differently in the study area from one year to another, strong seasonal patterns govern their presence at each site. Such migration patterns, occurring between low-latitude breeding grounds and high-latitude feeding grounds, have been early noticed from visual observations and whaling data (e.g. [3, 48]) and recently confirmed by passive acoustic monitoring in the Indian and Southern oceans [6, 7, 11–13]. The current study shows that despite an inter-annual variation in the total number of Z-calls per year, these seasonal patterns are stable between years. Furthermore, our results are consistent with the patterns previously observed in 2007 [12] for the MAD, NEAMS and SWAMS sites, suggesting that no significant change in the Antarctic blue whale seasonal presence occurred in 8 years.

At all stations (except RAMA), Z-calls are present year-round, but are considerably less numerous during summer months. In summer, it is believed that Antarctic blue whales are mainly in the Antarctic feeding grounds [5, 12], where numerous Z-calls are detected [7, 21, 25]. At our northernmost sites, MAD and NEAMS, the number of Z-calls increases from the mid-autumn to reach its maximum during austral winter, then progressively decreases until late spring, meaning that the vocalizing part of the Antarctic blue whale population progressively arrives at these low latitudes, on their way to or settling at wintering grounds, and leaves them in the spring to go south. The progressive increase and decrease of the monthly numbers of Z-calls may reflect the observation that migrations are more in the form of a procession than of a large school movement [3]. Following the hypothesis that our MAD and NEAMS stations are on the migration route to wintering areas, it would mean that Antarctic blue whales migrate further north. Z-call detections near Diego Garcia Island [6] show peaks in May and June for

Diego Garcia North (6.3°S, 71.0°E) and in July for Diego Garcia South (7.6°S, 72.5°E), indicating that some Antarctic blue whales reach these very low latitudes. However, these detection peaks are less than 750 calls, while at MAD and NEAMS stations, over the 4 (at NEAMS) to 6 (at MAD) years of data, they range from 4,000 calls for the weakest peak, to about 18,800 calls for the highest one. Although the detection methods differ, we assume that their performances cannot be that different. Thus, it can be concluded that out of the number of Antarctic blue whales detected at MAD or NEAMS station, only few individuals migrate to lower latitudes such as Diego Garcia. Wintering at such northern latitudes would explain the passage of whales and hence the important number of Z-calls until late spring near MAD and NEAMS on their way to the Antarctic feeding grounds. Nonetheless, this observation near Diego Garcia being from 2002–2003 [6], it may also be possible that Antarctic blue whale seasonal presence has changed since then. The exact location of the Antarctic blue whale breeding areas is still not precisely known [44]. It appears therefore that, contrary to other baleen whale species such as humpback, gray or right whales, blue whales seem to spread out very widely across the oceans for breeding. Complementing earlier observations [6, 12], our data suggest that wintering, possibly breeding, grounds encompass all latitudes between 26°S (MAD) or 31°S (NEAMS) and up to a northern limit at 7°S (Diego Garcia), since no Z-calls are recorded at RAMA (4°S).

The limited dataset (2 years) at the SSEIR station suggests that this site is located on a migration path from/to wintering areas north of MAD and NEAMS latitudes and Antarctica. It would explain the larger occurrence of Z-calls in autumn, late winter and spring than in summer.

For the three subantarctic stations, the CNR patterns, which increase in autumn, decrease during winter and increase again in spring indicate that in these areas, whales are mainly present during autumn and spring, matching respectively with their northward and southward migrations, and are less present in winter, when they are at northern latitudes, in the wintering area. At SWAMS, Z-calls are mainly detected in autumn, then in early spring, suggesting the passage of blue whales near the site in autumn to wintering areas, and in spring to feeding areas. The progressive decrease of detected calls along the seasons could indicate a time-lagged migration [49]. At WKER, Z-calls are mainly detected in spring, suggesting that the site is on the southward migration route; their limited number in autumn, despite a very high CNR level, suggests that whales are not close enough to WKER to be detected, but are not totally absent of the area. The northward migration route could thus be located out of the Z-call-detection range. The CNR detection range, even more than the Z-call detection range, is not precisely known. Adding Z-calls from several individuals at various distances to form a chorus is also difficult to simulate, and its detection range is thus hard to assess. However, it is safe to assume that the chorus detection range is larger than the Z-call detection range, providing a broader acoustic “view” than individual Z-calls, and is smaller than the distance between each site. Even if not fully understood, CNR provides a useful metric for interpreting Z-call numbers and tempering any conclusion on the absence or presence of Antarctic whales from Z-call detections only (SSEIR and WKER are good examples). Finally, the NCRO station is the most peculiar. Antarctic blue whales are present almost throughout the year, with no obvious pattern in the detection number. Our results are consistent with those of Samaran et al. [49], who suspected a mid-latitude Antarctic blue whale wintering area, or a time-lagged migration.

According to the migration paradigm described earlier [3], Antarctic blue whales winter in subtropical to subantarctic latitudes and feed in the summer in the high latitudes near Antarctica. Our data confirm this general picture, however Z-calls are also recorded in the summer at all sites. Conversely, Z-calls are recorded during the winter months off Antarctica [7, 21, 25]. This observation means that parts of the population of whales remain and probably feed in the subtropical to subantarctic latitudes in the summer as well as in the high latitudes during

winter. Their migration pattern thus looks more complex with time-lags between individuals, perhaps depending on their conditions (sex, age, etc). Off South African west coast, most of the blue whales caught during whaling were immature juveniles, as well as pregnant females, suggesting that this part of the population choose not to migrate and stay in the subtropical and subantarctic waters [50]. This would explain the continuous flux of vocalizing whales year-round in the study area. Furthermore, WKER and NCRO both present a higher number of Z-calls during summer months than the other sites, suggesting that the Crozet and Kerguelen plateaus are favorable feeding areas for individuals that do not migrate south [12].

Diel pattern

Calling rates of Antarctic blue whale follow a diel pattern, with significantly less calls emitted during nighttime than during daytime. In the eastern tropical Pacific, blue whales emit more stereotyped vocalizations at night [31, 32]. These studies showed an anti-correlation between vocalizing and feeding activities, assuming that during feeding lunges, blue whales are unable to vocalize. Indeed, blue whales cannot produce their long-duration, low-frequency and high-level calls at depth greater than 40m [51, 52]. Furthermore, since feeding and singing are not mutually compatible, blue whales could use their travel time between prey patches to signal them to potential mates, with little extra energy expenditure [24]. At our latitudes, the main prey of blue whales are especially krill (*Euphausia vallentini* and *Euphausia frigida*), as well as myctophids (*Myctophum punctatum*) [49, 53]. Although the diel migration of these species is not well documented in our study area, they are known to migrate at lower depth and to be more diverse and dense at night [54–56]. This would explain the lesser number of calls of Antarctic blue whales at night and validate the trade-off between feeding and vocalizing activities formulated in previous studies [24, 31, 32]. However, off the Australian coast, the Antarctic blue whales are found to vocalize more during the night [9], but no explanation is provided. It could be because they feed on other species of prey, with different migration pattern, given that there is considerable variation between krill species behaviors [57]. In addition, feeding habits of blue whales remain uncertain; they have been observed to feed on krill when it swarms at the sea surface, and also in deep dives [58]. Furthermore, linking the observed diel calling pattern with the availability of prey implies that blue whales feed not only during summer months, but also during their migration. This hypothesis is consistent with the fact that the blue whale distribution in winter seems also influenced by feeding opportunities [5].

Conclusion

This study, based on an analysis of Antarctic blue whale Z-calls, provides a more comprehensive picture about this whale species distribution in the Southern Indian Ocean, than in previous studies [11, 12]. Our extended acoustic dataset spanning up to 6 years, 42 degrees in latitude and 28 degrees in longitude shows 1) that Antarctic blue whales are present year-round in subantarctic and subtropical latitudes of the Indian Ocean, with a lesser presence in the austral summer, 2) that the distribution of Antarctic blue whales is highly seasonal, 3) that the seasonal patterns differ between sites but remain stable over the years, 4) that their wintering area may expand from 26°S and 7°S, and 5) the existence of a diel pattern in the emission of Z-calls, more frequent in daytime than in nighttime. Z-calls are mainly detected during autumn and spring at the subantarctic locations, suggesting that these sites are on the Antarctic blue whale migration routes, and mostly during winter at the subtropical sites, supporting the presence of a wintering and possibly breeding area at these latitudes. An analysis at a finer temporal scale is nevertheless needed to understand the inter-annual variation in sites attendance in the light of environmental condition changes, and to link the observed patterns of whale presence

and call emission with environmental parameters such as sea surface temperature, chlorophyll concentration or presence of krill and myctophids in the instrumented areas. This paper also highlights the value of a multi-year and multi-sites acoustic monitoring and the caution that must be exerted when interpreting data from a single site over a limited period, for instance in terms of population evolution. Our results further demonstrate the performances of an automated Z-detector and the usefulness of jointly monitoring the Chorus to Noise-without-chorus Ratio. It would be worth complementing this study with acoustic records from the feeding areas of Antarctic blue whales, off Antarctica, and using a similar approach to be fully comparable.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Captains and crews of RV Marion Dufresne for the successful deployments and recoveries of the hydrophones of the OHASISBIO experiment and of ORV Sagar Kanya for the recovery of the RAMA hydrophone. French cruises were funded by the French Polar Institute (IPEV; cruises VT109/112-MD174/175, VT115-MD185, VT119-MD189, VT128-MD193, VT135-MD197, VT141-MD200 and VT146-MD201), with additional support from INSU-CNRS. We thank NOAA/PMEL and INCOIS for the opportunity to recover the RAMA hydrophone. E.C.L. was supported by a Ph.D. fellowship from the University of Brest and from the Regional Council of Brittany (Conseil Régional de Bretagne). The contribution of Mickael Beauverger at LGO in the preparation and realization of the cruises is greatly appreciated. Comments from three anonymous reviewers greatly helped improving this manuscript.

Author Contributions

Conceptualization: ECL JB FS JYR.

Formal analysis: ECL.

Funding acquisition: JYR.

Investigation: ECL JB FS JYR.

Methodology: ECL JB FS JYR.

Project administration: JYR.

Supervision: JYR JB FS.

Validation: JYC XBL.

Visualization: ECL.

Writing – original draft: ECL.

Writing – review & editing: ECL JB FS JYR.

References

1. Branch TA, Matsuoka K, Miyashita T. Evidence for increases in Antarctic blue whales based on Bayesian modelling. *Marine Mammal Science*. 2004; 20(4):726–754. doi: [10.1111/j.1748-7692.2004.tb01190.x](https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2004.tb01190.x)
2. Reilly S, Bannister J, Best P, Brown M, Brownell R Jr, Butterworth D, et al. *Balaenoptera musculus*. IUCN Red List of Threatened Species. Gland, Switzerland: IUCN; 2008.
3. Mackintosh N. The distribution of southern blue and fin whales. In: Norris KS (Ed.), *Whales, dolphins, and porpoises*, University of California Press, Berkeley. 1966;p. 125–144.

4. Branch T. Abundance of Antarctic blue whales south of 60 S from three complete circumpolar sets of surveys. *J Cetacean Res Manage*. 2007; 9(3):253–262.
5. Branch T, Stafford K, Palacios D, Allison C, Bannister J, Burton C, et al. Past and present distribution, densities and movements of blue whales *Balaenoptera musculus* in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean. *Mammal Review*. 2007; 37(2):116–175. doi: [10.1111/j.1365-2907.2007.00106.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00106.x)
6. Stafford KM, Bohnenstiehl DR, Tolstoy M, Chapp E, Mellinger DK, Moore SE. Antarctic-type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans. *Deep Sea Research Part I*. 2004; 51(10):1337–1346. doi: [10.1016/j.dsr.2004.05.007](https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.05.007)
7. Širović A, Hildebrand JA, Wiggins SM, Thiele D. Blue and fin whale acoustic presence around Antarctica during 2003 and 2004. *Marine Mammal Science*. 2009; 25(1):125–136. doi: [10.1111/j.1748-7692.2008.00239.x](https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2008.00239.x)
8. Gedamke J, Gales N, Hildebrand J, Wiggins S. Seasonal occurrence of low frequency whale vocalisations across eastern Antarctic and southern Australian waters, February 2004 to February 2007. White paper presented to the Scientific Committee of the International Whaling Commission. 2007.
9. Tripovich JS, Klinck H, Niekirk SL, Adams T, Mellinger DK, Balcazar NE, et al. Temporal segregation of the Australian and Antarctic blue whale call types (*Balaenoptera musculus* spp.). *Journal of Mammalogy*. 2015; 96(3):603–610. doi: [10.1093/jmammal/gyv065](https://doi.org/10.1093/jmammal/gyv065) PMID: [26937046](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26937046/)
10. McDonald MA. An acoustic survey of baleen whales off Great Barrier Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 2006; 40(4):519–529. doi: [10.1080/00288330.2006.9517442](https://doi.org/10.1080/00288330.2006.9517442)
11. Samaran F, Adam O, Guinet C. Discovery of a mid-latitude sympatric area for two Southern Hemisphere blue whale subspecies. *Endangered Species Research*. 2010; 12(2):157–165. doi: [10.3354/esr00302](https://doi.org/10.3354/esr00302)
12. Samaran F, Stafford KM, Branch TA, Gedamke J, Royer JY, Dziak RP, et al. Seasonal and geographic variation of southern blue whale subspecies in the Indian Ocean. *PLoS ONE*. 2013; 8(8):e71561–e71561. doi: [10.1371/journal.pone.0071561](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071561) PMID: [23967221](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23967221/)
13. Mellinger DK, Stafford KM, Moore S, Dziak RP, Matsumoto H. Fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*. 2007; 20(4):36–45. doi: [10.5670/oceanog.2007.03](https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.03)
14. Miller BS, Barlow J, Calderan S, Collins K, Leaper R, Olson P, et al. Validating the reliability of passive acoustic localisation: a novel method for encountering rare and remote Antarctic blue whales. *Endangered Species Research*. 2015; 26(3):257–269. doi: [10.3354/esr00642](https://doi.org/10.3354/esr00642)
15. Ljungblad DK, Clark CW, Shimada H. SC/49/SH17 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-International Whaling Commission. 1998; 48:439–442.
16. Rankin S, Ljungblad D, Clark C, Kato H. Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 IWC/SOWER circumpolar cruises, Area V, Antarctica. *Journal of Cetacean Research and Management*. 2005; 7(1):13–20.
17. McDonald MA, Hildebrand JA, Mesnick S. Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs. *Endangered Species Research*. 2009; 9(1):13–21. doi: [10.3354/esr00217](https://doi.org/10.3354/esr00217)
18. Gavrilov AN, McCauley RD, Salgado-Kent C, Tripovich J, Burton C. Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time. *The Journal of Acoustical Society of America*. 2011; 130(6):3651–3660. doi: [10.1121/1.3651817](https://doi.org/10.1121/1.3651817) PMID: [22225022](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22225022/)
19. Gavrilov AN, McCauley RD, Gedamke J. Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of Antarctic blue whales. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012; 131(6):4476–4480. doi: [10.1121/1.4707425](https://doi.org/10.1121/1.4707425) PMID: [22712920](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22712920/)
20. Miller BS, Leaper R, Calderan S, Gedamke J. Red Shift, Blue Shift: Investigating Doppler Shifts, Blubber Thickness, and Migration as Explanations of Seasonal Variation in the Tonality of Antarctic Blue Whale Song. *PLoS ONE*. 2014; 9(9):e107740. doi: [10.1371/journal.pone.0107740](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107740) PMID: [25229644](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25229644/)
21. Širović A, Hildebrand JA, Wiggins SM, McDonald MA, Moore SE, Thiele D. Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II*. 2004; 51(17):2327–2344.
22. Samaran F, Adam O, Motsch JF, Guinet C. Definition of the Antarctic and pygmy blue whale call templates. Application to fast automatic detection. *Canadian Acoustics*. 2008; 36(1):93–103.
23. Croll DA, Clark CW, Acevedo A, Tershy B, Flores S, Gedamke J, et al. Bioacoustics: Only male fin whales sing loud songs. *Nature*. 2002; 417(6891):809–809. doi: [10.1038/417809a](https://doi.org/10.1038/417809a) PMID: [12075339](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12075339/)

24. Oleson EM, Calambokidis J, Burgess WC, McDonald MA, LeDuc CA, Hildebrand JA. Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. *Marine Ecology-Progress Series*. 2007; 330:269–284. doi: [10.3354/meps330269](https://doi.org/10.3354/meps330269)
25. Thomisch K, Boebel O, Clark CW, Hagen W, Spiesecke S, Zitterbart DP, et al. Spatio-temporal patterns in acoustic presence and distribution of Antarctic blue whales *Balaenoptera musculus intermedia* in the Weddell Sea. *Endangered Species Research*. 2016; 30:239–253. doi: [10.3354/esr00739](https://doi.org/10.3354/esr00739)
26. Royer JY, Chateau R, Dziak R, Bohnenstiehl D. Seafloor seismicity, Antarctic ice-sounds, cetacean vocalizations and long-term ambient sound in the Indian Ocean basin. *Geophysical Journal International*. 2015; 202(2):748–762. doi: [10.1093/gji/ggv178](https://doi.org/10.1093/gji/ggv178)
27. Tsang-Hin-Sun E, Royer JY, Perrot J. Seismicity and active accretion processes at the ultraslow-spreading Southwest and intermediate-spreading Southeast Indian ridges from hydroacoustic data. *Geophysical Journal International*. 2016; in press. doi: [10.1093/gji/ggw201](https://doi.org/10.1093/gji/ggw201)
28. Socheleau FX, Leroy E, Pecci AC, Samaran F, Bonnel J, Royer JY. Automated detection of Antarctic blue whale calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2015; 138(5):3105–3117. doi: [10.1121/1.4934271](https://doi.org/10.1121/1.4934271) PMID: [26627784](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26627784/)
29. Miksis-Olds JL, Bradley DL, Niu XM. Decadal trends in Indian Ocean ambient sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013; 134(5):3464–3475. doi: [10.1121/1.4821537](https://doi.org/10.1121/1.4821537) PMID: [24180757](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24180757/)
30. Bolker BM, Brooks ME, Clark CJ, Geange SW, Poulsen JR, Stevens MHH, et al. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in ecology & evolution*. 2009; 24(3):127–135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008> PMID: [19185386](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19185386/)
31. Stafford KM, Moore SE, Fox CG. Diel variation in blue whale calls recorded in the eastern tropical Pacific. *Animal Behaviour*. 2005; 69(4):951–958. doi: [10.1016/j.anbehav.2004.06.025](https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2004.06.025)
32. Wiggins SM, Oleson EM, McDonald MA, Hildebrand JA. Blue whale (*Balaenoptera musculus*) diel call patterns offshore of Southern California. *Aquatic Mammals*. 2005; 31(2):161. doi: [10.1578/AM.31.2.2005.161](https://doi.org/10.1578/AM.31.2.2005.161)
33. Kruskal WH, Wallis WA. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *The Journal of the American statistical Association*. 1952; 47(260):583–621. doi: [10.1080/01621459.1952.10483441](https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441)
34. Wilcoxon F. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics bulletin*. 1945; 1(6):80–83. doi: [10.2307/3001968](https://doi.org/10.2307/3001968)
35. Bonferroni CE. Il calcolo delle assicurazioni su gruppi di teste. Tipografia del Senato; 1935.
36. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria; 2016. Available from: <https://www.R-project.org>.
37. Stan Development Team. RStanArm: Bayesian applied regression modeling via Stan; 2016. Available from: <http://mc-stan.org>.
38. Miksis-Olds JL, Vernon JA, Heaney KD. The impact of ocean sound dynamics on estimates of signal detection range. *Aquatic Mammals*. 2015; 41(4):444. doi: [10.1578/AM.41.4.2015.444](https://doi.org/10.1578/AM.41.4.2015.444)
39. Tsang-Hin-Sun E, Royer JY, Leroy EC. Low-frequency sound level in the Southern Indian Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2015; 138(6):3439–3446. doi: [10.1121/1.4936855](https://doi.org/10.1121/1.4936855) PMID: [26723301](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26723301/)
40. Samaran F, Adam O, Guinet C. Detection range modeling of blue whale calls in Southwestern Indian Ocean. *Applied Acoustics*. 2010; 71(11):1099–1106. doi: [10.1016/j.apacoust.2010.05.014](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.05.014)
41. Širović A, Hildebrand JA, Wiggins SM. Blue and fin whale call source levels and propagation range in the Southern Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2007; 122(2):1208–1215. doi: [10.1121/1.2749452](https://doi.org/10.1121/1.2749452) PMID: [17672667](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17672667/)
42. McDonald MA, Hildebrand JA, Wiggins SM. Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2006; 120(2):711–718. doi: [10.1121/1.2216565](https://doi.org/10.1121/1.2216565) PMID: [16938959](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16938959/)
43. Miksis-Olds JL, Nichols SM. Is low frequency ocean sound increasing globally? *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016; 139(1):501–511. doi: [10.1121/1.4938237](https://doi.org/10.1121/1.4938237) PMID: [26827043](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26827043/)
44. Attard CR, Beheregaray LB, Möller LM. Towards population-level conservation in the critically endangered Antarctic blue whale: the number and distribution of their populations. *Scientific reports*. 2016; 6. doi: [10.1038/srep22291](https://doi.org/10.1038/srep22291) PMID: [26951747](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26951747/)
45. Sirovic A, Rice A, Chou E, Hildebrand JA, Wiggins SM, Roch MA, et al. Seven years of blue and fin whale call abundance in the Southern California Bight. *Endangered Species Research*. 2015; 28(1):61–76. doi: [10.3354/esr00676](https://doi.org/10.3354/esr00676)
46. Helble TA, Gerald L, Hildebrand JA, Campbell GS, Campbell RL, Heaney KD. Site specific probability of passive acoustic detection of humpback whale calls from single fixed hydrophones. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013; 134(3):2556–2570. doi: [10.1121/1.4816581](https://doi.org/10.1121/1.4816581) PMID: [23968053](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23968053/)

47. Helble TA, Gerald L, Campbell GS, Hildebrand JA. Calibrating passive acoustic monitoring: correcting humpback whale call detections for site-specific and time-dependent environmental characteristics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013; 134(5):EL400–EL406. doi: [10.1121/1.4822319](https://doi.org/10.1121/1.4822319) PMID: [24181982](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24181982/)
48. Brown SG. *Dispersal in blue and fin whales*. Cambridge University Press; 1954.
49. Samaran F, Guinet C, Adam O, Motsch JF, Cansi Y. Source level estimation of two blue whale subspecies in southwestern Indian Ocean. *J Acoust Soc Am*. 2010; 127(6):3800–3808. doi: [10.1121/1.3409479](https://doi.org/10.1121/1.3409479) PMID: [20550278](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20550278/)
50. Mackintosh NA, Wheeler JFG, Clowes AJ. *Southern blue and fin whales*. University Press; 1929.
51. Aroyan JL, McDonald MA, Webb SC, Hildebrand JA, Clark D Laitman JT, et al. Acoustic models of sound production and propagation. In: Au WWL, Fay RR, Popper AN (Eds), *Hearing by whales and dolphins*. Springer; 2000. p. 409–469.
52. Thode AM, DSpain G, Kuperman W. Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2000; 107(3):1286–1300. doi: [10.1121/1.428417](https://doi.org/10.1121/1.428417) PMID: [10738784](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10738784/)
53. Nemoto T. Feeding pattern of baleen whales in the ocean. In: Steele JH (Ed.), *Marine food chains*. University of California Press. 1970;p. 241–252.
54. Atkinson A, Ward P, Williams R, Poulet S. Diel vertical migration and feeding of copepods at an oceanic site near South Georgia. *Marine Biology*. 1992; 113(4):583–593. doi: [10.1007/BF00349702](https://doi.org/10.1007/BF00349702)
55. Hamame M, Antezana T. Vertical diel migration and feeding of *Euphausia vallentini* within southern Chilean fjords. *Deep Sea Research Part II*. 2010; 57(7):642–651. doi: [10.1016/j.dsr2.2009.10.013](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.10.013)
56. Duhamel G, Koubbi P, Ravier C. Day and night mesopelagic fish assemblages off the Kerguelen Islands (Southern Ocean). *Polar Biology*. 2000; 23(2):106–112. doi: [10.1007/s003000050015](https://doi.org/10.1007/s003000050015)
57. Gaten E, Tarling G, Dowse H, Kyriacou C, Rosato E. Is vertical migration in Antarctic krill (*Euphausia superba*) influenced by an underlying circadian rhythm? *Journal of genetics*. 2008; 87(5):473–483. doi: [10.1007/s12041-008-0070-y](https://doi.org/10.1007/s12041-008-0070-y) PMID: [19147936](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19147936/)
58. Gill PC, Morrice MG, Page B, Pirzl R, Levings AH, Coyne M, et al. Blue whale habitat selection and within-season distribution in a regional upwelling system off southern Australia. *Marine Ecology Progress Series*. 2011; 421:243–263. doi: [10.3354/meps08914](https://doi.org/10.3354/meps08914)

3.2 Observations complémentaires au sud du réseau OHASISBIO

L'analyse des données du réseau d'hydrophones OHASISBIO a montré que les baleines bleues Antarctique fréquentent la zone d'étude préférentiellement de l'automne au printemps, lorsqu'elles quittent les aires d'alimentation situées en Antarctique et remontent hiverner à de plus basses latitudes. Afin de savoir où se trouve l'espèce lorsqu'elle n'est pas dans notre aire d'écoute, et ainsi d'élargir notre fenêtre d'observation, les enregistrements réalisés à deux sites, plus proches de l'Antarctique et instrumentés par l'*Australian Antarctic Division* (AAD), ont été analysés.

3.2.1 Données et méthodes

Les données mises à disposition par l'AAD proviennent de deux sites différents : SKER (62°27' S, 081°49' E), situé à l'extrémité sud du plateau de Kerguelen, et Casey (63°47' S, 111°47' E), au large de la base antarctique éponyme (Figure 3.1). Les années 2014 et 2015 sont disponibles pour la station SKER, et l'année 2014 pour Casey. Ces enregistrements sont continus, et ont été sous-échantillonnés à 250 Hz (voir le chapitre 1 pour une description plus complète des données). Les dates de déploiement et récupération, ainsi que les profondeurs des hydrophones sont détaillés dans le tableau 3.1. Les données ont été traitées de la même manière que les données du réseau OHASISBIO. Les Z-calls ont été détectés à l'aide du *Z-detector* avec les mêmes paramètres que ceux utilisés pour les années 2014 et 2015 et détaillés dans l'article reproduit plus haut. Cependant dans le chapitre 2, nous avons évoqué le problème de considérer avec un poids égal des détections issues du chorus, donc potentiellement très lointaines, et des détections de cris émis à proximité des instruments. Nous avons également évoqué la possibilité d'utiliser les valeurs de RSB des détections pour discriminer celles-ci sur leur qualité, afin d'estimer grossièrement si les cris détectés ont été émis à proximité ou non du site instrumenté et de nuancer les conclusions sur la présence de l'espèce dans la zone d'écoute (on gardera néanmoins en mémoire que le RSB dépend également du niveau de bruit ambiant ainsi que des conditions de propagation (*e.g.* zones de convergence, zone d'ombre)). Pour prendre en compte ces réflexions méthodologiques, les détections ont été classées par valeur de RSB et comptées par unité de temps. Au total, 17 classes de RSB ont été définies, de moins l'infini à + 30 dB, avec un pas de 5 dB. On notera que pour calculer le RSB de la détection, l'énergie du signal est calculée dans toute la fenêtre d'observation (20 s, entre 15 et

30 Hz) et comparée à l’énergie du bruit dans une fenêtre adjacente. De fait, l’énergie du Z-call est “diluée”, ce qui peut aboutir sur des détections à RSB négatif.

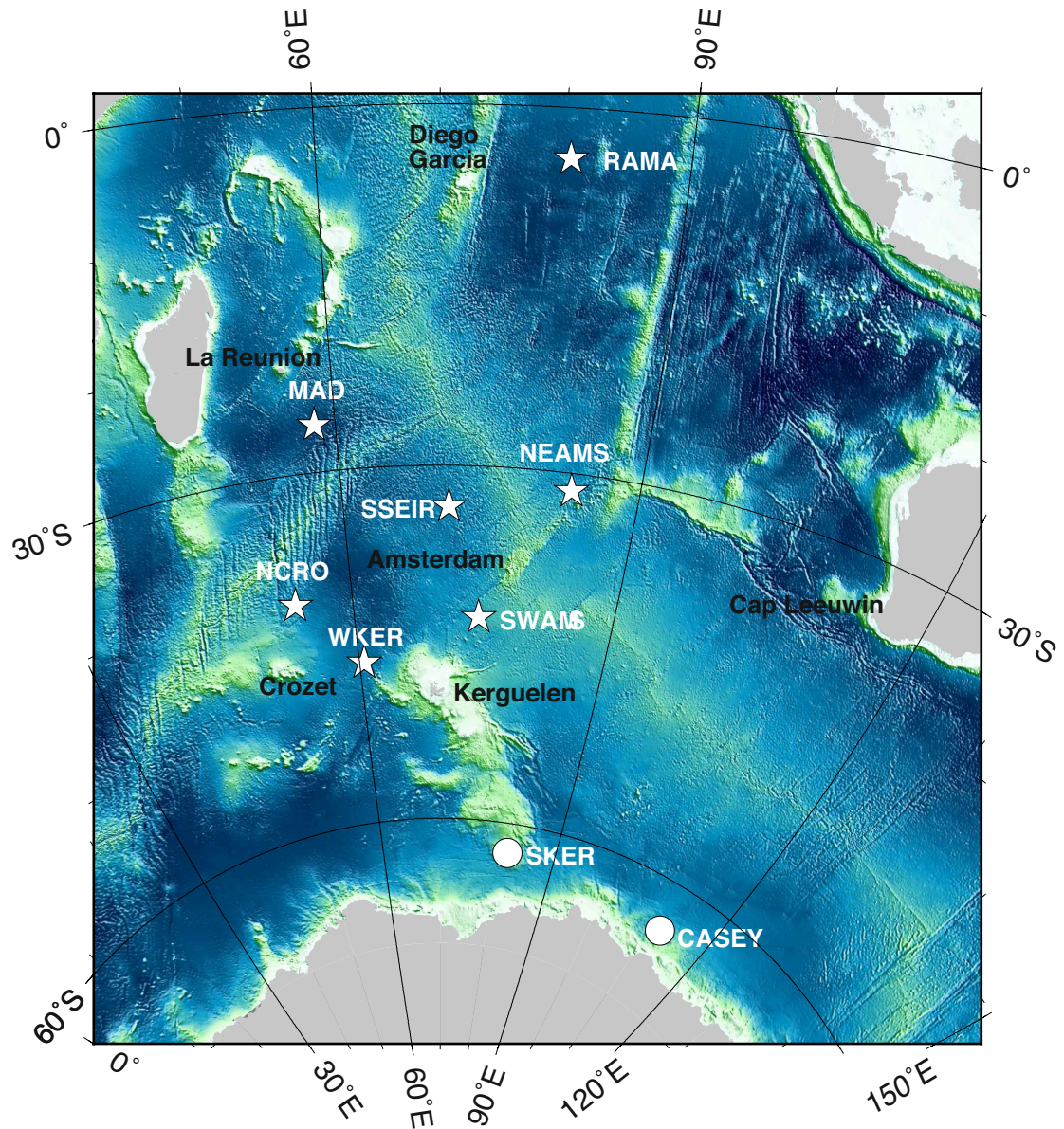


FIGURE 3.1 – Vue générale de la zone d’écoute incluant les sites instrumentés par l’Australian Antarctic Division (SKER et Casey).

3.2.2 Résultats

Au total, 62770 Z-calls ont été détectés au site SKER en 2014 et 71063 en 2015, et 73981 Z-calls ont été détectés au site Casey en 2014. Ceci correspond à une moyenne de 193.9 Z-calls/jour en 2014 et 194.7 Z-calls/jour en 2015 au site SKER, et 206 Z-calls/jour en 2014 à Casey (estimation réalisée à l’aide de GLMM pour

TABLE 3.1 – Sites de déploiement, dates de mise à l'eau et de récupération, et profondeur des instruments de l'Australian Antarctic Division.

Site	Année	Coordonnées	Déploiement	Récupération	Profondeur
SKER	2014	62°27' S, 081°49' E	10/02/14	23/01/15	1800 m
	2015	62°27' S, 081°49' E	29/01/15	29/01/16	1800 m
Casey	2014	63°47' S, 111°47' E	25/12/13	09/12/14	2800 m

prendre en compte les années incomplètes, cf section *Materials and Methods* de l'article ci-dessus). La figure 3.2 présente les nombres mensuels de Z-calls détectés aux deux sites pour les années disponibles. Au site SKER, la majorité des Z-calls sont détectés en juillet-août 2014 et en mars-avril 2015. Au site Casey, les pics de détections ont lieu en mars et avril 2014.

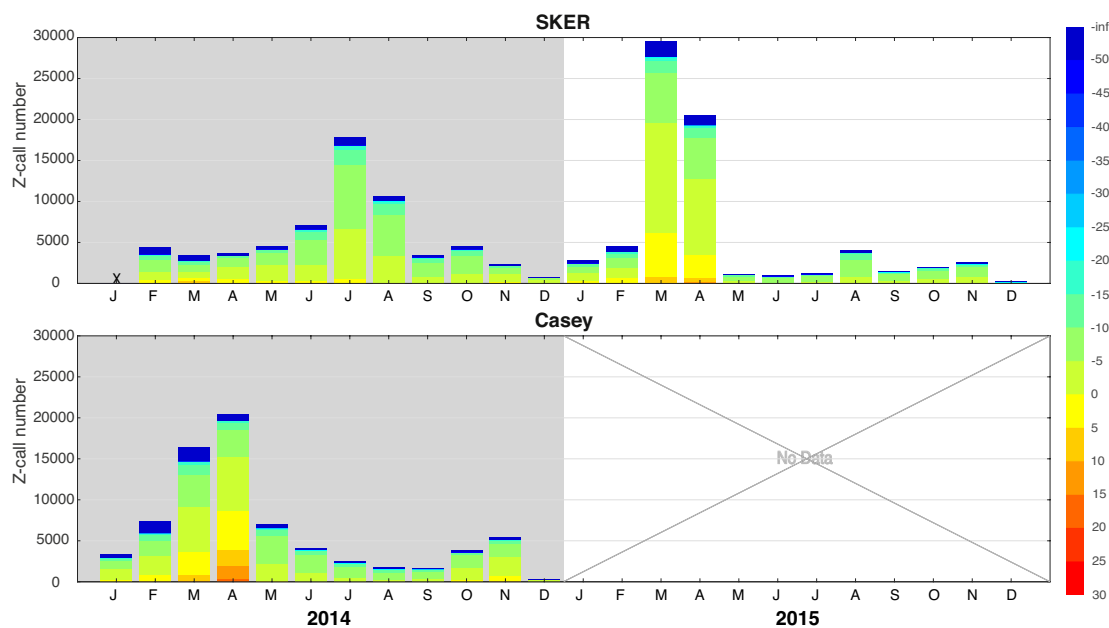


FIGURE 3.2 – Nombre de Z-calls par mois détectés aux sites SKER et Casey en 2014 et 2015. L'échelle de couleur indique le RSB des signaux détectés (en dB).

3.2.3 Discussion

Le nombre total de Z-calls détectés dans l'année est du même ordre de grandeur aux deux sites instrumentés par l'AAD (~ 200 Z-calls/jour). Il est également relativement proche du nombre de cris détectés en 2014 aux stations MAD, WKER et SWAMS, année exceptionnelle en termes de nombres de Z-calls détectés. Les patrons saisonniers diffèrent quant à eux de ceux observés aux sites du réseau OHASISBIO. Au site SKER, pour lequel deux années de données sont disponibles,

ils varient également fortement entre 2014 et 2015. La saisonnalité observée en 2014 y est par ailleurs quelque peu surprenante. Le pic de détections est en effet en juillet-août, c’est-à-dire en plein hiver austral, alors que ce site se situe à relativement haute latitude (62° S). En dehors de ces pics d’occurrence, le nombre de détections par mois reste globalement élevé le reste de l’année (entre 3500 et 4500 Z-calls par mois). Cependant le classement des détections par RSB indique que la majorité de ces détections ont un faible RSB (< -5 dB), ce qui pourrait indiquer que la source des cris détectés ne se situe pas à proximité directe de l’hydrophone. En affinant l’échelle temporelle, on remarque également que ces pics de détections sont concentrés sur une ou deux semaines (Figure 3.3). Malgré cela, il semble tout de même que ces latitudes aient été fréquentées pendant toute l’année 2014 et notamment pendant l’hiver austral. La présence d’individus vocalement actifs à de hautes latitudes durant l’hiver austral a par ailleurs déjà été relatée (*e.g.* Thomisch et al., 2016). Les patrons de détections observés à Casey en 2014 et à SKER en 2015 sont quant à eux plus cohérents avec les patrons saisonniers observés aux latitudes plus basses du réseau OHASISBIO, et sont également cohérents avec les patrons observés à des latitudes similaires à celles des deux sites de l’AAD, mais à d’autres longitudes (Širović et al., 2004, 2009; Thomisch et al., 2016). La forte présence en automne et le faible nombre de détections le reste de l’année suggèrent que ces sites sont fréquentés lors du passage des individus de retour des zones d’alimentation antarctiques. Pour ces deux distributions (Casey 2014 et SKER 2015), les Z-calls détectés ont des RSB relativement élevés (> -5 dB), qui permettent d’émettre précautionneusement l’hypothèse de sources proches des instruments. Les distributions de nombre de Z-calls par semaine indiquent en outre que ces pics de présence s’étalent sur plusieurs semaines, donc que le pic de Z-calls n’est probablement pas le fait d’un seul individu vocalement actif et restant plusieurs heures dans la zone de détection. En revanche, le faible nombre de détections observé au printemps laisse supposer que ces sites ne sont pas sur la route de migration vers les zones d’alimentation. Comme suggéré pour les patrons observés au site WKER du réseau OHASISBIO, il est possible que les routes de migration de l’Antarctique vers les aires d’hivernage (*i.e.* trajet Sud - Nord) diffèrent des routes de migration des aires de d’hivernage vers les aires d’alimentation (*i.e.* trajet Nord - Sud). Une surveillance acoustique à ces sites sur plusieurs années serait nécessaire pour vérifier la stabilité des observations, et voir quelle distribution saisonnière prévaut à ces latitudes, la variabilité observée entre 2014 et 2015 à SKER rendant toute conclusion difficile.

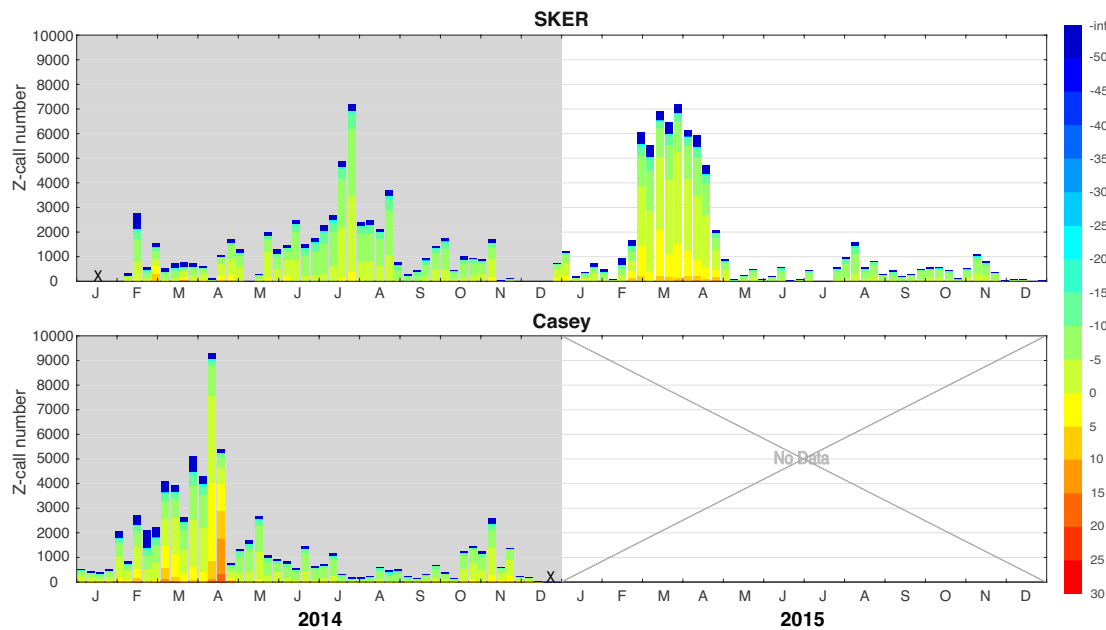


FIGURE 3.3 – Nombre de Z-calls par semaine détectés aux sites SKER et Casey en 2014 et 2015. L'échelle de couleur indique le RSB des signaux détectés (en dB).

3.3 Conclusion de l'étude, limites et perspectives

Cette étude sur la distribution géographique et saisonnière confirme l'importance des eaux subantarctiques et subtropicales de l'océan Indien occidental pour les baleines bleues Antarctique, avec une présence accrue de l'automne au printemps. Elle fournit une image générale de la fréquentation de l'aire d'étude et de sa saisonnalité aux différents sites d'enregistrement. Ces patrons saisonniers sont les indices de possibles routes de migration et zones d'hivernage, voire de reproduction. La stabilité d'une année sur l'autre de ces patrons a permis de définir une saisonnalité moyenne, une tendance qui semble régir la distribution spatio-temporelle de l'espèce dans notre zone. Cependant cette étude a également soulevé le fait que s'il est possible de définir ces tendances de distribution saisonnière, conclure sur des tendances d'évolution de la taille de la population en se basant sur le nombre de détections reste difficile et délicat. En effet, l'évolution du nombre de cris détectés chaque année (ramené à une estimation du nombre de cris divisé par le nombre de jours d'enregistrement dans l'année ; voir la Figure 5 de l'article ci-dessus) n'est pas homogène entre sites. Il serait donc hasardeux d'en déduire une quelconque tendance quant à l'évolution de la taille de la population (ou tout au moins de sa partie vocalement active). Cette remarque est encore plus vraie si l'on s'appuie sur des observations d'un nombre de sites plus limité (1 ou 2 sites). Comme exposé dans l'article, selon le site de référence choisi, on pourrait déduire des tendances

opposées en termes d’évolution de la taille de la population. La prudence s’impose donc malgré l’enjeu de conservation de l’espèce et l’intérêt de cette information. Il est en effet possible que l’évolution inter-annuelle du nombre de vocalisations détectées à un site d’écoute donné reflète plus l’attractivité du site d’une année à l’autre que la taille de la population. Pour le vérifier, les facteurs environnementaux qui influenceraient cette distribution géographique doivent donc également être compris et pris en compte.

En outre, bien que les deux sites instrumentés par l’AAD et situés à des hautes latitudes agrandissent notre fenêtre d’observation, le nombre limité d’années d’enregistrement ne permet pas de déduire un patron saisonnier d’occurrence de Z-calls représentatif de ces sites. La très forte variabilité observée au site SKER entre 2014 et 2015 illustre bien la difficulté de tirer des conclusions générales à partir d’une courte durée d’observation (*e.g.* un ou deux ans) ou d’observations sur un seul site. Enfin, si le site SKER se situe à peu près au sud du réseau OHASISBIO, le site Casey est bien plus à l’est. Même si rien n’indique que les baleines effectuent leur migration en ligne droite nord-sud, il serait intéressant d’avoir plus de sites instrumentés directement au sud de notre réseau. Dans cette optique, un nouveau site, nommé ELAN, a été déployé en janvier 2017 à l’est du banc de l’Elan (56° S 61° E). Il complètera l’aire d’écoute vers les latitudes plus hautes et le scénario esquissé par notre réseau subantarctique.

De plus, la méconnaissance du rayon de détection limite encore la comparaison du nombre de vocalisations détectées entre sites. Ce rayon de détection varie très probablement en fonction des sites et de différents facteurs, dont certains sont encore peu ou pas maîtrisés. Citons notamment les conditions de propagation, tributaires de facteurs environnementaux et du bruit ambiant, eux-mêmes variables selon le site et la saison (Miksis-Olds et al., 2015). Enfin, une autre inconnue est la puissance de la vocalisation à l’émission. Son estimation dépend aussi des propriétés de propagation et de la profondeur de la source qui conditionnent la perte en transmission. Actuellement, les seules estimations publiées de puissance à la source sont de 189 ± 3 dB re :1 μ Pa à 1 m entre 17 et 30 Hz (Širović et al., 2007) et 179 ± 5 dB re :1 μ Pa à 1 m entre 25 et 29 Hz (Samaran et al., 2010c). Elles se fondent sur l’hypothèse d’un niveau source constant. Une nouvelle estimation vient d’être réalisée à partir d’une série de 43 Z-calls émis par un même individu, extraits des données OHASISBIO (Meillour, 2016). La méthode utilisée se base cette fois sur une profondeur constante de l’individu émetteur, pour en revanche ne plus faire d’*a priori* sur le niveau source. La puissance d’émission à la source est estimée à

183 dB re :1 μPa à 1 m entre 25 et 29 Hz, avec une incertitude de ± 1 ou 2 dB selon l'hydrophone considéré, pour une profondeur de source à 35 m (Oleson et al., 2007b). Pour une profondeur de source à 20 m, la puissance d'émission devient 187 dB re :1 μPa à 1 m, avec un écart-type de 1 à 2 dB selon le récepteur. Afin d'affiner ces estimations et de mieux cerner une variabilité inter-individuelle, il conviendrait de localiser un plus grand nombre de séries de Z-calls. L'évaluation du rayon de détection des Z-calls autour d'un instrument reste donc une question largement ouverte et entachée d'incertitudes. Il serait ainsi prématuré de normaliser le nombre de détections par site par son rayon de détection pour en déduire une densité de cris.

Enfin, on ajoutera que pour comparer des études différentes basées sur des méthodes de détection différentes, et estimer pour cela la densité de cris (*call density*), il est nécessaire de prendre aussi en compte les performances de la méthode de détection utilisée (Marques et al., 2013; Stevenson et al., 2015). La densité de cris \hat{D}_{call} se calcule selon l'équation suivante :

$$\hat{D}_{call} = \frac{n(1 - \hat{c})}{\pi r^2 T K \hat{P}}$$

où n représente le nombre de détections, \hat{c} et \hat{P} les performances du détecteur automatique, avec respectivement la proportion de fausses alarmes et la probabilité de détection, r le rayon de détection, T la durée d'observation et K le nombre de capteurs. Comme le souligne le chapitre précédent, les performances d'un détecteur automatique sont sujettes à de nombreuses incertitudes et à une forte subjectivité. Comparer des densités de cris entre sites d'enregistrements ou entre différentes études demandera encore de nombreux efforts et n'est pour l'heure pas réalisable compte tenu de toutes les incertitudes de calcul.

Il est malgré tout possible d'avoir une idée générale de la qualité des Z-calls détectés et/ou de la proximité de leur source à partir des RSB des détections, comme exposé plus haut. La méthode de tri des détections en fonction de leur RSB a donc également été appliquée aux Z-calls détectés dans les données OHASISBIO (Figures 3.4 et 3.5). Même si l'interprétation de ces figures n'est pas simple, on remarque que les patrons saisonniers des détections à relativement fort RSB (> -5 dB par exemple) ressemblent aux patrons saisonniers obtenus pour l'ensemble des détections, tous RSB confondus. Cela conforte la fiabilité des résultats et conclusions développés dans l'article, qui supposent que les détections sont représentatives (*i.e.* proches) des sites. L'analyse des données année par année n'a ici pas d'intérêt pour répondre à la problématique de la fréquentation globale de la zone d'écoute. En revanche, il serait intéressant de les mettre en relation avec des variables

environnementales (*e.g.* concentration en chlorophylle A, température de surface, fronts océaniques, etc), afin d'identifier les facteurs qui influencent la répartition de l'espèce dans la zone et les variations de fréquentation des sites d'une année à l'autre. Pour ce type d'analyse, affiner l'échelle d'observation à l'échelle de la semaine serait plus pertinente ; en effet, à cette échelle on n'observe plus de stabilité inter-annuelle de la distribution temporelle du nombre de vocalisations (Figures 3.6 et 3.7). Ces variations dans les patrons d'occurrences de Z-calls, et l'arrivée plus précoce ou plus tardive des pics de détections pourraient être liées à des variations des conditions environnementales. L'étude du lien entre occurrence des Z-calls et facteurs environnementaux représente une perspective intéressante, et permettrait de comprendre pourquoi le secteur occidental de l'océan Indien austral est une zone importante pour les baleines bleues Antarctique, et pourquoi l'attractivité et la fréquentation des sites semblent varier d'une année à l'autre.

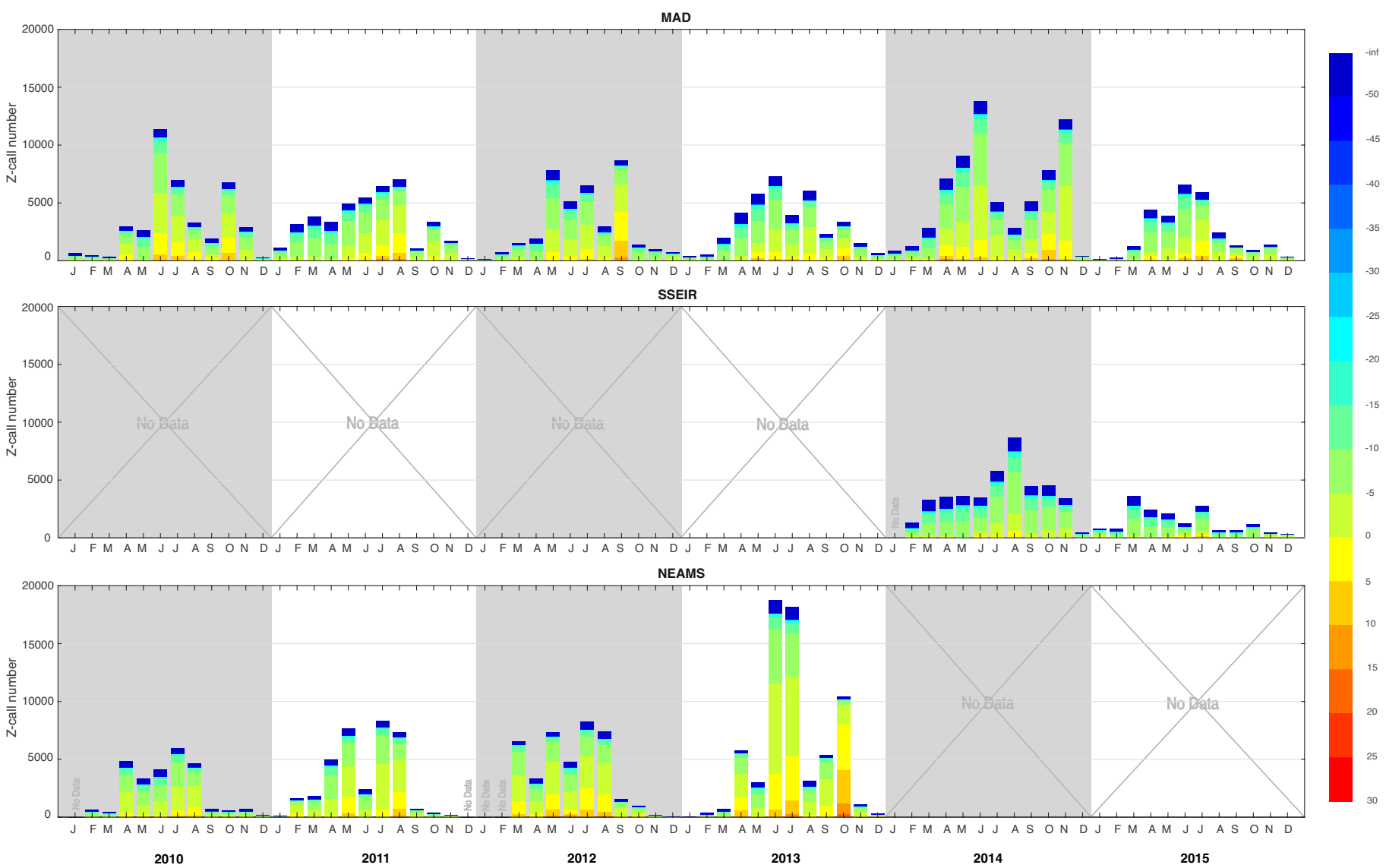


FIGURE 3.4 – Nombre de Z-calls détectés par mois aux sites MAD, SSEIR et NEAMS de 2010 à 2015. L'échelle de couleur indique le RSB des signaux détectés (en dB).

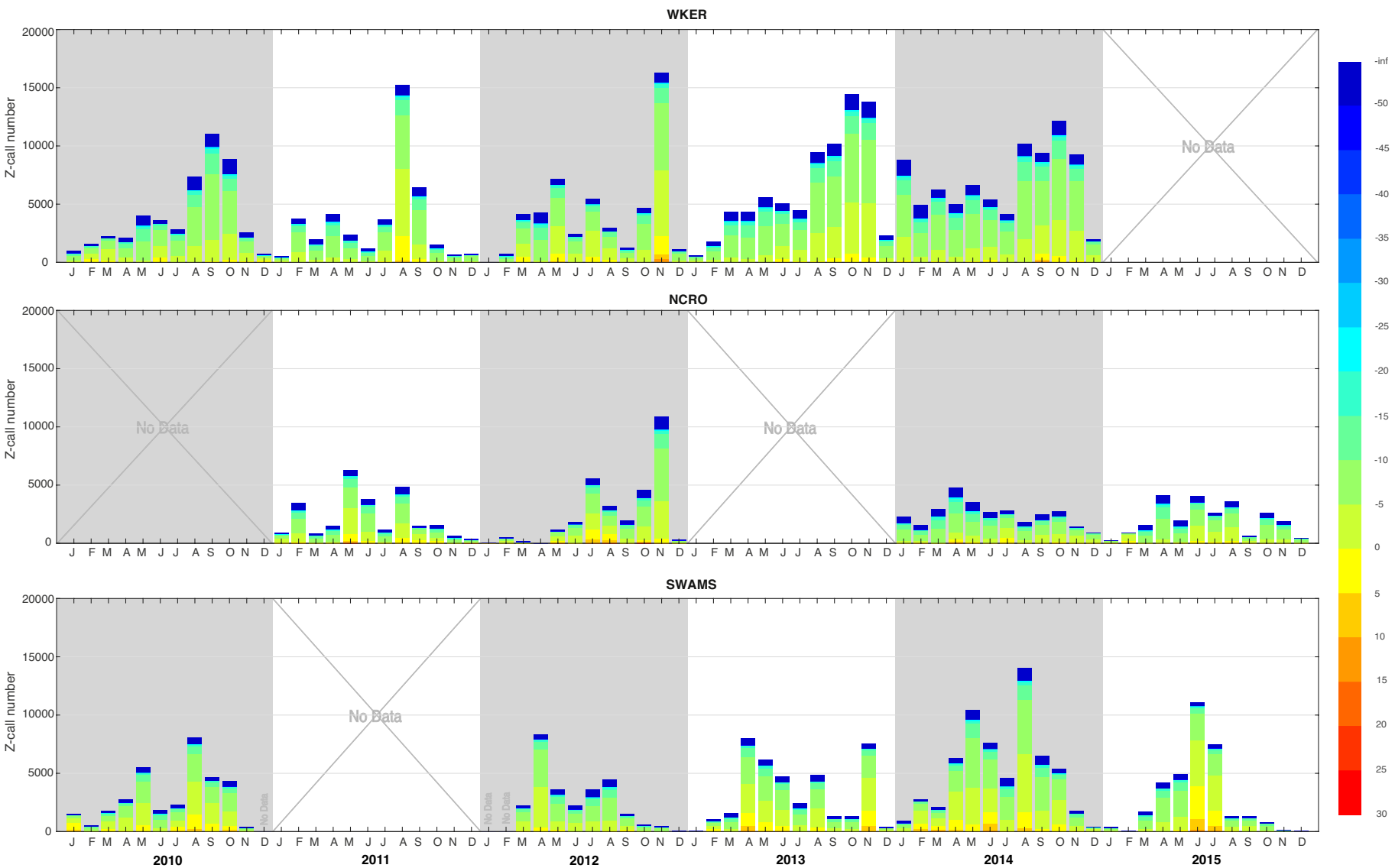


FIGURE 3.5 – Nombre de Z-calls détectés par mois aux sites NCRO, WKER et SWAMS de 2010 à 2015. L'échelle de couleur indique le RSB des signaux détectés (en dB).

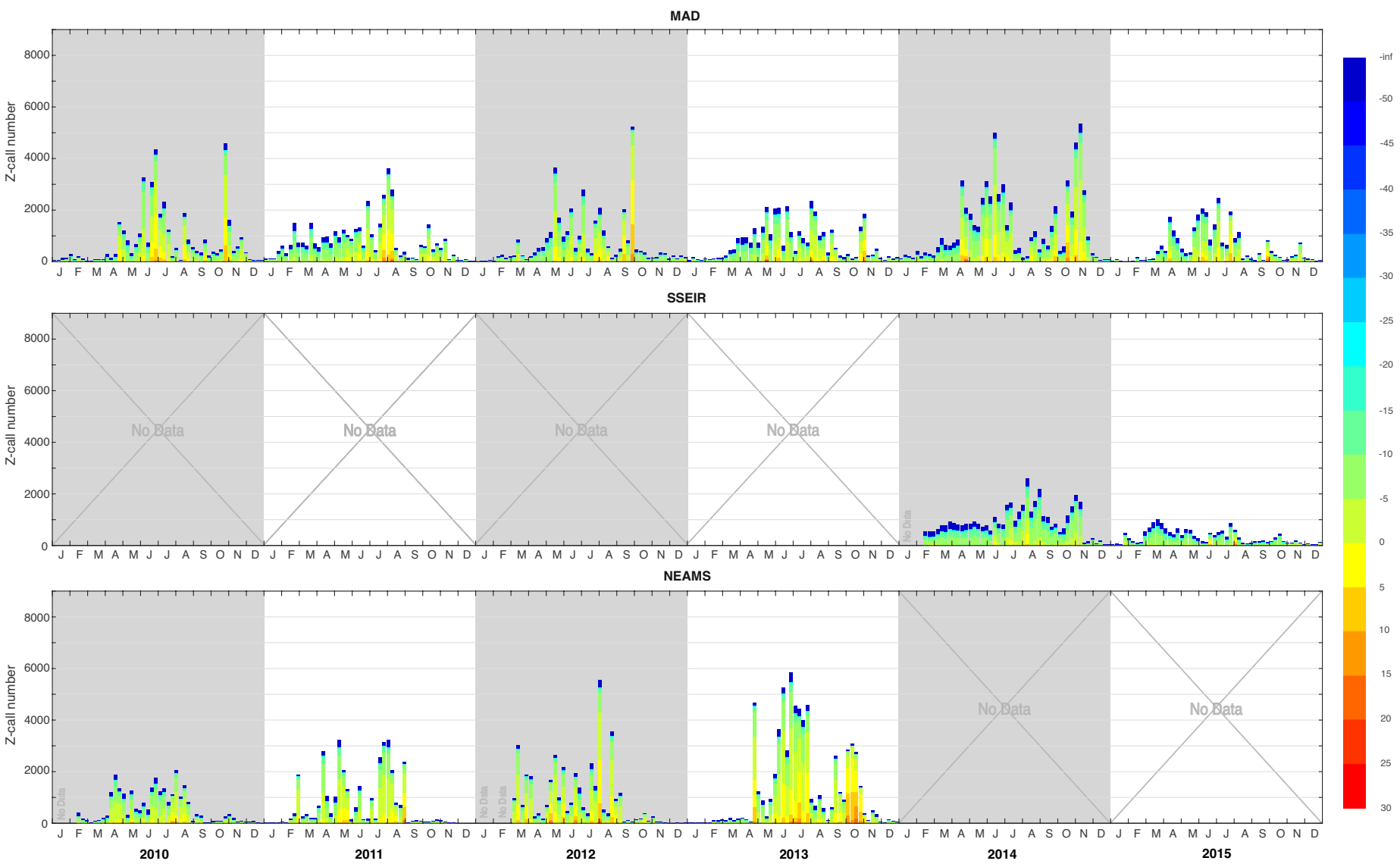


FIGURE 3.6 – Nombre de Z-calls détectés par semaine aux sites MAD, SSEIR et NEAMS de 2010 à 2015. L'échelle de couleur indique le RSB des signaux détectés (en dB).

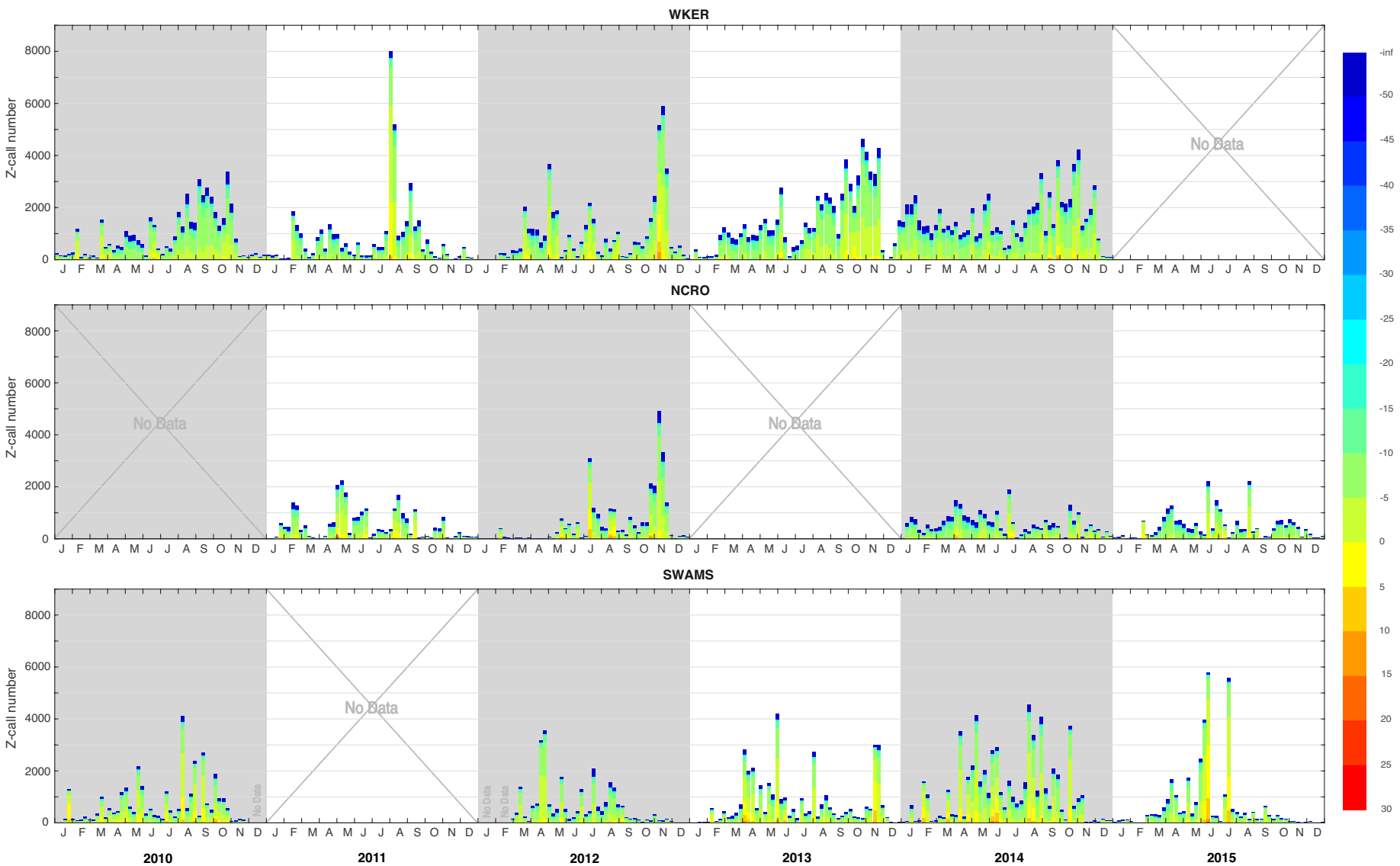


FIGURE 3.7 – Nombre de Z-calls détectés par semaine aux sites NCRO, WKER et SWAMS de 2010 à 2015. L'échelle de couleur indique le RSB des signaux détectés (en dB).

Chapitre 4

Variations fréquentielles des vocalisations de grandes baleines

Introduction

L'analyse détaillée des caractéristiques des Z-calls présents dans les enregistrements du réseau OHASISBIO a confirmé une observation particulièrement remarquable sur cette série de données pluri-annuelle : la diminution fréquentielle de l'unité A du Z-call. Ce phénomène de diminution de fréquence a été observé sur la plupart des signatures vocales de baleines bleues du monde entier (McDonald et al., 2009), et plus particulièrement dans l'océan Indien sur les vocalisations des baleines bleues pygmées de la population d'Australie (Gavrilov et al., 2011), ainsi que sur celles des baleines bleues Antarctique (Gavrilov et al., 2012; Miller et al., 2014). Ces deux dernières études montrent qu'en plus d'une diminution inter-annuelle, la fréquence de l'unité A du Z-call varie également intra-annuellement. Ces deux études se fondent cependant sur des mesures de fréquences correspondant au pic de densité spectrale de puissance (DSP) dans la bande de fréquence de l'unité A. Cette méthode est tributaire des périodes de forte abondance de vocalisations ou de fort chorus, et se base sur des DSP moyennes hebdomadaires. Différentes hypothèses tentent d'expliquer ces diminutions long-terme de fréquence, telles que des changements physiologiques répondant à la sélection sexuelle ou à l'augmentation de la taille des individus depuis l'arrêt de la chasse, une réponse au bruit généré par l'activité humaine, un changement des propriétés de la colonne d'eau, ou encore une augmentation de la densité de population (McDonald et al., 2009; Gavrilov et al., 2011, 2012). Pour expliquer les variations intra-annuelles de fréquences, des hypothèses de changement de la profondeur d'émission des cris (Gavrilov et al., 2012), d'effet Doppler ou de variation de l'épaisseur de la couche de graisse (Miller

et al., 2014) ont été explorées, mais écartées. Ainsi, ces variations de fréquence n'ont à ce jour pas trouvé d'explication robuste.

La mesure systématique de la fréquence de l'unité A des Z-calls détectés dans la base de données OHASISBIO permet d'observer de façon plus fine leur évolution saisonnière et inter-annuelle, car cette fréquence est mesurée directement sur des cris, et non sur des DSP, cris par ailleurs détectés toute l'année. Chaque année, la fréquence diminue de février à fin octobre, puis augmente à nouveau jusqu'en février de l'année suivante. Cette modulation saisonnière varie de ± 0.1 Hz autour de la fréquence moyenne pour l'année. La diminution inter-annuelle de la fréquence de l'unité A des Z-calls est linéaire de 2007 à 2015 avec une pente de ~ 0.13 Hz/an, égale aux estimations antérieures, par exemple de 2002 à 2010 (Gavrilov et al., 2012; Miller et al., 2014). Pour vérifier si ces phénomènes affectent aussi les autres (sous-)espèces, nous avons mesuré les fréquences des autres signatures vocales présentes dans nos données : baleines bleues pygmées des trois populations (Australie, Madagascar, Sri Lanka) et rorquals communs (Figure 4.1). Pour chaque espèce, la fréquence mesurée correspond à celle des pics de puissance (DSP) dans la bande de fréquences encadrant une des fréquences caractéristiques des différentes vocalisations : 35 Hz (baleine bleue pygmée de Madagascar), 70 Hz (baleine bleue pygmée d'Australie), 101 Hz (baleine bleue pygmée du Sri Lanka) et 99 Hz (rorqual commun) (unités encadrées sur la figure 4.1). Toutes ces fréquences décroissent linéairement au fil des ans, certaines montrent même des variations intra-annuelles semblables à celles de baleines bleues Antarctique. Ce phénomène mondial (*e.g.* McDonald et al., 2009) est ici documenté pour la première fois pour les baleines bleues pygmées de Madagascar et les rorquals communs.

L'amplitude des variations de fréquence inter- ou intra-annuelle est du même ordre de grandeur : ~ 0.1 Hz. L'explication proposée à cette modulation de fréquence serait une variation de la puissance d'émission, qui selon son intensité modulerait la fréquence d'émission du cri (McDonald et al., 2009; Gavrilov et al., 2011). La diminution inter-annuelle de fréquence correspondrait donc à une diminution long-terme de l'intensité des vocalisations. Parmi toutes les hypothèses explorées, l'explication la plus plausible serait l'augmentation de la densité de population depuis l'arrêt de la chasse baleinière, qui réduirait la nécessité de vocaliser fort pour communiquer avec des congénères (McDonald et al., 2009). Le même raisonnement nous conduit à penser que les variations intra-annuelles de fréquence ou de puissance d'émission serait liées à une source saisonnière de bruit à laquelle les baleines s'adaptent en "haussant ou baissant le ton". Cette adaptation pour maintenir le rapport signal-à-bruit des vocalisations est connu comme *l'effet Lombard* (Lombard, 1911; Hotchkin & Parks, 2013) et a été observé chez les oiseaux (Brumm, 2004;

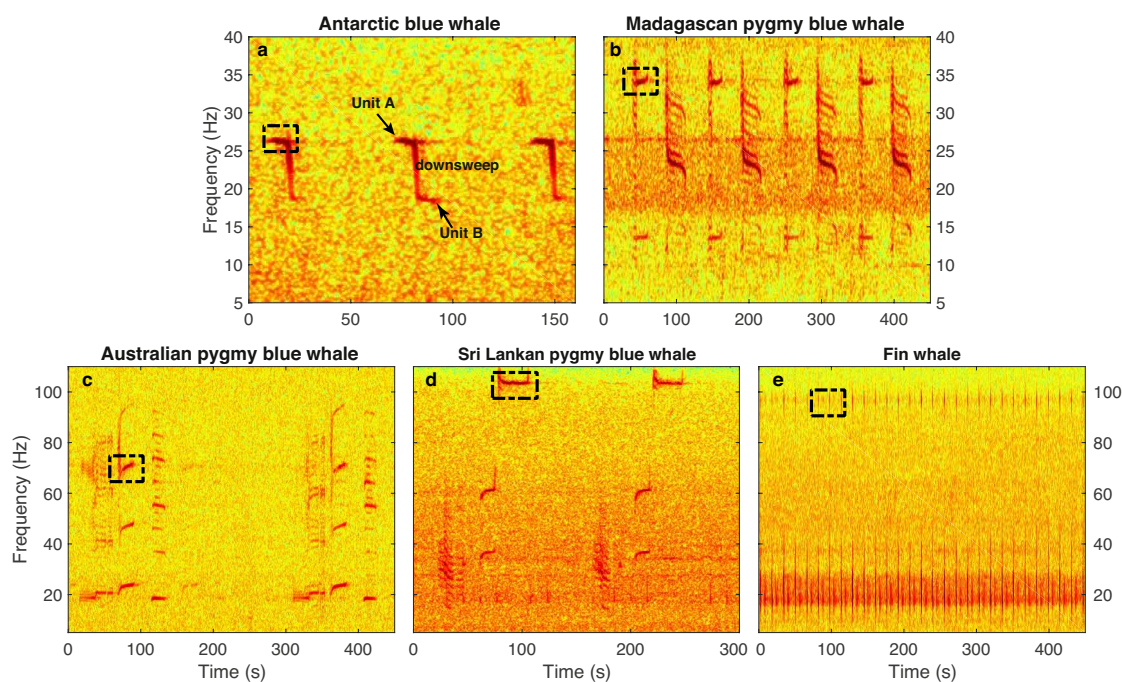


FIGURE 4.1 – Signatures vocales des baleines bleues Antarctique (a) et pygmées des trois populations (Madagascar (b), Australie (c) et Sri Lanka (d)), et des rorquals communs (e). L’unité encadrée représente l’unité ciblée dans cette étude de diminution de fréquence.

Brumm & Slabbekoorn, 2005), les grenouilles (Halfwerk et al., 2015), les primates (Brumm et al., 2004), mais aussi chez les baleines franches (*Eubalena glacialis*) (Parks et al., 2011), les baleines à bosse (*Megaptera novaengliae*) (Dunlop et al., 2014), et possiblement chez les baleines bleues en baie de Californie (Melcon et al., 2012).

Pour tester cette idée sur les modulations de fréquence intra-annuelles des Z-calls, série la plus complète et la plus précise, le bruit ambiant a été mesuré dans deux bandes de fréquence qui encadrent le Z-call, entre 10-13 Hz et 30-33 Hz, autant que possible exemptes d’autres vocalisations. Aux deux bandes de fréquences, ce bruit ambiant décroît globalement entre 2010 et 2015, mais pas de façon homogène à tous les sites, et présente de surcroît des variations intra-annuelles, que l’on observe sur l’ensemble du réseau. On observe aussi généralement que le niveau de bruit augmente avec la latitude.

Déarrassés de leur tendance inter-annuelle, les fréquences des Z-calls et le bruit ambiant montrent une corrélation remarquable, avec notamment une augmentation synchrone des fréquences et du bruit ambiant entre octobre et février, suivie d’une décroissance de février à octobre suivant. Il reste à trouver la cause des variations saisonnières de bruit. La meilleure candidate semble être la présence de glace libre

dans l'océan austral. Les bruits cryogéniques constituent en effet une des sources majeures du bruit ambiant basse-fréquence (<100 Hz) dans tout l'océan austral (Matsumoto et al., 2014; Tsang-Hin-Sun et al., 2015); ce bruit intervient à toutes les fréquences entre quelques Hertz et la centaine de Hertz (*e.g.* Chapp et al., 2005; Royer et al., 2015). Comme le bruit ambiant, le nombre d'icebergs, de taille inférieure à 8 km^2 , déduit des observations altimétriques satellitales (Tournadre et al., 2016), augmente rapidement au printemps austral, à partir d'octobre, jusqu'au milieu de l'été austral, en février. Il décroît ensuite jusqu'à l'automne austral, en mars-avril. Les fréquences des Z-calls et le bruit ne décroissent cependant pas aussi vite; cela indique que d'autres sources de bruit perdurent, qui pourraient être des mouvements d'icebergs le long de la marge antarctique, trop proches de la côte pour en être distingués par l'altimétrie (les radars altimétriques décrochent à l'approche des côtes).

Ces différentes analyses et les hypothèses avancées pour expliquer le lien entre les variations intra-annuelles de la fréquence et du bruit ambiant font l'objet de l'article en préparation, reproduit ci-après.

Article soumis au journal Science



Submitted Manuscript: Confidential

Long-range impact of iceberg generated sounds on large-whale call-frequency

Emmanuelle C. Leroy,¹ Jean-Yves Royer,^{1*} Julien Bonnel,² Flore Samaran²¹ University of Brest and CNRS Lab. Géosciences Océan, IUEM, 29280 Plouzané, France² ENSTA Bretagne, UMR CNRS 6285 Lab-STICC, 29806 Brest, France

*Correspondence to: jean-yves.royer@univ-brest.fr

Summary sentence

Occurrences of icebergs in the southern Indian Ocean lead to seasonal shifts in the Antarctic blue whale call-frequency but have no effect on their long-term frequency decline.

Abstract

In the past decades, a progressive decrease in the frequencies of blue whale vocalizations is observed worldwide. Its causes, of natural or anthropogenic nature, are unclear. Based on 7 years of widespread acoustic records in the southern Indian Ocean, we show that the call-frequency of five populations of large whales decreases at a constant rate of tenths of Hertz per year. We also found that seasonal shifts in the Antarctic blue whale call-frequency follow seasonal changes in the ambient noise in their low-frequency range, generated by the seasonal presence of icebergs in the Southern Ocean. Wide-range changes in the natural acoustic environment have thus a strong impact on the vocal behavior of large whales in the short-term, but, paradoxically, not in the long-term.

Main text

With the advent of passive acoustic monitoring of the ocean in the last decades, it has been observed that the frequency (*i.e.* pitch) of blue whale calls is decreasing worldwide (1-4). The reasons for this long-term decline are unclear. Hypotheses range from physiological causes, such as genetic selection or post-whaling increase in the whale body size, to behavioral causes, such as interferences between whale species or post-whaling increase in whale abundance, to environmental causes, such as increasing oceanic noise-levels due to anthropogenic activities or changes in the water sound velocity due to climate change and ocean acidification (1). In addition to this long-term frequency decrease, variations are observed on a seasonal scale (2, 4). Among potential explanations, changes in dive behavior with the season (3), Doppler effects as whales pass by recording hydrophones (4) or changes in body conditions after feeding periods (4) have been explored but ruled out. To broaden the observation to the southern Indian Ocean and to further investigate these open questions of the inter- and intra-annual frequency variations of blue whale calls, we analyzed 7 years of passive acoustic data collected at up to 6 widespread sites in this region (Fig. 1).

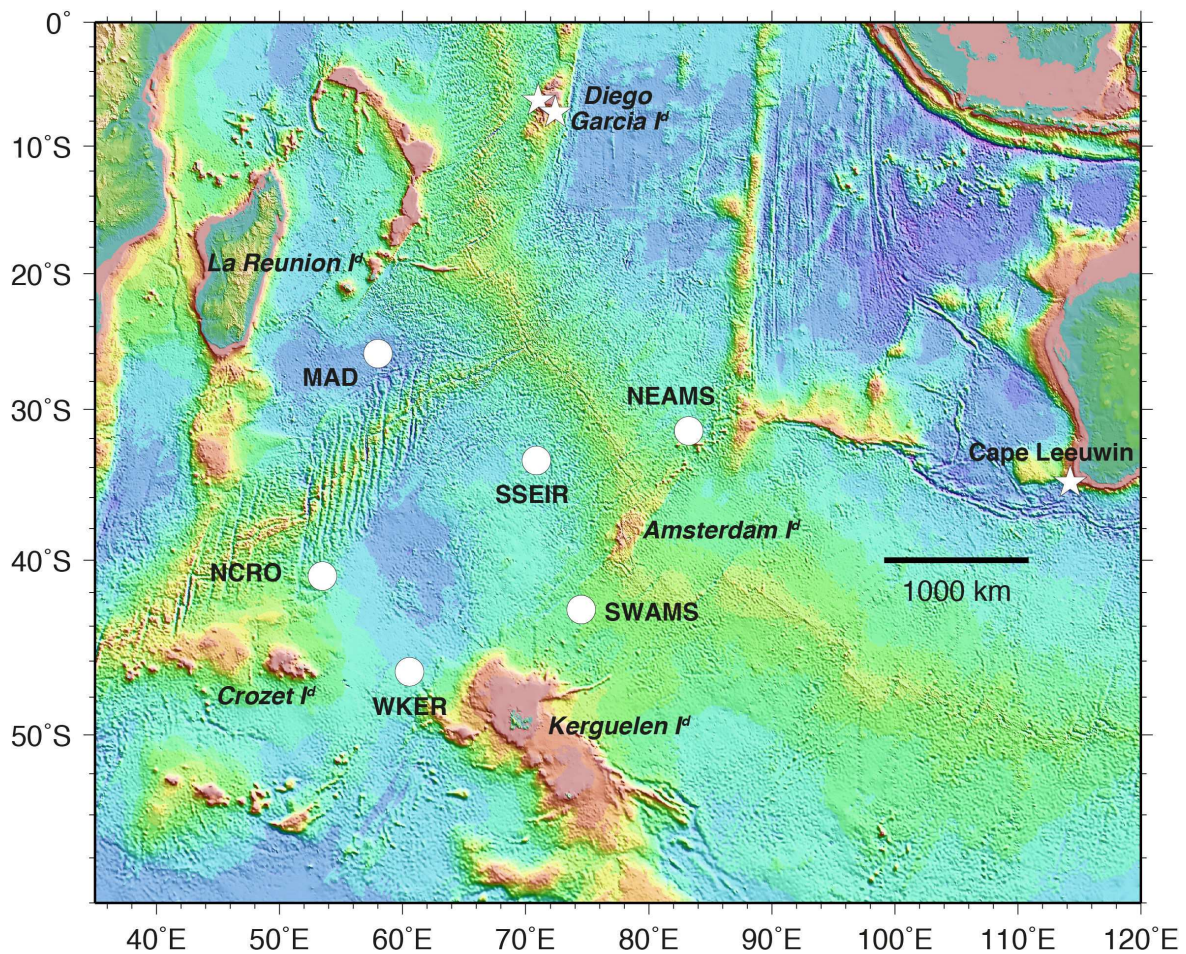


Fig. 1: Hydroacoustic observatory in the southern Indian Ocean. Circles show the location of autonomous hydrophones analyzed in this paper; stars outline the permanent stations of the Comprehensive Test-Ban Treaty Organization, investigated by other authors (2, 3).

Blue whales emit stereotyped calls, regularly repeated over time, with one or several units and overtones at specific frequencies (Fig. 2-right). With a sampling rate of 240 Hz, our records captured calls from three (sub-)species of large whales: fin whales (*Balaenoptera physalus*), Antarctic blue whales (*B. musculus intermedia*), and pygmy blue whales (*B. m. brevicauda*) of three acoustically distinct populations: Madagascar, Australia and Sri Lanka. In each vocal signature, we selected one tonal unit: near 26 Hz (unit A) for the Antarctic blue whale, near 35 Hz, 70 Hz and 108 Hz for the Madagascar, Australia, and Sri Lanka pygmy blue whales (resp.), and the 100 Hz-pulse for the fin whale (Fig. 2-right). For the Antarctic blue whale, we measured the peak (*i.e.* at maximum power) frequency on more than 1,000,000 automatically detected calls (5, 6), whereas for the other whale calls, we extracted the frequency associated to the peak level of the Power Spectral Density (PSD) in selected frequency bands (Table S1). We then averaged the frequencies per week over the sites where calls were recorded and complemented them with earlier measurements from the Indian Ocean (2, 3). All selected units clearly show a constant long-term decrease in frequency over the years, here documented for the first time for fin and Madagascar pygmy blue whales (Fig. 2).

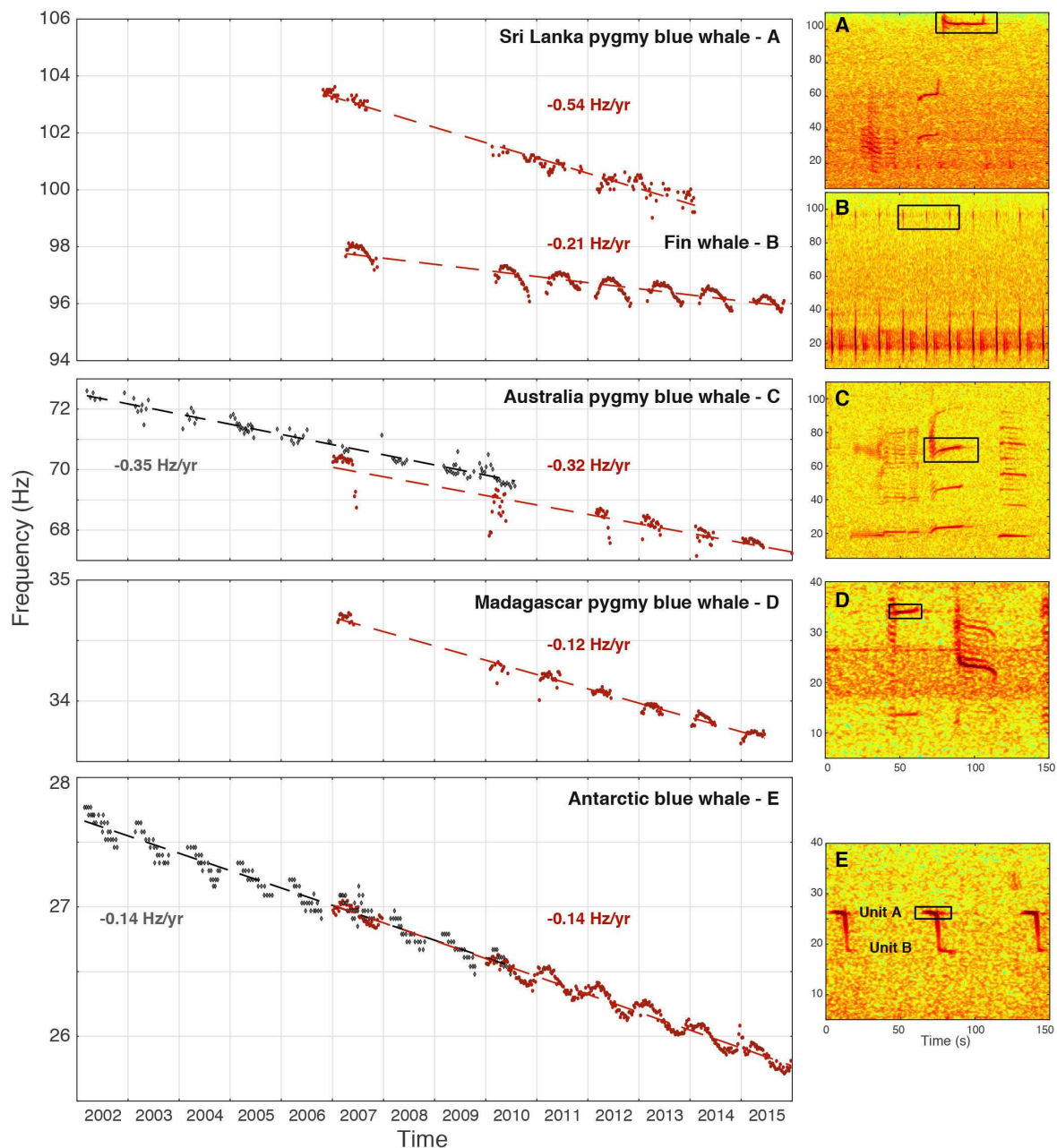


Fig. 2: Fin and blue whale call-frequency decline over the years in the southern Indian Ocean. Symbols (red dots - this study, grey diamonds (2, 3)) are weekly averaged peak frequencies measured for selected units in the calls (black rectangles in the time-frequency diagrams). Slopes of the fitted dashed lines are given in Hz/yr.

From 2007 to 2016, the frequency of the Antarctic blue whale call decreases by -0.14 Hz/yr ($R^2 = 0.98$), consistent with a 2002-2010 estimate (3). The two datasets overlap between 2007 and 2010, showing that different approaches (power spectra (3) vs individual call measurements) agree for single-tonal units (Fig. 2E). For the pygmy blue whales, the frequency decreases by -0.12 Hz/yr ($R^2 = 0.98$) for the Madagascar type, -0.54 Hz/yr ($R^2 = 0.96$) for the Sri Lanka type, and -0.32 Hz/yr ($R^2 = 0.72$) for the Australia type, similar to -0.35 Hz/yr measured from

individual calls (2). The shift between the two datasets is due to the non-monotonal nature of the unit whose frequency can be measured on different parts (Fig. 2C). The frequency decreases by -0.21 Hz/yr ($R^2 = 0.82$) for the fin whale 100 Hz-pulse.

Intra-annual shifts in call-frequency with regular and yearly patterns are also observed, for instance for fin or Antarctic blue whales (Fig. 2). They are best documented for the Antarctic blue whale, from individual calls detected year-round over the network (6). When detrended from its long-term decline, the frequency of Z-call units A shows cyclical variations of $\pm 0.1 \text{ Hz}$, with a decrease from February to October and an increase from October to February (Fig. 3C).

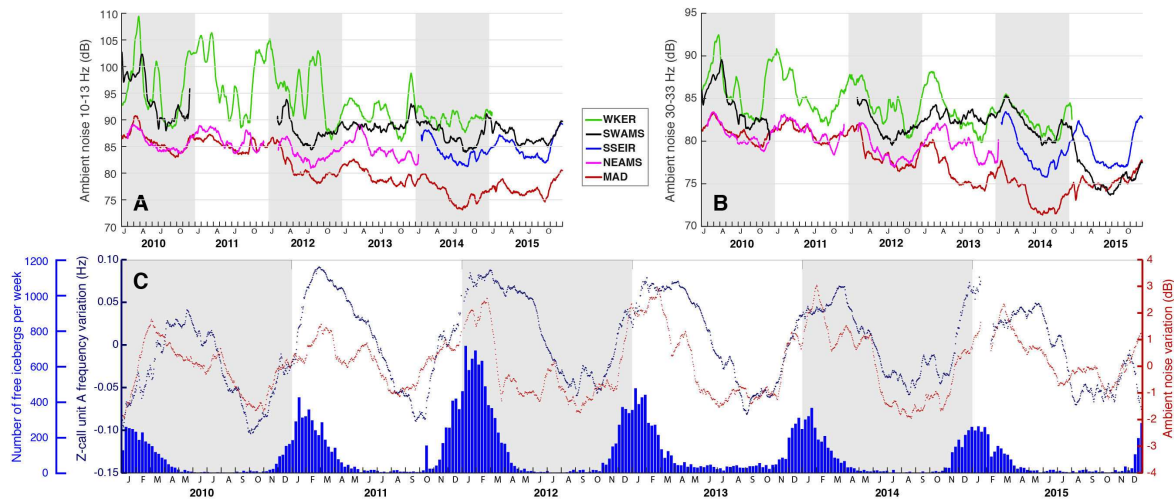


Fig. 3: Seasonal correlation between the occurrence of icebergs, changes in the noise level and shifts in the Antarctic blue whale call-frequency. (A) Long-term decrease of the ambient noise-level in the 10-13 Hz and (B) 30-33 Hz frequency bands at all sites but NCRO. (C) Detrended evolution of Z-call unit A frequency (blue dots) and of the ambient noise-level in the 30-33 Hz frequency band (red dots) at MAD site. Each dot represents the averaged frequency or noise-level in a moving window of one month, based on weekly averaged samples. Histograms show the number per week of free icebergs (7), smaller than 8 km^2 .

Such small frequency variation is unlikely due to an intentional behavioral change from all vocalizing whales (4). For some cetaceans, shifting frequency is a strategy to stand out from an increasing noise-level in their frequency bandwidth, but these changes generally reach several or tens of Hertz (8-10). Small intra-annual frequency shifts may also result from changes in the call source-levels, where low-level calls have lower peak-frequencies than high-level calls (1, 2). Frequency changes over the years ($\sim 0.1 \text{ Hz/yr}$) and within a year ($\pm 0.1 \text{ Hz}$) would both reflect similar changes in call intensity. However, if the inter-annual frequency or call intensity decline is a response to an increasing population density (1, 2), unlikely to vary in yearly cycles, we hypothesize that short-term changes in the call power-levels are linked to the low-frequency ambient noise-level. Within a year, whales would adapt their level of emission to the ambient noise-level, which would in turn modify their call frequency. This adaptation to maintain the signal-to-noise ratio of vocalizations is known as the *Lombard effect* (11, 12) and has been demonstrated for birds (13), frogs (14), primates (15), but also for right whales (*Eubalena glacialis*) (16), humpback whales (*Megaptera novaengliae*) (17), and possibly blue whales (18).

To test the potential impact of the ambient noise-level on the Z-call frequency, we measured the noise power in two bandwidths bracketing the Z-call frequency range, 10-13 Hz and 30-33

Hz. Unlike in other parts of the world ocean (19-22), the low-frequency ambient noise in the southern Indian Ocean tends to slightly decrease over the years in both frequency bands (Figs. 3A,B). The overall noise-level increases, though, with the latitude, from MAD (26°S) to WKER (46°S) and is higher in the 10-13 Hz than in the 30-33 Hz band, less prone to the low-frequency geological noise (earthquakes, volcanic tremors). Both noise levels display intra-annual variations within an amplitude of 4 to 10 dB. After removing the long-term trend, the intra-annual variation of the noise-level and frequency shift in Z-call units A display a clear seasonal correlation (Fig. 3C).

In the southern Hemisphere, cryogenic sounds from the Antarctic ice shelf or drifting icebergs are the main source of low-frequency noise (up to 60 Hz) and ensonify the whole Southern Ocean up to tropical latitudes (22-24). This source is highly seasonal and the induced noise-level reaches its peak in the austral summer. This is when most iceberg cracking noises are spotted in the subantarctic latitudes (23, 25-27). As a proxy for the ice-related noise, Fig. 3C displays the number per week of free icebergs, smaller than 8 km², detected from satellite altimetry (7) in the Indian sector of the Southern Ocean (30°E-110°E, up to 40°S). Even though the MAD site is located at a tropical latitude (Fig. 1), its 30-33 Hz noise-level immediately rises as the free icebergs appear in the austral spring (October-November), increases up to 5 dB when the icebergs number peaks in the austral summer (January-February; up to 800/week), and decreases as the icebergs vanish in the fall (April-May; Fig. 3C). Smaller peaks of noise, the rest of the year, are likely due to other sources, including cryogenic noise from the ice shelf itself (*e.g.* ice-shelf cracking, iceberg calving). Many ice tremors have been detected and located along the Antarctic shelf in the fall and winter season (23, 25, 27).

As another potential source of noise, the ship traffic has a very little effect (24), since it is very limited in the southern Indian Ocean, except at the MAD site, located in the traffic corridor between the Cape of Good Hope and the Malacca strait. This year-round traffic may participate to the overall noise-level, but not to its seasonality. Furthermore, on the long-term, the 10-13 and 30-33 Hz noise-levels tend to decrease at MAD, which may be partly due, after 2012, to the rerouting of vessels on their way to or from the northwestern Indian Ocean, following the decline of piracy attacks off East Africa (28). Although airgun shots from distant seismic surveys can ensonify very large areas of the ocean (as far as 6000 km away), they are not seasonal. Finally, there is no apparent effect from the powerful low-frequency background noise generated by subsea earthquakes and volcanic activity.

This analysis provides robust evidence for a long-term decline of the call-frequency of five whale populations, superimposed by seasonal variations, particularly for Antarctic blue whales, sensitive to ice-related noise, or fin whales (Fig. S1). The similar magnitude of the intra- and inter-annual frequency variation suggests a common physiological explanation such as the *Lombard effect*. Proving this assertion would require measuring a significant number of call source-levels, to overcome any dependence on the size or physical conditions of individuals, and over a long-term (year-round and every year), a challenging task for whale species dwelling in such remote areas. Now, as to what may cause seasonal changes or the long-term decline in whale-call levels, has most probably different explanations. We show that intra-annual variations mimic that of the noise level in frequency bandwidths near that of the whale calls (Figs. 3C and S1). These seasonal adjustments, however, seem insensitive to the absolute noise-level, varying among sites (Figs. 3A,B and S2), and have the same amplitude (~0.2 Hz) relative to the yearly frequency, which does not vary among sites (Fig. S3). The long-term decline in frequency, *i.e.* call-level, must have a long-term cause, such an increase in density population which would reduce the need for raising the call-level to communicate with conspecifics (1). This decline rate

represents 0.20 to 0.50% of the corresponding frequencies, which may be clues for differentiated population recovery among species. Although noise levels are rising in some parts of the world ocean (19-22), they seem to have no effect on the worldwide frequency decline (1); yet, in places, they may partly counterbalance the effect of a density growth. There is thus a paradox between the effects of the environmental noise on the short-term acoustic behavior of large whales and its apparent lack of effects on the long-term.

References

1. M. A. McDonald, J. A. Hildebrand, S. Mesnick. *Endanger. Species Res.* **9**, 13-21 (2009).
2. A. N. Gavrilov, R. D. McCauley, C. Salgado-Kent, J. Tripovich, C. Burton. *J. Acoust. Soc. Am.* **130**, 3651-3660 (2011).
3. A. N. Gavrilov, R. D. McCauley, J. Gedamke. *J. Acoust. Soc. Am.* **131**, 4476-4480 (2012).
4. B. S. Miller, R. Leaper, S. Calderan, J. Gedamke. *PLoS one* **9**, e107740 (2014).
5. F.-X. Socheleau *et al.* *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, 3105-3117 (2015).
6. E. C. Leroy, F. Samaran, J. Bonnel, J.-Y. Royer. *PLoS one* **11**, e0163587 (2016).
7. J. Tournadre, N. Bouhier, F. Girard-Ardhuin, F. Rémy. *J. Geophys. Res.* **121**, 327-349 (2016).
8. V. Lesage, C. Barrette, M. Kingsley, B. Sjare. *Mar. Mammal Sci.* **15**, 65-84 (1999).
9. S. E. Parks, C. W. Clark, P. L. Tyack. *J. Acoust. Soc. Am.* **122**, 3725-3731 (2007).
10. C. Erbe, C. Reichmuth, K. Cunningham, K. Lucke, R. Dooling. *Mar. Pollut. Bull.* **103**, 15-38 (2016).
11. E. Lombard. *Ann. Maladies Oreille, Larynx, Nez, Pharynx* **37**, 25 (1911).
12. C. Hotchkiss, S. Parks. *Biol. Rev.* **88**, 809-824 (2013).
13. H. Brumm, H. Slabbekoorn. *Adv. Stud. Behav.* **35**, 151-209 (2005).
14. W. Halfwerk, A. M. Lea, M. A. Guerra, R. A. Page, M. J. Ryan. *Behav. Ecol.*, arv204 (2015).
15. H. Brumm, K. Voss, I. Köllmer, D. Todt. *J. Exp. Biol.* **207**, 443-448 (2004).
16. S. E. Parks, M. Johnson, D. Nowacek, P. L. Tyack. *Biol. Lett.* **7**, 33-35 (2011).
17. R. A. Dunlop, D. H. Cato, M. J. Noad. *J. Acoust. Soc. Am.* **136**, 430-437 (2014).
18. M. L. Melcon *et al.* *PLoS One* **7**, e32681 (2012).
19. M. A. McDonald, J. A. Hildebrand, S. M. Wiggins. *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 711-718 (2006).
20. J. A. Hildebrand. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **395**, 5-20 (2009).
21. J. L. Miksis-Olds, D. L. Bradley, X. M. Niu. *J. Acoust. Soc. Am.* **134**, 3464-3475 (2013).
22. H. Matsumoto *et al.* *Geochem. Geophys. Geosy.* **15**, 3448-3458 (2014).
23. E. Chapp, D. R. Bohnenstiehl, M. Tolstoy. *Geochem. Geophys. Geosy.* **6**, Q06003 (2005).
24. E. Tsang-Hin-Sun, J.-Y. Royer, E. C. Leroy. *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, 3439-3446 (2015).
25. J.-Y. Royer, R. Chateau, R. P. Dziak, D. R. Bohnenstiehl. *Geophys. J. Int.* **202**, 748-762 (2015).
26. E. Tsang-Hin-Sun, J.-Y. Royer, J. Perrot. *Geophys. J. Int.* **206**, 1232-1245 (2016).
27. J. A. Hanson, J. R. Bowman. *Geophys. Res. Lett.* **32**, L06391 (2005).
28. M. Vespe, H. Greidanus, M. A. Alvarez. *Mar. Policy* **59**, 9-15 (2015).
29. J.-F. D'Eu, J.-Y. Royer, J. Perrot, in *OCEANS, 2012-Yeosu*. (2012), pp. 1-6.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Captains and crews of RV *Marion Dufresne* for the successful deployments and recoveries of the hydrophones of the OHASISBIO and DEFLOHYDRO experiments. French cruises were funded by the French Polar Institute (IPEV) with additional support from INSU-CNRS. NOAA/PMEL also contributed to the DEFLOHYDRO project. E.C.L. was supported by a Ph.D. fellowship from the University of Brest and from the Regional Council of Brittany (Conseil Régional de Bretagne). The contribution of Mickael Beauverger at LGO to the logistics and deployment of the OHASISBIO cruises is greatly appreciated.

The data underlying this analysis (weekly averaged frequencies of Antarctic blue whales, pygmy blue whales and fin whales, daily averaged noise-levels at each site) are accessible at <http://doi.org/10.17882/46124> [to be updated].

Contributions: J.Y.R. conceived and organized the acoustic experiments; J.Y.R. with partial contribution from the other authors collected the data at sea; E.C.L. analyzed the data with assistance from the other authors; E.C.L. and J.Y.R. wrote the manuscript; all authors reviewed and edited the manuscript.

Supplementary Materials

Materials and Methods

Figs. S1 to S3

Table S1

References (29)

This study is based on two datasets. The first set was acquired in 2007 from a hydroacoustic experiment (DEFLOHYDRO) that deployed three autonomous hydrophones in the southern Indian Ocean from October 2006 to April 2008 (25). The instruments were located south of La Reunion Island (MAD), mid-way between the Kerguelen and Amsterdam islands (SWAMS), and northeast of Amsterdam Island (NEAMS; Fig. 1). Moorings consisted of an anchor, an acoustic release, and a hydrophone moored in the axis of the sound fixing and ranging (SOFAR) channel, at a depth of 1000 to 1300 m below sea-surface. Data were continuously sampled at 250 Hz.

The second set comes from the OHASISBIO hydrophone array, installed in December 2009 in the same area and still operational as of August 2017. The array comprises the three previously instrumented sites (MAD, NEAMS and SWAMS), and additional sites north of Crozet Islands (NCRO) and between Crozet and Kerguelen islands (WKER). In 2014 a new site was established in the center of the network (SSEIR; Fig. 1). Moorings are similar to those of the DEFLOHYDRO array (29). The data are continuously sampled at a rate of 240 Hz and collected every year during the annual voyages of the R/V *Marion Dufresne* to the French Southern and Antarctic Territories. The records are almost continuous for the past 6 years (2010-2015), except for some months or years depending on the site, due to instrument failures or losses (6). The whole 6-year-long dataset is analyzed in this study, except the NCRO site in 2010 and 2013, hindered by high noise-levels likely due to the strumming of the mooring line.

For the frequency measurement of pygmy blue whale and fin whale calls, a Power Spectral Density (PSD) was computed for the entire dataset (2007 and 2010 to 2015), over 300s-windows, 50% overlap at a frequency resolution of 0.01 Hz. For each targeted species, PSD were examined in frequency ranges encompassing the frequency of the selected units (Table S1; see also Figs. 2 A to D). Ambient noise-levels were computed in frequency bands bracketing the selected calls (Table S1), over 300s-windows in 0.0018 Hz-bins, averaged per day, and reported in decibels (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$).

	Call-unit frequency band 2007	Call-unit frequency band 2010-2015	Lower noise window	Upper noise window
Madagascar PBW	[34.0 - 35.0 Hz]	[33.5 - 34.5 Hz]	[30.0 - 32.0 Hz]	[36.0 - 38.0 Hz]
Australia PBW	[69.0 - 71.0 Hz]	[67.1 - 70.0 Hz]	[64.0 - 66.0 Hz]	[71.0 - 73.0 Hz]
Sri Lanka PBW	[102.4 - 105.0 Hz]	[98.9 - 102.1 Hz]	N/A	[104.5 - 108.0 Hz]
Fin whale	[96.0 - 99.0 Hz]	[95.2 - 97.8 Hz]	[91.0 - 93.0 Hz]	[99.0 - 101.0 Hz]

Table S1: Frequency band of the computed PSD for the call units of interest and bracketing noise bands. PBW = pygmy blue whale.

As shown in Fig. 2A, the 100 Hz-pulse of fin whales displays seasonal variations. When zoomed-in and detrended from the long-term decline of frequency (Fig. S1), the main peaks in frequency occur in May-June, thus 3 months later than for the Antarctic blue whale and the 10-

33 Hz noise-levels. However, this seasonal frequency shift follows that of the noise levels in the 91-93 Hz and 99-101 Hz bandwidths. This demonstrates the same *Lombard effect* as for the Antarctic blue whales, but in response to different seasonal noise sources. Seasonal frequency-shifts are also hinted for the Australia and Madagascar pygmy blue whales (Fig. 2C, 2D).

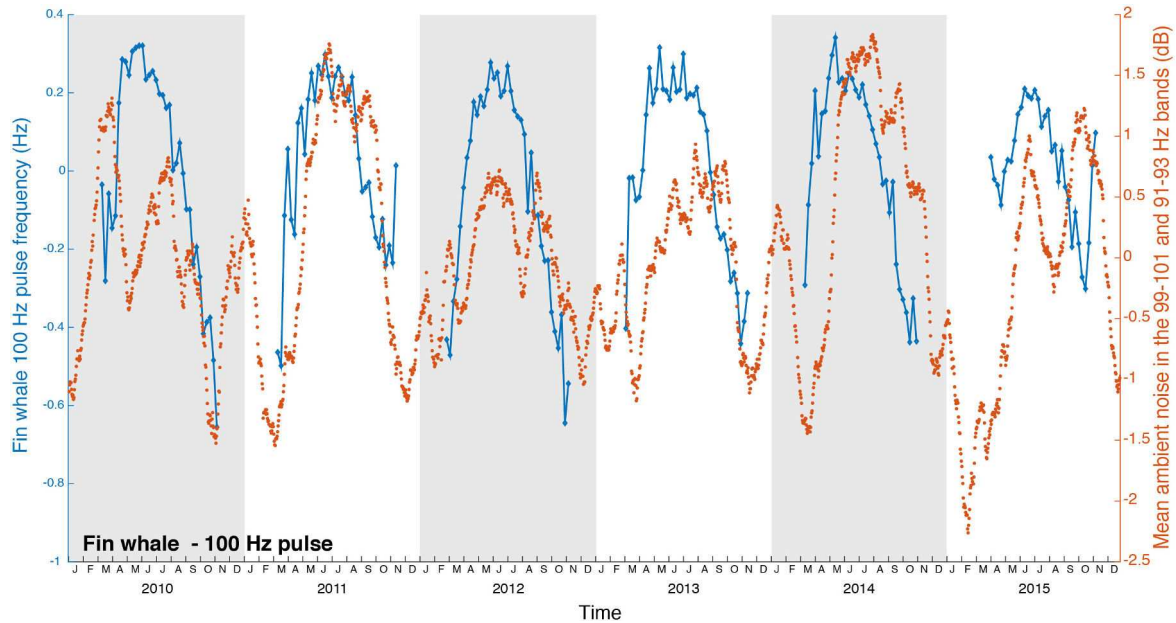


Fig. S1: Seasonal variations of fin whale 100 Hz-pulse frequency and of the ambient noise in the surrounding frequency band.

To further test the whale-frequency/noise relationship for Antarctic blue whales, we plotted the frequency of units A versus the 30-33 Hz noise-level measured at the MAD, NEAMS, WKER and SWAMS sites. All sites show a general linear increase of the call-frequency as the noise level increases (Fig. S2). The overall correlation coefficients of linear regressions are $R^2 = 0.8, 0.5, 0.4$ and 0.4 , respectively for MAD, SWAMS, NEAMS and WKER. The lesser coefficients reflect the fact that these plots also show in a different way that the call-frequency and noise level decrease over the years; they thus combine intra-annual with inter-annual variations. When data for a single year are correlated, it is worth noting that the rate of frequency-increase relative to the noise level is fairly constant between 75 and 90 dB, keeping in mind that the frequency varies linearly and the noise level logarithmically (0.2 to 0.5 Hz for a 10 dB increase); excluding few outliers (*e.g.* MAD or SWAMS 2015), most fitted lines in Fig. S2 are parallel. In addition, this frequency/noise dependency seems insensitive to the long-term decline of the frequency. This observation confirms that the intra-annual and inter-annual changes in call-frequency reflect two different behaviors.

Yet, Fig. 3A and 3B show that in the southern Indian Ocean, the long-term sound level in the selected bandwidths is also decreasing. This leads to a second observation that the frequency/noise relationship seems independent from the absolute noise-level, since, except for 2015, slopes of the fitted lines are similar in the 70-85 dB (MAD, NEAMS) and 80-90 dB ranges (WKER, SWAMS).

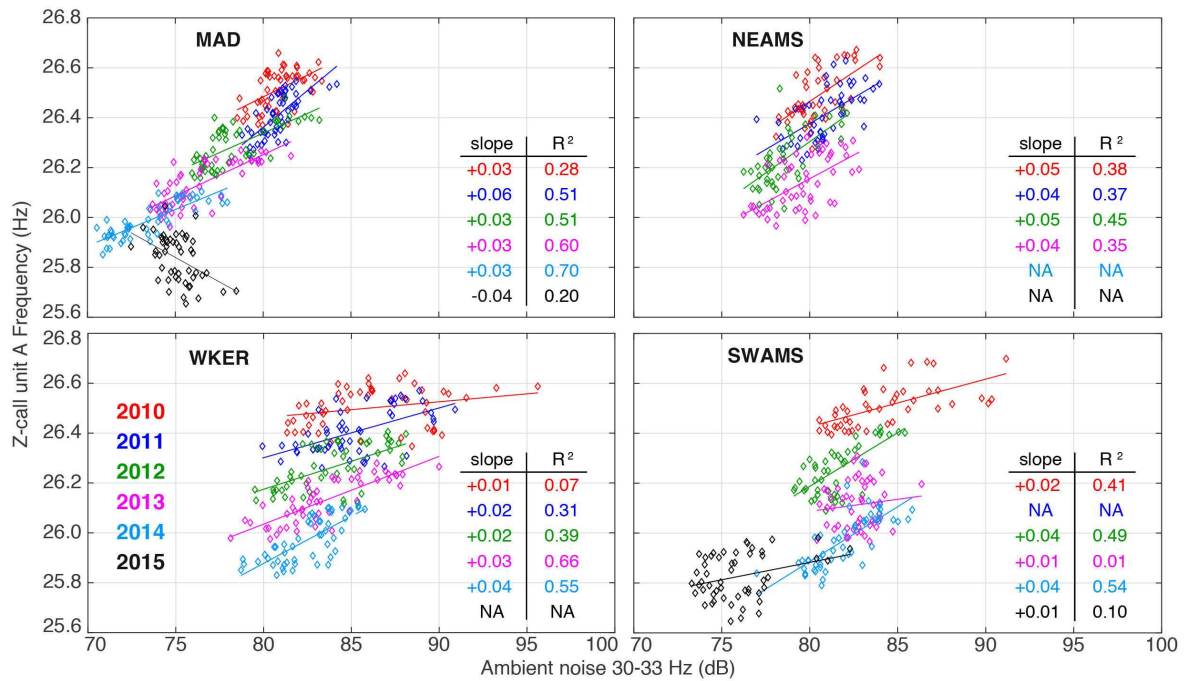


Fig. S2: Frequency of Z-call units A relative to the ambient noise-level in the 30-33 Hz frequency band. Data are color-coded by year. The slopes of the fitted lines are in Hz/dB; R^2 are the regression coefficients.

Figure S3 displays the daily frequency of detected Z-calls (unit A) at each OHASISBIO site (Fig. 1). Note that the long-term frequency decline and seasonal frequency variations are identical for all sites, and independent from the absolute noise-levels (Fig. 3-top and S2).

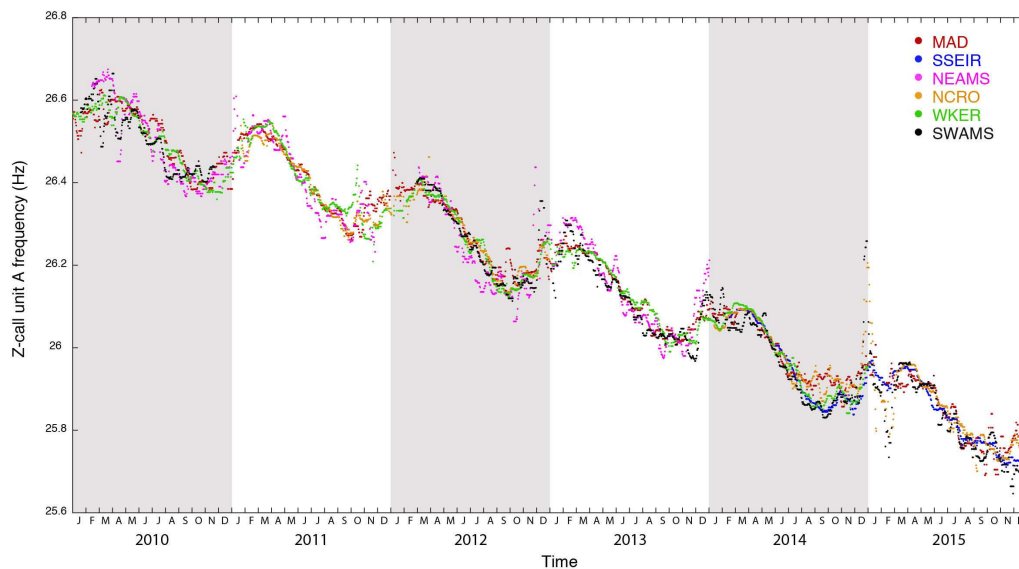


Fig. S3: Daily averaged frequency of Z-call units A at each recording site. Daily averages are based on a total of 1,003,988 individual calls.

Conclusion

Notre analyse systématique des Z-calls a permis de confirmer et d'affiner les observations antérieures sur les variations inter- et intra-annuelles de la fréquence de l'unité A du Z-call. Complétée par des analyses plus sommaires des DSP des vocalisations des autres espèces présentes dans l'océan Indien austral, elle documente pour la première fois la diminution de fréquence de la baleine bleue pygmée de Madagascar et du rorqual commun. Elle met surtout en lumière la relation entre la variation intra-annuelle de la fréquence du Z-call et la variation du bruit ambiant basse-fréquence, généré principalement par l'apparition saisonnière d'icebergs aux latitudes antarctiques et sub-antarctiques au cours de l'automne austral.

Les variations de fréquence long-terme et court-terme seraient, aux deux échelles de temps, liées à la modulation de puissance des vocalisations, puisque les variations de fréquence sont du même ordre (~ 0.1 Hz). Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait pouvoir mesurer, tout au long d'une année, le niveau d'émission d'un nombre statistiquement significatif de vocalisations, pour s'affranchir d'un possible effet de la taille ou de la condition physique des individus sur ce niveau d'émission. Une telle entreprise constituerait un véritable défi dans les latitudes australes.

Les causes de ces variations de puissance d'émission sont en revanche de différentes natures. Sur le long-terme (inter-annuel), il ne peut s'agir que d'une cause long-terme, comme l'augmentation de densité de population (McDonald et al., 2009; Gavrilov et al., 2011). On disposerait alors d'un indicateur de reconstitution des populations qu'il resterait toutefois à calibrer. La décroissance linéaire de fréquence au cours des années correspond entre 0.35 et 0.50% de la fréquence considérée (0.2% pour le rorqual commun). Est-ce un indice d'accroissement différencié des populations concernées ? Sur le court-terme (intra-annuel), il ne peut s'agir que d'une cause cyclique ou saisonnière, donc probablement indépendante des individus et plutôt dépendante de l'environnement sonore. Le bruit cryogénique généré par les icebergs semble la source de bruit basse-fréquence la plus plausible aux latitudes fréquentées par les baleines bleues et les rorquals. Ce bruit puissant insonifie tout l'océan austral jusqu'aux latitudes tropicales (par ex. le site MAD du réseau OHASISBIO à 26° S). Cependant les variations intra-annuelles de fréquence du pulse à 99 Hz du rorqual commun sont déphasées par rapport à celles du Z-call, et semblent plutôt corrélées aux variations du bruit dans ces fréquences plus élevées (~ 100 Hz) (voir Figure 6 en Appendice de l'article). Il est donc plausible que les variations intra-annuelles de fréquence soient liées au bruit ambiant survenant dans la bande de fréquences entourant la vocalisation, et donc que des causes différentes

expliquent ces variations du niveau de bruit ambiant, en fonction de la fréquence considérée.

Pour vérifier cette idée, il faudrait analyser finement l'évolution de la fréquence des signatures vocales des autres populations de baleines bleues peuplant les différents océans du globe, afin d'étudier si toutes sont sujettes à ces variations intra-annuelles, et si les variations existantes peuvent être dans chaque cas reliées à des variations intra-annuelles du niveau de bruit ambiant.

Chapitre 5

Distribution géographique et saisonnière des baleines bleues pygmées et des rorquals communs dans l’océan Indien austral

Introduction

La zone d’étude couverte par le réseau d’hydrophones OHASISBIO est fréquentée par plusieurs espèces et sous-espèces de grandes baleines. La fréquence d’échantillonnage des hydrophones permet notamment d’enregistrer les signatures vocales du rorqual commun et des baleines bleues pygmées des populations de Madagascar, d’Australie et du Sri Lanka. Samaran et al. (2010b, 2013) ont déjà montré l’importance de l’océan Indien austral pour ces populations de baleines bleues pygmées, en particulier suite à l’analyse des données enregistrées en 2007 par le réseau d’hydrophones DEFLOHYDRO. Cependant, ces observations sont limitées à des échelles spatiale et temporelle réduites par rapport à celles offertes par les enregistrements du réseau OHASISBIO. A défaut d’analyser systématiquement la signature vocale proprement dite de ces populations, dans le cadre de l’analyse des variations de fréquences long-terme (*cf.* Chapitre 4) nous en avons examiné le Rapport Chorus sur bruit-hors-Chorus (*Chorus to Noise without Chorus Ratio* ou *CNR*). Cette métrique, utilisée dans le chapitre 3 pour évaluer la puissance du chorus des baleines bleues Antarctique, a été adaptée aux autres signatures vocales enregistrées par le réseau. Moins précise que la détection des vocalisations, elle permet toutefois de se faire une idée générale de la répartition géographique et saisonnière de ces

(sous-)espèces et populations dans notre aire d’écoute. Une brève analyse de ces distributions est présentée ici.

5.1 Données et méthodes

Pour cette analyse, toutes les données enregistrées par le réseau OHASISBIO ont été exploitées, à l’exception de celles du site RAMA, en raison de la période réduite d’enregistrement (16 mois), et de celles du site NCRO en 2010 et 2013, trop bruitées (*cf.* Chapitre 3). Les signatures vocales des baleines bleues pygmées et du rorqual commun sont bien distinctes du Z-call de baleine bleue Antarctique, et sont constituées de plusieurs unités (Figure 5.1). Comme décrit dans le chapitre 4, pour chaque signature vocale, l’unité la plus puissante ou la plus visible sur les spectrogrammes long-terme a été choisie (unités encadrées sur la figure 5.1). Ainsi, nous avons ciblé l’unité à ~ 35 Hz pour la baleine bleue pygmée de type Madagascar (Figure 5.1 b), l’harmonique à ~ 70 Hz de la baleine bleue pygmée d’Australie (Figure 5.1 c), la tonalité à ~ 105 Hz de celle du Sri Lanka (Figure 5.1 d), et enfin le pulse à ~ 99 Hz du rorqual commun (Figure 5.1 e). Un intervalle de valeurs encadrant la fréquence de ces unités d’intérêt a été défini pour l’ensemble des années (2010 à 2015 ; Tableau 5.1). Afin de caractériser le bruit ambiant autour de ces intervalles et de comparer la puissance des signaux à la puissance du bruit, deux bandes de bruit encadrant l’intervalle de fréquence de chaque signature vocale ont été définies (voir Tableau 5.1). La Densité Spectrale de Puissance (DSP ou *PSD : Power Spectral Density*) du signal a été calculée pour chaque fichier (de durée ~ 6 h28) en utilisant la fonction Pwelch de la librairie Matlab sur des fenêtres de 300 s avec 50% de recouvrement et une FFT de 24000 points (100 s) afin d’obtenir une résolution fréquentielle de 0.01 Hz. La puissance moyenne du signal (en dB/Hz) a ensuite été calculée pour chaque bande de fréquence d’intérêt, celle des vocalisations et celles du bruit. La moyenne de la puissance du bruit encadrant la vocalisation a été retranchée à la DSP de la vocalisation pour obtenir le CNR. Pour les signatures vocales de rorquals communs et de baleines bleues pygmées de Madagascar et d’Australie, un CNR moyen par semaine a finalement été calculé. La signature vocale de baleine bleue pygmée du Sri Lanka a fait l’objet d’un traitement un peu différent. En effet, cette signature n’est présente que sur les spectrogrammes long-terme du site NEAMS et avec une intensité moindre par rapport aux autres signatures. Par conséquent, la DSP a été analysée sur un spectre moyen par semaine. De plus, en raison de la proximité fréquentielle entre l’unité d’intérêt (~ 101 Hz) et le pulse à 99 Hz du rorqual commun, seule une bande de bruit située au-dessus de la fréquence de la signature a été retenue ; ce bruit décroissant souvent rapidement

quand la fréquence croît, nous avons calculé sa pente et avons extrapolé cette droite de décroissance à la fréquence du pic de DSP identifié (Figure 5.2). Cette valeur définit le niveau de bruit qui sera ensuite retranché au DSP de la vocalisation pour mesurer le CNR.

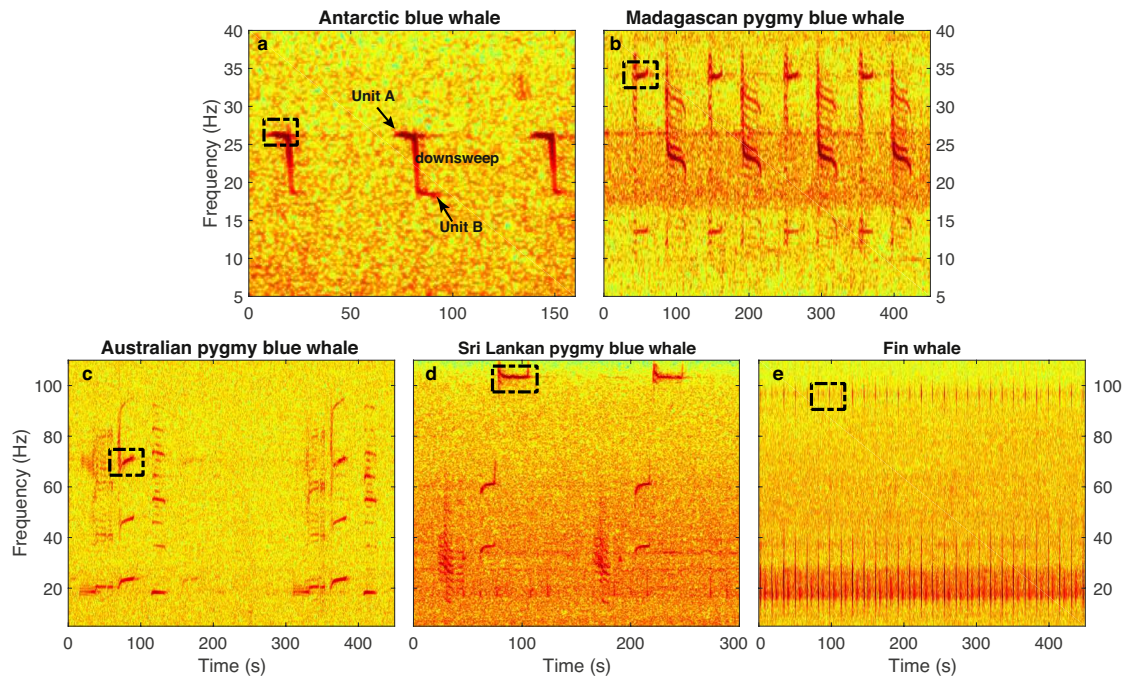


FIGURE 5.1 – Signatures vocales des baleines bleues Antarctique (a), des baleines bleues pygmées de type Madagascar (b), Australie (c) et Sri-Lanka (d), et des rorquals communs (e). L'unité encadrée est l'unité choisie pour les analyses.

TABLE 5.1 – Bandes de fréquences sur lesquelles ont été calculées les DSP des différentes signatures vocales et du bruit associé. L'abréviation *BBP* désigne la baleine bleue pygmée.

	Bande fréquentielle de la vocalisation	Bande de bruit supérieure	Bande de bruit inférieure
BBP de Madagascar	[33.5 - 34.5 Hz]	[30 - 32 Hz]	[36 - 38 Hz]
BBP d'Australie	[67.1 - 70 Hz]	[64 - 66 Hz]	[71 - 73 Hz]
BBP du Sri Lanka	[98.9 - 102.1 Hz]	[102 - 106 Hz]	x
Rorqual commun	[95.2 - 97.8 Hz]	[91 - 93 Hz]	[99 - 101 Hz]

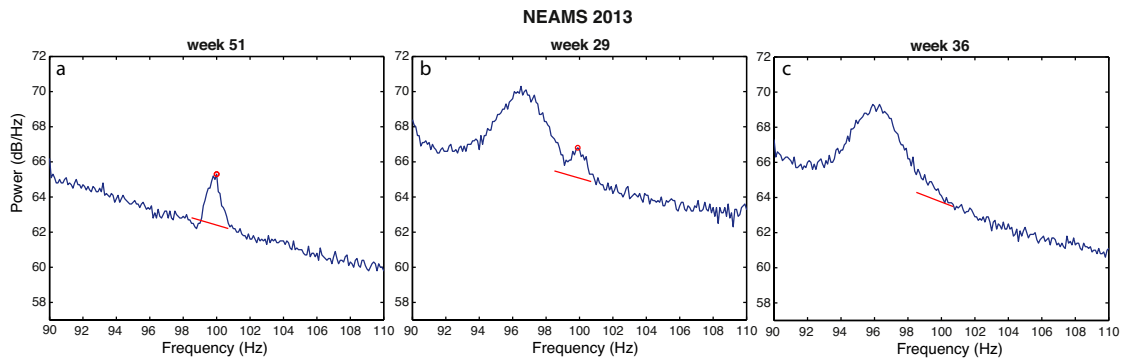


FIGURE 5.2 – Exemples de calcul de Densité Spectrale de Puissance moyenne hebdomadaire sur le site NEAMS entre 90 et 110 Hz : a) détection d’un chorus de Sri Lanka ; b) détection d’un chorus de Sri Lanka en présence d’un fort chorus de rorqual commun ; 3) la largeur du chorus du rorqual commun empêche la détection d’un signal Sri Lanka significatif. La ligne rouge indique le niveau de bruit ambiant mesuré dans la bande 102-106 Hz et extrapolé aux fréquences du chorus. Le symbole rouge indique la fréquence mesurée pour la vocalisation. Le CNR correspond à la moyenne de la différence entre les DSP du chorus et le bruit extrapolé.

5.2 Résultats

5.2.1 Distribution géographique

Les valeurs de CNR par site pour les quatre signatures vocales (baleines bleues pygmées des trois populations, et rorquals communs) sont présentées en Figures 5.3 et 5.4. Les résultats relatifs aux baleines bleues pygmées du Sri Lanka, limités à un seul site, ont été tracés séparément. Ces résultats indiquent que les rorquals communs fréquentent tous les ans l’ensemble des sites du réseau. Les baleines bleues pygmées de Madagascar sont enregistrées également tous les ans à tous les sites sauf à NEAMS, tandis que les baleines bleues pygmées d’Australie ne sont enregistrées qu’à SSEIR, SWAMS, et plus rarement à NEAMS. Enfin, les baleines bleues du Sri Lanka ne sont enregistrées qu’au site NEAMS avec un CNR très faible (Figure 5.4).

5.2.2 Patrons saisonniers

La présence des signatures vocales de rorquals communs et de baleines bleues pygmées de Madagascar et d’Australie dans notre zone d’écoute est extrêmement saisonnière (Figure 5.5). Les baleines bleues pygmées de Madagascar sont détectées à partir de janvier aux sites NCRO, WKER, SWAMS et SSEIR, et trois semaines à un mois plus tard à MAD. Le CNR maximum est observé entre mars et avril. A partir de la fin du mois de juin, la signature vocale de cette population n’est plus enregistrée par le réseau. Les baleines bleues pygmées d’Australie présentent la

même saisonnalité que la population de Madagascar, avec une augmentation du CNR à partir de janvier à SWAMS et environ une semaine plus tard à SSEIR, des maxima en mars-avril et une chute du niveau en juin. Les rorquals communs sont enregistrés dès début mars aux sites WKER et NCRO, situés au sud du réseau. On les retrouve environ deux semaines plus tard au site SWAMS, puis début avril à NEAMS. Enfin, ils sont détectés trois semaines à un mois plus tard à MAD.

Les valeurs de CNR des baleines bleues pygmées du Sri Lanka sont faibles et les patrons saisonniers moins évidents que pour les autres signatures vocales (Figure 5.4). On peut cependant observer une augmentation du CNR de mars à mai/juin (fin de l'automne - début de l'hiver), une diminution pendant juillet-août (hiver) puis un nouveau pic de début septembre à fin décembre (printemps - début de l'été), et une diminution pendant janvier et février (été).

5.3 Discussion

Les patrons saisonniers de présence des baleines bleues pygmées de Madagascar et d'Australie sont cohérents avec les résultats obtenus par Samaran et al. (2013) à partir des enregistrements du réseau DEFLOHYDRO. La signature vocale de la population de Madagascar n'était détectée qu'aux sites MAD et SWAMS (pas à NEAMS) et essentiellement en été et en automne, mais sans aucune vocalisation après juin. Cette signature avait également été détectée au large de Crozet de janvier à juin 2004 (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b) et à Diego Garcia de mai à début juillet en 2002-2003 (Stafford et al., 2011). La signature vocale de la population d'Australie a quant à elle été détectée à SWAMS et en très petite quantité à NEAMS, ici encore de janvier à juin, *i.e.* durant l'été et l'automne austral (Samaran et al., 2013). La baleine bleue pygmée Australie est également présente près des côtes australiennes, de février à juillet à Perth Canyon, de février à mai dans le détroit de Bass (*Bass Strait*) (Balcazar et al., 2015), et en novembre-décembre puis de février à juillet à Cape Leeuwin (Gavrilov & McCauley, 2013).

Concernant la baleine bleue pygmée du Sri Lanka, sa signature a été détectée à NEAMS et en très faible nombre à SWAMS par Samaran et al. (2013). Dans cette étude, les auteurs relèvent la présence de vocalisations durant toute l'année, avec un pic estival. A cette période, nous observons au contraire une diminution du CNR. Nos résultats sont en revanche proches des patrons saisonniers observés à Diego Garcia par Stafford et al. (2011), qui relevaient un pic de détections en mars-avril et un second en novembre-décembre.

L'analyse rapide des données d'OHASISBIO avec la métrique du CNR confirment les observations de précédents travaux. Notre analyse montre également que la

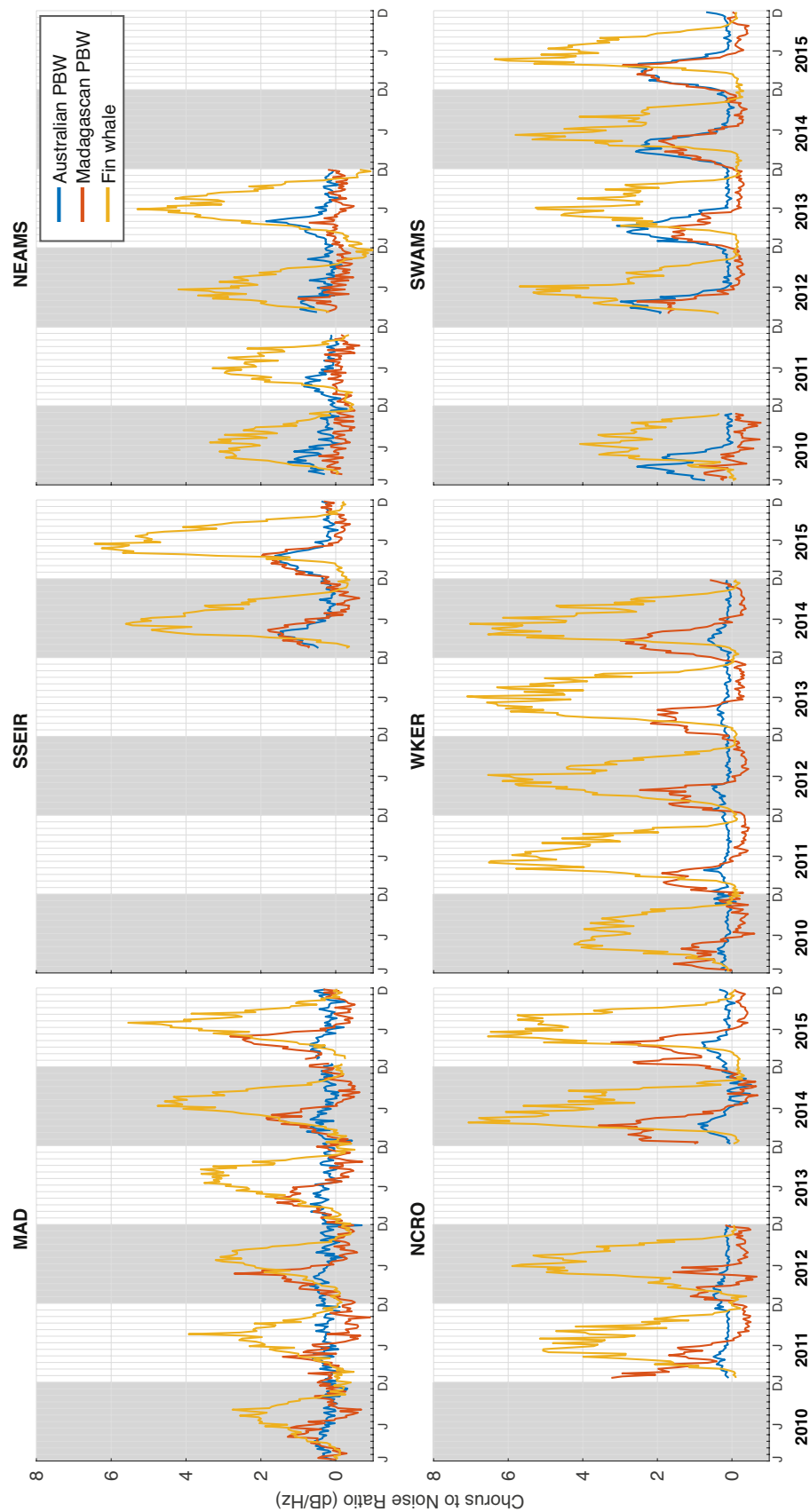


FIGURE 5.3 – CNR des signatures vocales des rorquals communs et des baleines bleues pygmées de Madagascar et d’Australie pour chaque site du réseau OHASIS-BIO.

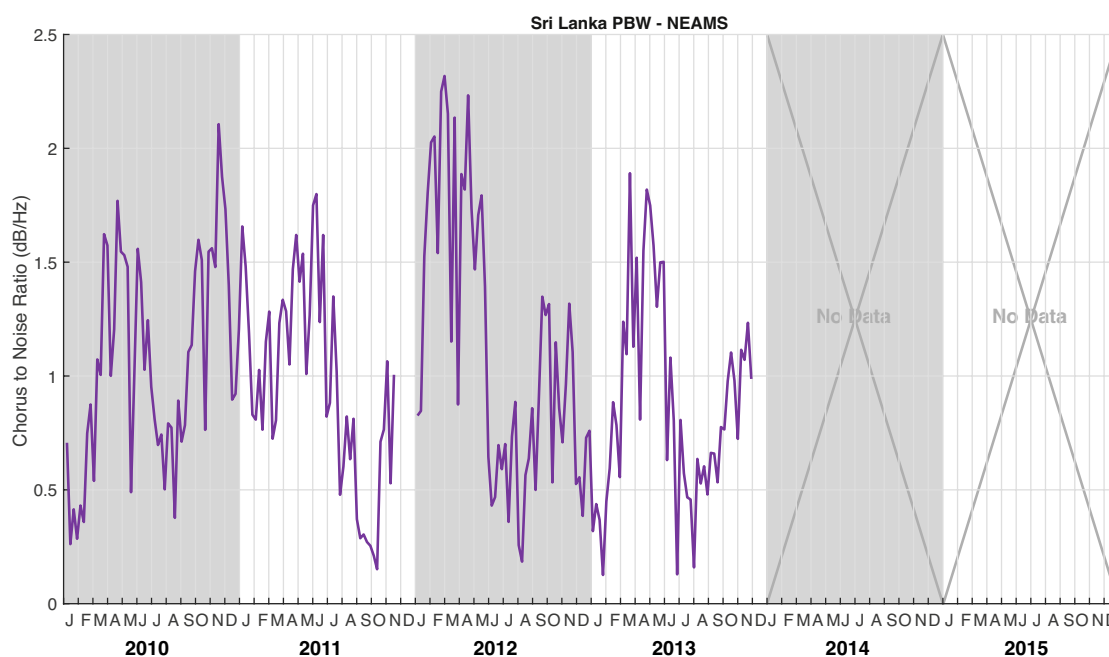


FIGURE 5.4 – CNR mesuré pour la signature vocale de baleine bleue pygmée du Sri Lanka au site NEAMS.

population de baleines bleues pygmées de Madagascar se répartit bien jusqu'au sud de notre réseau, c'est-à-dire jusqu'à 46° S (site WKER), mais plus de 600 km à l'est de l'archipel de Crozet où elle avait été détectée (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b). Les populations de baleines bleues pygmées de Madagascar et d'Australie ne migreraient pas en Antarctique, mais s'alimenteraient dans les eaux subantarctiques durant l'été austral (Branch et al., 2007). Elles se répartiraient longitudinalement dans notre aire d'écoute pendant l'automne et l'été austral, dans l'ouest de la zone pour la population de Madagascar, et dans l'est pour la population d'Australie. Ces populations remonteraient ensuite vers les basses latitudes à partir de juin-juillet pour y passer l'hiver, mais les aires d'hivernage de ces populations restent inconnues à l'heure actuelle. Des observations visuelles et des données de chasse rapportent leur présence en hiver au large de l'Afrique du Sud et de l'Indonésie respectivement pour les populations de Madagascar et d'Australie (Branch, 2007), suggérant que ces zones puissent être des zones d'hivernage, mais il n'en existe à l'heure actuelle aucune preuve acoustique. La population du Sri Lanka est quant à elle vraisemblablement une population résidente du nord de l'océan Indien, mais les études acoustiques montrent qu'une partie de la population semble effectuer des migrations vers les latitudes subantarctiques en été et automne austral, c'est-à-dire après la période de moussons et donc de forte productivité des eaux de l'océan Indien nord (Branch, 2007; Samaran et al., 2013).

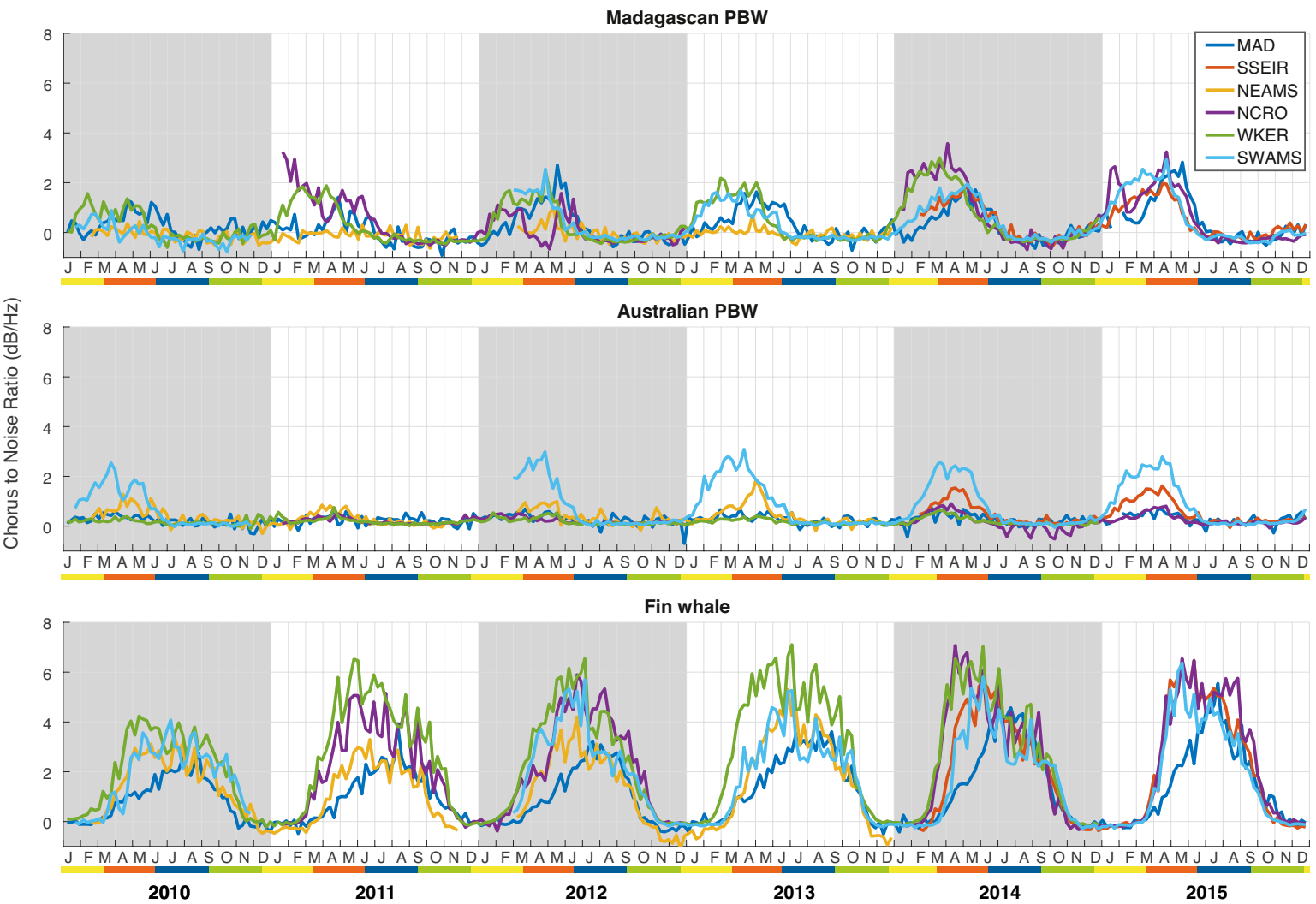


FIGURE 5.5 – CNR mesuré à l’ensemble des sites du réseau OHASISBIO (excepté RAMA) pour les signatures vocales des rorquals communs et des baleines bleues pygmées de Madagascar et d’Australie.

Enfin, l'arrivée progressive des vocalisations de rorquals communs aux différents sites suit le gradient latitudinal selon lequel ces sites sont répartis. Ceci indique une probable migration sud-nord de l'espèce, avec une arrivée au sud du réseau à la fin de l'été austral pendant lequel l'espèce s'alimente au large de l'Antarctique (Širović et al., 2004, 2009), et une migration vers les eaux plus chaudes des latitudes sub-antarctiques et sub-tropicales pour y passer l'hiver. Les pics de CNR se situent entre mai pour les sites les plus au sud et juillet-août pour le site le plus au nord (MAD). La diminution du niveau de CNR est en revanche synchrone pour l'ensemble des sites vers octobre-novembre. La présence de rorquals communs au même moment à des latitudes et longitudes différentes pourrait indiquer que les individus ne partent pas tous ensemble vers les zones d'alimentation, comme supposé pour les baleines bleues (*e.g.* Samaran et al., 2010b, 2013; Thomisch et al., 2016). Un changement de comportement vocal pourrait également expliquer la diminution du CNR au printemps. Les vocalisations des rorquals communs sont identifiées comme clairement liées au comportement reproducteur (Watkins et al., 1987; Croll et al., 2002), c'est-à-dire émises principalement durant la période de reproduction, ce qui expliquerait leur faible niveau de CNR durant l'été austral (*e.g.* Watkins et al., 1987; Croll et al., 2002; Širović et al., 2009).

Conclusion

Ces résultats préliminaires confirment une fois de plus l'importance de l'océan Indien austral pour différentes populations de grandes baleines, à la fois en tant qu'aire d'alimentation, notamment pour les baleines bleues pygmées (Samaran et al., 2010b, 2013), et en tant qu'aire d'hivernage pour les baleines bleues Antarctique (*cf.* Chapitre 3 et Samaran et al., 2013) et les rorquals communs. Cependant, bien que la mesure du CNR, simple et peu coûteuse en temps de traitement, procure une vue d'ensemble sur la distribution des différentes populations dans notre zone d'étude, elle ne remplace pas une étude plus précise avec détection et comptage des vocalisations individuelles, à l'image de l'étude réalisée sur les baleines bleues Antarctique au Chapitre 3. Une telle analyse reste à faire.

Chapitre 6

Découverte de deux nouvelles vocalisations de baleine

Introduction

Depuis l'essor du suivi par acoustique passive, le répertoire vocal des différentes espèces, sous-espèces ou populations de mammifères marins a pu être décrit pas à pas en associant des observations visuelles et acoustiques. Il est aussi relativement courant que de nouveaux sons soient identifiés dans les enregistrements et décrits dans la littérature (Wenz, 1964; Watkins et al., 2000b, 2004; Brodie & Dunn, 2015; Sousa & Harris, 2015). L'acoustique passive étant une méthode aveugle, il est possible, d'après les caractéristiques des signaux, de déterminer la nature de leur source (biologique, géologique, ou anthropique); l'identification définitive des sources biologiques requiert toutefois des observations conjointes visuelles, souvent difficiles à acquérir dans les zones inaccessibles telles que les mers polaires.

L'analyse systématique de la base de données acquise grâce au réseau d'hydrophones OHASISBIO pour l'étude de la présence de Z-calls a révélé la présence de signaux non décrits auparavant dans la littérature. Ces signaux, baptisés "P-calls", sont composés d'une seule unité tonale d'une durée d'une dizaine de secondes et de fréquence extrêmement proche de la fréquence de l'unité A du Z-call. Ils peuvent alors être facilement confondus avec des Z-calls incomplets, pour lesquels le *downsweep* et l'unité B auraient été perdus par propagation. Leur fréquence est cependant légèrement supérieure (~ 0.6 Hz), et leur intervalle inter-cris (ICI, intervalle de temps entre le début d'un cri et le début du cri suivant) est beaucoup plus long, près de 160 s, alors que l'ICI entre deux Z-calls est de 60 s environ. Afin d'étendre la période d'observation, les données enregistrées en 2007 par le réseau DEFLOHYDRO, composé des trois sites MAD, NEAMS et SWAMS, ont été également analysées. Ces enregistrements ont révélé un autre signal, absent

dans les enregistrements postérieurs à 2010 (réseau OHASISBIO). Ce signal est aussi composé d'une seule unité tonale d'une dizaine de secondes, répétée avec un intervalle de plus de deux minutes, mais dont la fréquence est proche de 22 Hz. Il a été baptisé "M-call"¹.

Ces deux signaux répondent aux critères caractérisant les signaux d'origine biologique (Stafford et al., 1999) : leurs patrons d'émission sont non-aléatoires puisqu'ils sont répétés en série avec un intervalle plus ou moins régulier et présentent une saisonnalité dans leur occurrence. Ils se trouvent dans une bande de fréquences étroite et non continue, sont supérieurs à 10 Hz et modulés en amplitude. Les signaux géologiques, par exemple, sont de plus basse fréquence (< 15 Hz), peuvent durer plus d'une minute et se produisent de façon aléatoire. Parmi les signaux anthropiques récurrents dans nos données acoustiques, les bruits de bateaux sont caractérisés par des signaux continus de longue durée dans des bandes de fréquence étroites, tandis que les tirs de canons à air sont des pulses de très courte durée, répétés régulièrement mais couvrant une bande de fréquences très large. D'après ces critères, les deux signaux identifiés sont certainement d'origine biologique, et sont probablement émis par des grandes baleines, en raison de leur similitude avec les vocalisations connues de mysticètes (Sousa & Harris, 2015). A défaut d'identifier l'espèce source de ces nouvelles vocalisations, des hypothèses peuvent être émises à partir de leurs caractéristiques et de leur distribution spatio-temporelle. Cette description fait l'objet de l'article reproduit ci-après. L'article met notamment en évidence la différence entre P-calls et les Z-calls incomplets, différents par leurs caractéristiques temporelles et fréquentielles et par leur occurrence spatio-temporelle dans notre réseau. Une confusion entre P-calls et Z-calls incomplets peut donc entraîner des erreurs d'interprétation, par exemple sur leur présence saisonnière.

Article paru dans *The Journal of the Acoustical Society of America*

1. Les noms attribués à ces nouvelles signatures relèvent de l'anecdote. "P-call" est bien sûr à prononcer à l'anglaise, mais seuls les francophones pourront comprendre l'allusion. Nous laisserons au lecteur le soin d'apprécier le jeu de mot. Il a été suggéré par notre collègue et ami, Romain Château, malheureusement parti trop vite. "M-call" est quant à lui beaucoup moins philosophique puisqu'il signe simplement la découverte, et réfère alors à "Manue-call".



Identification of two potential whale calls in the southern Indian Ocean, and their geographic and seasonal occurrence

Emmanuelle C. Leroy

University of Brest and Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire Géosciences Océan, Institut Universitaire Européen de la Mer, 29280 Plouzané, France

Flore Samaran and Julien Bonnel

Centre National de la Recherche Scientifique Unité Mixte de Recherche 6285 Lab-STICC, Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées, Bretagne, 29806 Brest, France

Jean-Yves Royer^{a)}

Centre National de la Recherche Scientifique and University of Brest, Laboratoire Géosciences Océan, Institut Universitaire Européen de la Mer, 29280 Plouzané, France

(Received 13 March 2017; revised 10 August 2017; accepted 17 August 2017; published online 15 September 2017)

Since passive acoustic monitoring is widely used, unidentified acoustic signals from marine mammals are commonly reported. The signal characteristics and emission patterns are the main clues to identify the possible sources. In this study, the authors describe two previously unidentified sounds, recorded at up to five widely-spaced sites (30×30 degree area) in the southern Indian Ocean, in 2007 and between 2010 and 2015. The first reported signal (M-call) consists of a single tonal unit near 22 Hz and lasting about 10 s, repeated with an interval longer than 2 min. This signal is only detected in 2007. The second signal (P-call) is also a tonal unit of 10 s, repeated every 160 s, but at a frequency near 27 Hz. Its yearly number increased greatly between 2007 and 2010, and moderately since then. Based on their characteristics and seasonal patterns, this study shows that both signals are clearly distinct from any known calls of blue whale subspecies and populations dwelling in the southern Indian Ocean. However, they display similarities with blue whale vocalizations. More particularly, the P-call can be mistaken for the first tonal unit of the Antarctic blue whale Z-call.

© 2017 Acoustical Society of America. [<http://dx.doi.org/10.1121/1.5001056>]

[JFL]

Pages: 1413–1427

I. INTRODUCTION

Marine mammals are vocally active animals that produce a large and diverse range of sounds. The frequency, complexity, and variability of these sounds depend on the species, each of which has its own vocal repertoire.¹ This repertoire, described step by step through combined visual and acoustic surveys (e.g., Refs. 2 and 3), is the key for monitoring whales solely using passive acoustic methods, particularly in remote or inaccessible areas of the ocean.^{4,5} Passive acoustics have, for instance, been commonly used in the Southern Ocean to monitor blue whale (*Balaenoptera musculus spp.*) distribution and migration.^{6–8} Acoustic monitoring targeted at specific species often leads to the discovery of sounds from unknown sources.^{9–13} Based on sound characteristics, such as the duration, spectral shape, frequency, overtones, or repetition patterns, it is generally possible to identify the nature of their source (biological, geological, or anthropogenic).¹⁴ In the case of biological sounds, hypotheses can be made about the type of animal that produce them (e.g., shell fish, fish, mysticeti, odontoceti). For instance, Watkins *et al.*^{10,11} concluded that the so called “52-Hz call” or “Watkins’ whale call” is emitted by a baleen whale, which may correspond to a blue-fin hybrid whale, based on the call

characteristics and its seasonal and geographic occurrences.¹⁵ Similarly, Sousa and Harris¹² described two new acoustic signals recorded near Diego Garcia Island, in the northern Indian Ocean, which have similar characteristics to blue whale calls. Still, only a combination of visual and acoustic observations can confirm the source of new sounds. Such confirmation may take years, since it requires being in the right place at the right time, with the right tools. In other instances, previously unknown calls have been rapidly identified, extending our knowledge of the whale repertoire (e.g., Ref. 16).

In 2007, and then since 2010, the southern Indian Ocean has been continuously instrumented with networks of hydrophones covering a wide range of latitudes and longitudes (4° to 46° S, 53° to 81° E), to monitor the low-frequency acoustic signals produced by seismic and volcanic events, and by large baleen whales.^{17,18} The resulting acoustic records hold a large collection of calls from known species and subspecies, such as fin whales (*Balaenoptera physalus*), minke whales (*B. bonaerensis*), Antarctic blue whales (*B. m. intermedia*), and three populations of pygmy blue whales (Australia, Madagascar, and Sri-Lanka types) (*B. m. brevicauda*).^{7,8,18–20} This data base has been extensively investigated to monitor the geographic and seasonal distribution of Antarctic and pygmy blue whales.^{7,8} In this analysis, we detected the presence of two unidentified acoustic signals. Both signals, hereinafter referred to as “M-calls” and “P-

^{a)}Electronic mail: jean-yves.royer@univ-brest.fr

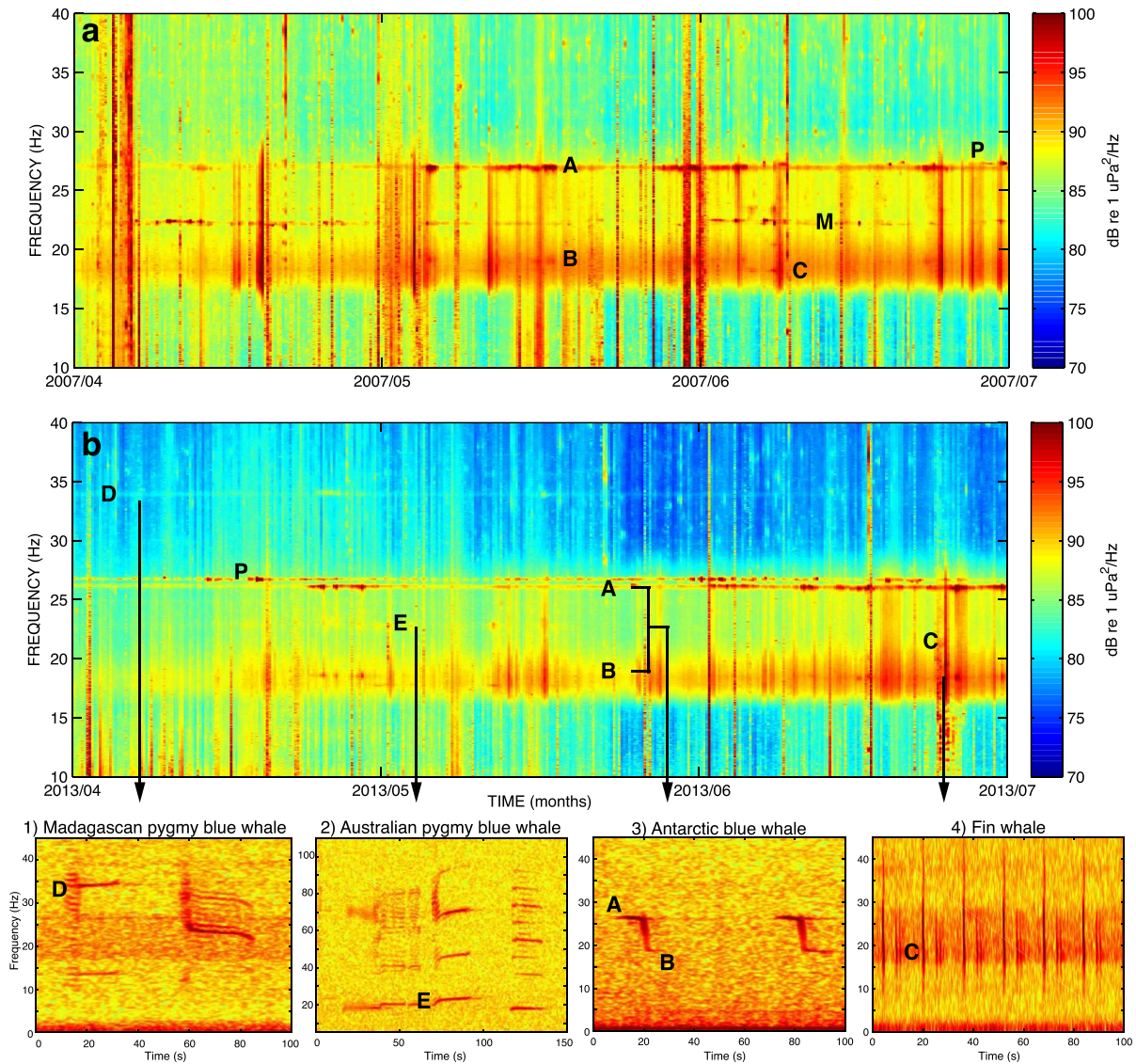


FIG. 1. (Color online) Long-term and close-up spectrograms of data recorded at the NEAMS site in 2007 (a) and in 2013 (b). The parallel horizontal frequency bands are made of Units A and B of Antarctic blue whale Z-calls (A and B), fin whale 20 Hz-pulses (C), pygmy blue whale calls of the Madagascar type (D), and Australia type (E), and unknown calls, reported as M- and P-calls in this paper. Spectrogram parameters: 6 h averaging window, 50% overlap, FFT window of 120 s.

calls,” are clearly visible on long-term spectrograms, which offer a synthetic view of the main whale species present in acoustic records, thanks to energetic frequency bands formed by the presence of repeated and stereotyped calls. For example, in Fig. 1, high amplitudes between 18 and 26 Hz indicate the presence of Antarctic blue whale stereotyped Z-calls and fin whale 20 Hz-pulses. However, two other energetic bands stand out near 22 Hz [Fig. 1(a)] and 27 Hz [Fig. 1(b)]; both frequencies are different from typical Antarctic blue whale calls (A-B frequencies in Fig. 1). Although these frequencies are close to that of blue whale calls, they do not resemble other known vocalizations recorded in the area, namely, that of the Antarctic blue whale, the pygmy blue whale of the Madagascar and Australia types, and the fin whale. The call of the Antarctic blue whale, known as “Z” call, is made of a

first tonal unit A at about 26 Hz, lasting about 10 s, followed by a 1 to 2 s-long downsweep from 26 to 18 Hz, and a second tonal unit B at about 18 Hz [Fig. 1(b.3)]. The Madagascar pygmy blue whale call has two long units emitted in patterned sequences every 90 to 100 s [Fig. 1(b.1)]. The first unit has a fundamental frequency of about 35 Hz and lasts about 11 s, followed by a 40 s-long gap, and then a frequency-modulated downsweep with a center frequency near 25 Hz and lasting about 10 s.⁷ The Australian pygmy blue whale call is more complex [Fig. 1(b.2)]. It consists of three units with many overtones, repeated in sequences every 200 s. The first unit is a \sim 20 Hz tonal sound lasting 20 s, then shifting to 21 Hz for another 20 s. After a gap of a few seconds, it follows a frequency-modulated tone from 20 to 26 Hz lasting 23 s, and about 22 s later appears as a last and

third unit near 18 Hz and lasting about 15 s.^{7,21} Finally, the fin whale emits brief pulses from 15 to 30 Hz, repeated every 13 to 15 s, often along with an 99 Hz pulse²² [Fig. 1(b.4)]. None of these complex multi-tonal vocalizations matches with the unidentified simple tonal units. A systematic examination of our extensive acoustic data set provides evidence—signal characteristics, patterns of emission, geographic distribution, and seasonality—that confirm the biological nature of their source, undoubtedly whale(s).^{12,14} A comparison of this observation with other known whale calls in the area allows drawing hypotheses about their source(s).

II. MATERIAL AND METHODS

A. Data acquisition

Two datasets were analyzed for this study. The first set was recorded by the DEFLOHYDRO⁶⁰ hydrophone network, deployed from October 2006 to April 2008 at three locations in the southern Indian Ocean. One instrument was located south of La Reunion Island in the Madagascar Basin (MAD), one mid-way between the Kerguelen and Amsterdam islands (SWAMS), and a third one northeast of the St Paul and Amsterdam volcanic plateau (NEAMS) (Fig. 2, stars with thick contours). Each mooring consisted of an anchor, an acoustic release, and a hydrophone moored in the axis of the sound fixing and ranging channel, at a depth of 1000 to 1300 m below sea-surface depending on the site. All hydrophones had a sensitivity of -153.7 dB re: 1 V/ μ Pa and data were continuously sampled at 250 Hz (see Ref. 17 for a complete description of the recorder specifications). Only the data recorded in 2007 are analyzed here. The second set of data came from the OHASISBIO⁶¹ hydroacoustic experiment, started in December 2009 in the same region and still on-

going as of July 2017. In addition to the three sites instrumented during the DEFLOHYDRO experiment (MAD, NEAMS, and SWAMS), the OHASISBIO network comprised a site north of Crozet Islands (NCRO) and one between Crozet and Kerguelen islands (WKER). In 2012–2013, a temporary site was installed for 16 months in the central Indian Basin (RAMA) and in 2014 a new site was established in the northern Crozet Basin (SSEIR). Moorings were similar to those of the DEFLOHYDRO array. All hydrophones had a sensitivity of -163.5 dB re: 1 V/ μ Pa and the data were continuously sampled at a rate of 240 Hz (see Ref. 23 for instrumental details). Data are collected every year during the annual voyages of the R/V Marion Dufresne to the French Southern and Antarctic Territories. The database is almost continuous for the past 6 years (2010–2015), except for some months or years depending on the site, due to battery failures or instrument losses. Deployment details are summarized in Fig. 3 and listed in Appendix A (Table III; see also Ref. 8). This study used the whole 6-yr-long data set, except from the NCRO site in 2010 and 2013, where the records were hindered by high noise levels likely due to the strumming of the mooring line.

B. Data analysis

1. Visual inspection

Acoustic data were first visually analyzed on long-term spectrograms such as Fig. 1, which provide an overview of all energetic frequency bands. Then, the newly identified signals were closely inspected and described using the Raven Pro software (v1.5, Cornell Lab of Ornithology). The first unknown signal, referred to as “M-call,” is composed of one single tonal unit at about 22 Hz lasting about 10 s [Fig. 4(a)] and is regularly repeated in sequences of many calls. The Inter-Call Interval (ICI, defined as the gap between the beginning of a call and the beginning of the following one) is on the order of 2 min. Visual inspection of the data revealed that this signal is only present in the data recorded in 2007 and absent in the data recorded since 2010. Note that due to its limited occurrence, our study is less comprehensive than for the second unknown signal, referred to as P-calls. P-calls are also composed of a single tonal unit repeated in sequences of several calls 2 min apart, similar to M-calls, but at a higher frequency near 27 Hz [Fig. 4(b)]. Unlike M-calls, P-calls are present both in the 2007 data and every year since 2010. At first glance, the P-call can be mistaken for the unit A of an Antarctic blue whale Z-call [see Fig. 1(b.3)]. The unit A is indeed the most energetic part of a Z-call, and is sometimes the only visible part of low signal-to-noise ratio (SNR) Z-calls, which makes them highly similar to a P-call. However, it is clear from Fig. 1(b) that P-calls and Z-call’s unit A occur in different frequency bands. In Sec. IV, we demonstrate that P-calls are not incomplete Z-calls.

2. Signal characteristics

The call duration and ICIs were measured manually on a selection of 611 M-calls and 2020 P-calls on spectrograms, using Raven Pro [Hanning window with 50% overlap and

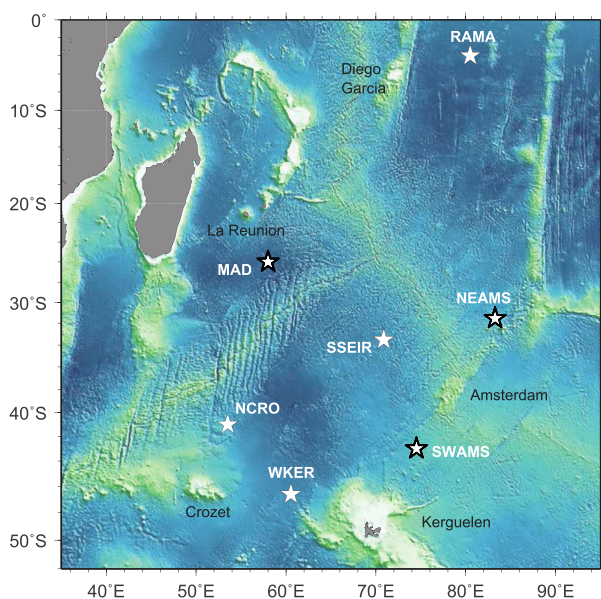


FIG. 2. (Color online) Hydrophone locations of the DEFLOHYDRO (stars with thick contours) and OHASISBIO networks (all stars) in the Indian Ocean.

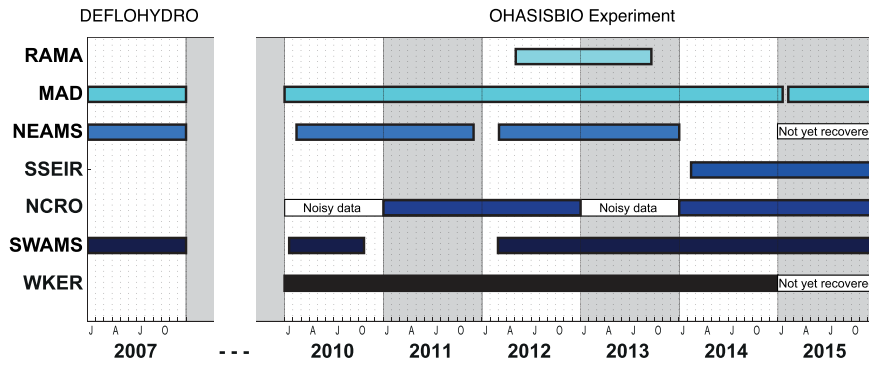


FIG. 3. (Color online) Periods of continuous acoustic recordings analyzed at each site. Details can be found in Table III of Appendix A.

256-point fast Fourier transform (FFT) for a good temporal resolution]. These calls were visually selected for their good quality, and were taken from different years and sites to enhance the number of samples. The call frequency was measured directly while running the automated detector (see Sec. II B 3), at the maximum of energy of each detected tonal unit (i.e., over more than 15 000 M-calls and 90 000 P-calls), with a precision of 0.035 Hz. Mean values associated with standard errors (s.e.) were calculated for the frequency and duration of each type of call. A median value was preferred to determine the ICI duration due to a high number of outliers.

3. Call detection

To detect P-calls in such a large acoustic dataset, we used an automated “Z-detector,” an algorithm based on a subspace-projection method designed for detecting signals with a Z-shape in a time-frequency domain.²⁴ This algorithm

models the Z-shaped signal with a logistical function and makes the assumption that the signal amplitude is piecewise constant, with four pieces of unknown amplitude that may be null. If the amplitudes of the third and fourth parts are null, the resulting signal is a tonal unit. In that way, the Z-detector is able to detect M- or P-calls with the same performances as for Z-calls.²⁴ To model the signal, the algorithm requires input parameters. The most important one for detecting tonal units such as P-calls is the search frequency band U , as for detecting the first tonal unit of a Z-shaped signal. The other parameters, pertinent to the other parts of Z-calls, were set to default values since they were not relevant here (see Refs. 8 and 24 for details). To allow for some flexibility, i.e., for frequency variations occurring between calls or throughout a year, the search frequency band U is bracketed in a ± 0.25 Hz interval. Since the Z-detector was originally designed for Antarctic blue whale Z-calls, which are ubiquitous in our data set,⁸ we set the frequency parameter U so that the frequency interval $U \pm 0.25$ Hz does not overlap with the known frequencies of Z-call units A, investigated by Leroy *et al.*⁸ In addition, long-term spectrograms and close-up inspections of some series of P-calls show that their frequency is decreasing over time, as also observed for Z-call units A.^{25,26} In order to take this long-term decrease into account, the U frequency is adapted for each year of data (Table I).

The performance and reliability of the Z-detector were thoroughly investigated for Z-calls.²⁴ Notably, this detector has an adaptive detection threshold varying with the ambient noise level that ensures a maximum false-alarm probability of 3%, even in the presence of interfering signals (e.g., other whale calls, earthquakes, airgun shots; see Fig. 3 in Ref. 24). Since the detector is designed to detect unit A from complete and incomplete Z-calls with the same accuracy, and due to

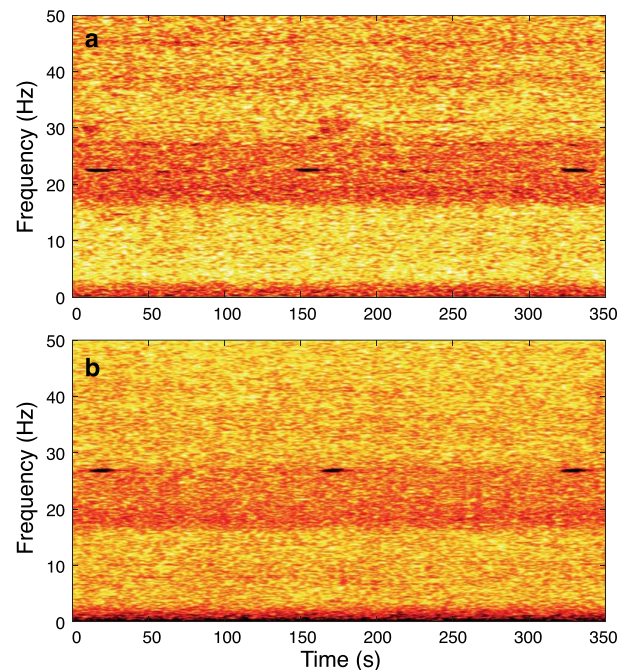


FIG. 4. (Color online) Spectrogram of three consecutive M-calls (a) and P-calls (b). Spectrogram parameters: Hamming window, 4096 point FFT length, 98% overlap.

TABLE I. Search frequency band U used for the automated detection of P-calls.

	U
2007	$27.40 \text{ Hz} \pm 0.25 \text{ Hz}$
2010	$27.05 \text{ Hz} \pm 0.25 \text{ Hz}$
2011	$27.05 \text{ Hz} \pm 0.25 \text{ Hz}$
2012	$26.95 \text{ Hz} \pm 0.25 \text{ Hz}$
2013	$26.85 \text{ Hz} \pm 0.25 \text{ Hz}$
2014	$26.60 \text{ Hz} \pm 0.25 \text{ Hz}$
2015	$26.35 \text{ Hz} \pm 0.25 \text{ Hz}$

the similarity of P-calls to the Z-call units A (tonal units of the same duration and close frequency), there is no reason to believe that the performance in detecting P-calls would be different, except for the detections of unwanted Z-calls. Indeed, since the frequencies of a Z-call unit A and a P-call are close, the automated detector may not always be able to decipher them, despite the careful choice of the U parameter. For this reason, we post-processed the detections to check whether Z-calls were not mistakenly detected; as anticipated, there were many of them, but easily sorted out, since their frequency is significantly and consistently different, as shown in Fig. 6 (see also Fig. 11 in Appendix A).

On average, 63% of the initial detections were Z-calls, and thus removed. This high percentage is not surprising given the massive occurrence of Z-calls in the records (1 003 988 Z-calls vs 90 410 P-calls⁸). In one instance though, due to the vicinity of Z- and P-call frequencies at site NEAMS in 2007 [Fig. 1(a)], all the automatic detections were individually checked on spectrograms and false detections manually removed (about 33 000 out of 38 162 events). Except for this site and year, none of the other sets of data required such double-check. This classification based on the detection frequency also allowed a quick deletion of other potential false detections (i.e., with outlier frequencies). This post-process removal of false positives (Z-calls mostly) ensures that the resulting detections are within or better than the 3% false alarm expected probability.

In the same way, we adapted the *Z-detector* to automatically detect the M-calls. A visual exploration of the dataset using long-term spectrograms and close-up inspections showed that M-call frequency differs among the three DEFLOHYDRO sites. Thus, the parameter U was set to 21.50 ± 0.25 Hz for MAD, 22.45 ± 0.25 Hz for NEAMS, and 22.25 ± 0.25 Hz for SWAMS. As for the P-calls, checking the frequency of the detected events helped with removing false detections (about 40%).

4. Call occurrence

a. Variations between sites and years. To enable the comparison of the total number of detected calls among years and sites, and because some years of recording are incomplete, the number of detections is normalized by the number of recording days in a given year. This estimation is made with a Generalized Linear Mixed Model (GLMM) to avoid biases due to seasonal patterns of occurrence (and thus to non-constant numbers of calls per day). This GLMM here assumes a negative binomial distribution, which is suitable for overdispersed data count, using month and year as random effects.²⁷

b. Seasonality. The numbers of M-calls detected in the DEFLOHYDRO dataset are summarized by month to provide information of their seasonal occurrence during 2007. Because of the 2-year gap between the DEFLOHYDRO and OHASISBIO experiment, the seasonality of P-calls is independently analyzed for the two datasets. For the DEFLOHYDRO database, the monthly number of detections is calculated for each site. For the six continuous years of recordings of

OHASISBIO, to test whether seasonality varies from year to year at a given site, monthly distributions of detections are normalized by the total number of detected P-calls each year. This normalization makes the observation independent from variations in the absolute detection numbers among years and emphasizes their seasonality. The stability of this seasonality throughout consecutive years is then statistically tested, using Friedman comparison tests,²⁸ because of the non-normal distribution of the data. Where significant differences between distributions are found, additional Wilcoxon pairwise comparison tests with Bonferroni correction are used.^{29,30} Statistical analyses were performed using R,³¹ and GLMM was run using STAN called from R with the package RStanArm.³²

III. RESULTS

A. Signal characteristics

All signal characteristics—duration, frequency, ICI—are summarized in Table II and Figs. 5 and 6. Duration parameters and their statistics are based on a subsample of calls of good quality (high SNR) and from different years and sites to have a meaningful sample size. Since M-call frequencies differ among sites, as observed on long-term spectrograms (see also Fig. 12 in Appendix A), mean values are estimated per site (Table II). However, since the frequency of P-calls do not vary among sites, as illustrated by long-term spectrograms for a given month or year [e.g., Fig. 1(b); see also Fig. 13 in Appendix A], the P-call frequency for a given time window is averaged over all sites.

B. Call occurrence

1. Variations between sites and years

In 2007, M-calls are found at the three sites of the DEFLOHYDRO array, but are totally absent in the data recorded since 2010 with the OHASISBIO array. NEAMS is the site with the largest number of detected M-calls, with 12 588 calls detected throughout the year (about 35.5 calls per day), whereas only 1610 M-calls are detected at SWAMS (about 4.4 calls per day), and twice less, 809 M-calls at MAD site (about 2.2 calls per day).

In 2007, only a few P-calls are detected at NEAMS, and none at the two other sites (MAD and SWAMS). Since 2010, P-calls are recorded at every site of the OHASISBIO array, except at RAMA and WKER, and every available year of data. In total, 11 213 P-calls are detected over the 7 yrs of recordings at MAD (2007, 2010 to 2015), 49 300 P-calls are detected across 5 yrs at NEAMS (2007, 2010 to 2013), 11 491 P-calls over 6 yrs at SWAMS (2007, 2010, 2012 to 2015), 15 786 P-calls across 4 yrs at NCRO (2011, 2012, 2014, and 2015), and 2621 in 2014 at SSEIR. Figure 7 shows the distribution of the estimated number of P-calls per days for each available year of data at each site. This metric allows comparisons among years and sites when some years of data are incomplete. Every year, the greatest number of P-calls is detected at NEAMS. The number of P-calls increases drastically between 2007 and 2010 (more than a 400% increase at NEAMS), but moderately since then, except in 2011 (increase of 11% at NEAMS between 2010 and 2015). NCRO displays

TABLE II. Call characteristics. Duration parameters are manually measured on “good quality” calls from different years and sites (N = number of measured calls and ICI). Frequency is automatically measured at the peak amplitude of all detected calls.

	M-call	P-call
Call duration (mean \pm s.e.)	10.56 \pm 0.09 s $N = 611$	10.8 \pm 0.06 s $N = 2020$
ICI duration (median, [range])	149 s, [64–500 s] [Fig. 5(a)] $N = 576$	159 s, [100–500 s] [Fig. 5(b)] $N = 1905$
Call frequency (mean \pm s.e.)	21.74 \pm 0.003 Hz at MAD 22.15 \pm 0.005 Hz at SWAMS 22.36 \pm 0.002 Hz at NEAMS	Long-term decrease of 1 Hz over 8 years, from 27.30 Hz in 2007 to 26.25 Hz in 2015 (Fig. 6)

numerous P-calls with a regular increase over time, except in 2012 where the number decreases abruptly. MAD, SSEIR, and SWAMS have the lowest rates of P-calls, with less than 25 P-calls per day. These numbers slightly increase over the years at MAD and SSEIR, but slightly decrease at SWAMS.

2. Seasonal pattern

M-calls are present year-round at all DEFLOHYDRO sites [Fig. 8(a)]. At NEAMS, where they are the most numerous, they occur mainly in autumn, with a high peak in April and a weaker peak in June. At SWAMS they mainly occur during summer and autumn, and are almost absent from June to December. At MAD, where they are the least numerous, the majority of detections occurs in August, with relatively few calls during the other months.

Detected only at the NEAMS site in 2007, P-calls are present from June to December, with a peak in June [Fig. 8(b)]. However, this June detection peak is very small (about 1700 calls) relative to P-call peaks occurring post-2010, consistently higher than 4000 calls. The results for each year and each OHASISBIO site are presented in Appendix B (Fig. 14).

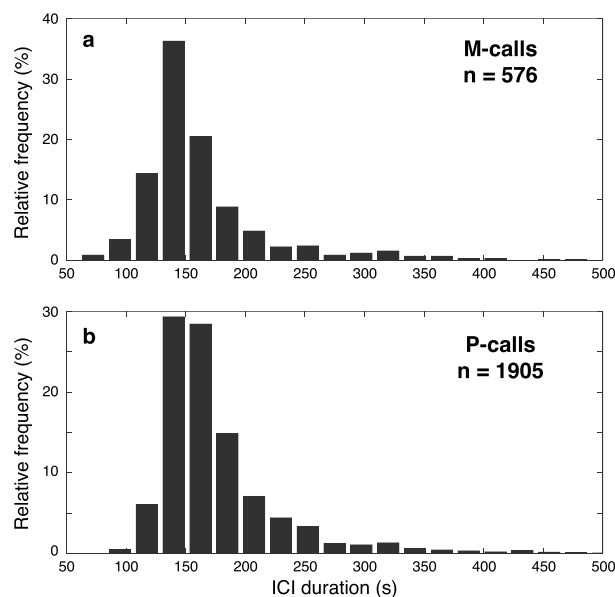


FIG. 5. Relative frequency of ICI duration for M-calls (a) and P-calls (b), n is the number of sampled ICI. (Bin size = 22.5 s.)

Statistical comparisons show no significant difference among the normalized monthly distributions of P-calls between years for MAD, NEAMS, NCRO, and SWAMS sites (Friedman tests, respectively, for MAD, NEAMS, NCRO, and SWAMS, *Friedman chi-squared* = 2.9; 0.2; 7; 0.4; all p -values $>$ 0.05). For SSEIR site, a Wilcoxon test for paired data (V) shows no significant difference between the 2 years of data (Wilcoxon paired test, $V = 31$, $p = 0.89$). This implies that the observed seasonality is stable among years and can be derived by averaging the normalized monthly distributions over the available years for these sites (Fig. 9). At sites where P-calls are detected, they are present throughout the year, but with marked seasonal patterns that differ between sites. For the westernmost sites, MAD and NCRO, P-calls are mainly present from the beginning of austral winter to the end of spring (from June to November). At the easternmost sites, NEAMS and SWAMS, P-calls are mainly present from the middle of austral summer to the end of autumn (from February to July for NEAMS and from January to May for NCRO). Call numbers drop during winter, and increase in spring, although the levels are lower in spring than in autumn. At SSEIR, in the middle of the network, there is no obvious seasonal pattern, but only 2 years of data are available for this site. The P-call seasonal patterns appear to vary with longitude.

IV. DISCUSSION

The new acoustic signals described in this study meet the criteria given by Stafford *et al.*¹⁴ and Sousa and Harris¹² to identify potential biological sounds: they are produced in non-random patterns, show clear seasonal patterns of emission, are non-continuous and narrowband, contain modulation in amplitude, and have frequencies higher than 10 Hz. This combined evidence provides confidence about the biological origin of M- and P-calls. Furthermore, they are similar to baleen whale vocalizations, and, given their low frequency range, are very likely produced by large whales.

A. P-calls are not incomplete Z-calls

P-calls tonal units, with a frequency of about 26–27 Hz and a duration of about 10 s, closely resemble to units A of Z-calls, and thus can be easily mistaken for incomplete Antarctic blue whale Z-calls. However, our analysis shows that P-call characteristics are clearly different from those of Z-call units A (Fig. 10). The first evidence is their higher frequency (Figs. 1 and 6). Long-term spectrograms clearly

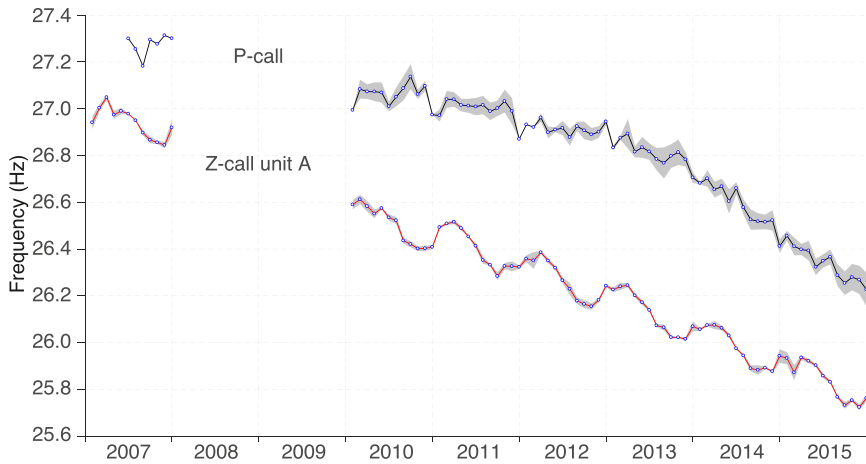


FIG. 6. (Color online) Top curve shows the P-call frequency averaged per month for each year of data. Bottom curve shows the frequency of Z-call units A found in the same data set [based on Leroy *et al.* (Ref. 8)]. Gray areas are s.e.

show two closely-spaced but distinct high-energy frequency bands near 26–27 Hz, the upper one corresponding to P-calls, and the lower one to units A of Z-calls (Fig. 1). On average, the P-call frequency is 0.6 ± 0.02 Hz (mean \pm s.e.) higher than the Z-call units A (Fig. 6). This difference is meaningful despite all the intra- and inter-annual variations observed for the P-calls and Z-call units A. The latter have been analyzed in the same way and in the same data set as the P-calls (unpublished data based in Ref. 8). Furthermore, these intra- and inter-annual variations differ significantly between the two types of calls, suggesting that they are produced by distinct whale species. Although the reason for this long-term frequency decrease is still uncertain,^{25,26,33} P- and Z-call unit A frequencies follow different trends, with a steeper slope (i.e., faster decrease) since 2013 for P-calls.

A second evidence of the difference between P-calls and incomplete Z-calls is the longer ICI between P-calls (Fig. 10). The P-call ICI is of about 160 s, more than twice the duration of the Z-call ICI, lasting between 50 and 60 s.^{6,34,35}

Finally, the third evidence, although indirect, is the differences in the geographic and seasonal patterns of P- and Z-calls (see Fig. 6 in Ref. 8). No P-calls are detected at WKER, but they are detected at all the other sites, from late summer to late autumn at the easternmost sites (NEAMS and SWAMS), and during winter and spring at the westernmost sites (MAD and NCRO). Since the noise level over the years and sites is fairly constant,⁸ these observations are likely not an artifact of the ambient noise level, which can impact the call detection range.³⁶ This distribution pattern would thus point to a yearly east-west migration of the source of P-calls, in contrast with

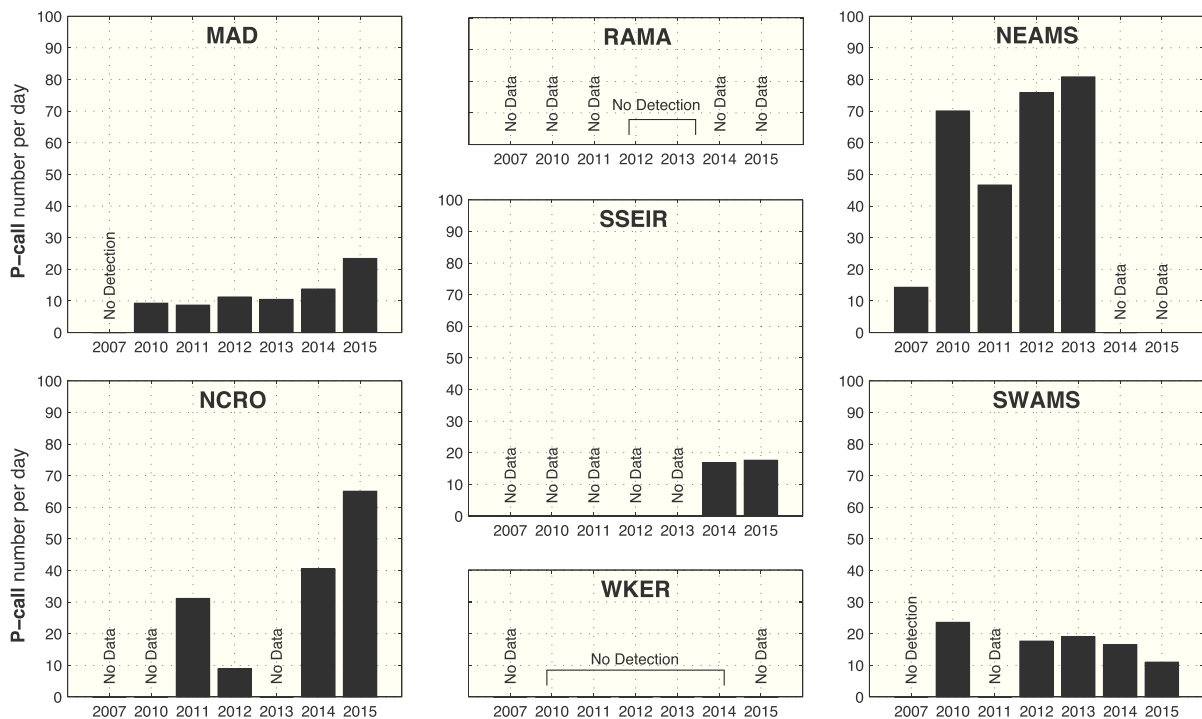


FIG. 7. Averaged and normalized number of P-calls per day for each year at each site as estimated by a GLMM.

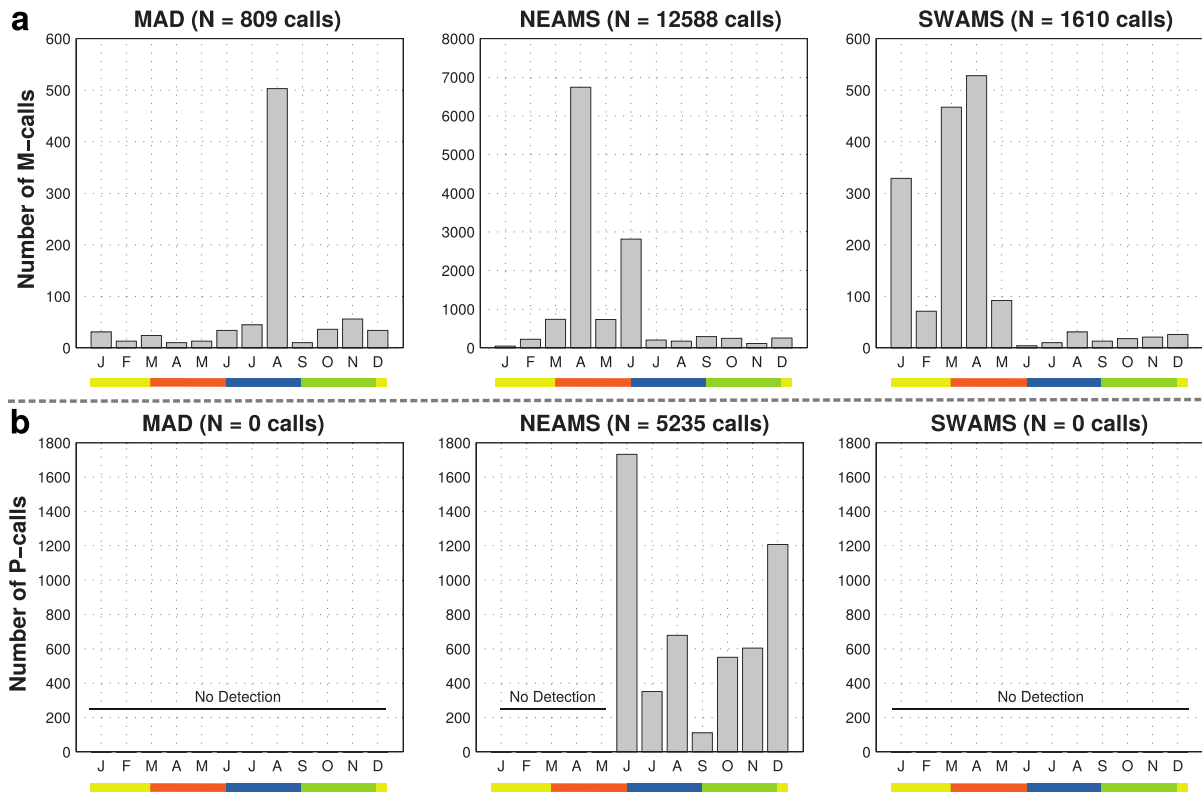


FIG. 8. (Color online) Number of M-calls (a) and P-calls (b) per month at each DEFLOHYDRO site in 2007. Note that the vertical scale differs among sites. Horizontal bars outline the seasons (from left to right: summer, autumn, winter, spring, summer).

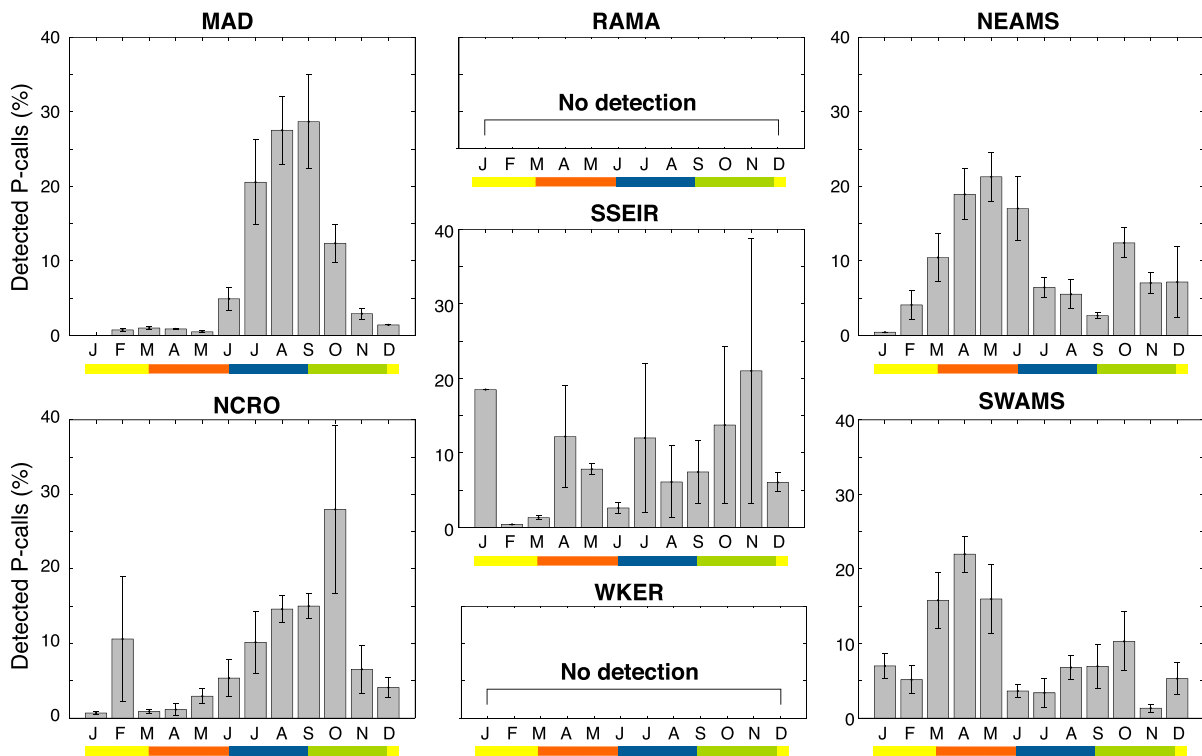


FIG. 9. (Color online) Normalized number of P-calls detected per month averaged over the available years of data for each site. Horizontal bars outline the seasons (from left to right: summer, autumn, winter, spring, summer).

the north–south migration observed for Antarctic blue whales.^{7,8,37} To explain these differences, it can be argued that the P-call is another vocalization of Antarctic blue whales, with a different purpose at different periods of the year. The observed mismatches between the periods and places of occurrence of P- and Z-calls, and the absence of P-calls at the WKER site tend, on the contrary, to suggest that P- and Z-calls are not emitted by the same whale species.

Due to their apparent similarity, P-calls may have been misinterpreted as incomplete Z-calls in previous studies. For instance, Tripovich *et al.*³⁸ explain that “single-part calls from Antarctic blue whale” are predominantly present in their recordings, which they illustrate (Fig. 1 of Ref. 38) by a series of single tonal units with a long ICI (about 150 s), more typical of P-calls than of Z-calls. The different seasonality between P- and Z-calls may then introduce an important bias if P- and Z-calls are mixed up.

B. M- and P-calls could be blue whale calls

Following the reasoning of Sousa and Harris,¹² among the six baleen whale species known to dwell in the Indian Ocean [i.e., Bryde’s whales (*Balaenoptera edeni*), humpback whales (*Megaptera novaeangliae*), minke whales, sei whales (*B. borealis*), fin whales and blue whales], our new calls are closer to blue whale vocalizations. Indeed, M- and P-calls are too long in duration and/or too low in frequency to be either minke, sei, or Bryde’s whale vocalizations.^{12,39–41} Humpback whales are known for their complex songs, composed of several different units with frequencies often greater than 500 Hz.⁴² This species also emit non-song vocalizations, described as social sounds, but these sounds are generally higher in frequency and shorter in duration (less than 1 s).^{43,44} The simple tonal unit of M- and P-calls is far from such complexity. Finally fin whales mainly emit low-frequency stereotyped vocalizations, near 20 Hz, known as the “20 Hz-pulses” due to their very short duration (less than 1.5 s^{22,45}), while M- and P-calls last about 10 s, which makes them more similar to the highly stereotyped, long duration and low frequency blue whale calls.⁴⁶ In addition, the reasons for the frequency decline observed worldwide

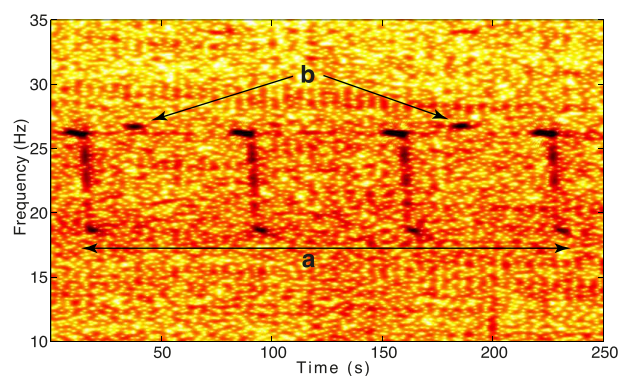


FIG. 10. (Color online) Spectrogram of four consecutive Z-calls (a) and two consecutive P-calls (b) recorded at NEAMS in April 2013. Spectrogram parameters: Hamming window, 4096 point FFT length, 98% overlap.

for blue whale calls, although uncertain,^{25,26,33,47} are also impacting the P-call source (Fig. 6).

Two subspecies of blue whales are found in the southern Indian Ocean, the Antarctic, and pygmy blue whales.^{7,19,20} We already presumed that P-calls and also probably M-calls are most likely not produced by Antarctic blue whales. The M- and P-calls mainly occur in subtropical waters, based on the absence of P-calls at RAMA (4° S) and at WKER (46° S), at least since 2010 (neither site was instrumented in 2007). The sources of these vocalizations seem thus to occur from 26° S (MAD) to 42° S (SWAMS) in latitude, and at least from 58° E (MAD) to 83° E (NEAMS) in longitude for M-calls (no recordings are available at NCRO in 2007) and from 53° E (NCRO) to 83° E (NEAMS) for P-calls. Moreover, as hinted in Sec. IV A, P-calls seem to have been recorded off Portland, Australia,³⁸ which would extend their occurrence to the eastern Indian Ocean (141° E).

The subtropical distribution of M- and P-calls, and particularly their absence south of 43° S, is similar to that of pygmy blue whales. The latter are generally found in northerly waters of the Indian Ocean (north of 55° S), and do not migrate to higher latitudes.^{7,19,48–50} Three acoustically-distinct populations of pygmy blue whales are known in our study area: the northern Indian Ocean population, referred to as the Sri Lanka type and sometimes considered as a separate subspecies, *B. m. indica*;^{50,51} the sub-Antarctic and southwestern Indian Ocean population, referred to as the Madagascar type; and the population in the Indonesian and Australian regions, known as the Australia type.^{7,19,20} However, the seasonal patterns of M- and P-calls differ from that known for these pygmy blue whale populations. As previously mentioned, P-calls seems to follow a yearly east–west migration. The same hypothesis can be proposed for M-calls, which are mainly detected in late summer to late autumn at NEAMS and SWAMS (located west of the network), and during winter further east, at MAD. Samaran *et al.*⁷ reported Sri Lankan pygmy blue whales mainly at NEAMS, during summer. None were recorded at MAD, or near Crozet Islands. Madagascar-type calls are recorded mostly near Crozet Islands during summer and early autumn. None are detected at NEAMS. Finally, Australian pygmy blue whale calls are recorded mostly at SWAMS during summer and early autumn, and during winter at NEAMS. None are found at MAD or near Crozet Islands. None of these pygmy blue whale geographic and seasonal distributions matches the M- and P-call distributions, which are thus probably unrelated to these populations. Still they share the same mid-latitude area as the two blue whale subspecies,¹⁹ but follow different migration patterns.

C. Do M- and P-calls originate from the same source?

A surprising observation about the new calls is the absence of detectable M-calls since 2010, as if its source had vanished between 2008 and 2010. Meanwhile, the presence of P-calls increases between 2007 and 2010: only present at NEAMS site in 2007 and in small numbers (less than 14 calls per day), since 2010 they have spread to 5 of the 7

instrumented sites, with a fivefold increase in detection numbers (more than 72 calls per day at NEAMS).

A first possibility is that M- and P-calls are emitted by two distinct sources. M-call sources would have been present in the area covered by the DEFLOHYDRO array, and, under the basic assumption that call numbers are a proxy for the number of individuals,⁷ preferentially near NEAMS where the largest number of M-calls are detected. Then between 2008 and 2010, M-call sources would have moved away from this area, perhaps in response to some environmental changes. In favor of such a scenario, we note that signals similar to M-calls have been recorded between 2012 and 2013 off Namibia (21°S, 6°E).⁵² At the same time, P-call sources, which were only present near NEAMS, and in small number given the small quantity of detections, would have increased in number and spread more widely.

An alternative hypothesis is that M- and P-calls are emitted by the same whale species, and that their call evolved between 2007 and 2010, with a shift in frequency from 22 to 27 Hz. The similarities in their characteristics argue in favor of such hypothesis. Both last about 10 s and have ICIs centered on 150–160 s. The reason for such frequency shift could be a level increase of the chorus where M-calls occur. The 22 Hz tonal call falls in the 18 to 28 Hz frequency-band dominated by Antarctic blue whale Z-calls and fin whale 20 Hz-pulses. A loud and continuous chorus will diminish the detection range of any signal emitted in this bandwidth, and thus the range over which individuals can communicate.^{36,53} Despite large uncertainties, populations of Antarctic blue and fin whales seem to be increasing since the end of whaling, at a rate of 8.3% per year for Antarctic blue whales.⁴⁹ Population recovery, even if slow, may increase the number of calling individuals, and thus the chorus power. Switching frequency could then be an appropriate strategy to stand out from this increasingly noisy frequency band, as it has been suggested for right whales (*Eubalaena glacialis*),⁵³ belugas (*Delphinapterus leucas*),⁵⁴ and common dolphins (*Delphinus delphis*).⁵⁵ To test this idea, we measured the chorus power in the 18–28 Hz frequency band for 2007 and 2010 and for MAD, NEAMS, and SWAMS, which are common to both networks. The chorus power increases between 2007 and 2010 for SWAMS (88.4 ± 0.14 dB/Hz in 2007 vs 90.7 ± 0.19 dB/Hz in 2010), but decreases at MAD (87.00 ± 0.16 dB/Hz in 2007 vs 85.5 ± 0.15 dB/Hz in 2010) and NEAMS (87.6 ± 0.12 dB/Hz in 2007 vs 86.19 ± 0.16 dB/Hz in 2010). So the power evolution of the Antarctic blue whale chorus is neither uniform nor significant between 2007 and 2010. Unless the increase occurred earlier than 2007, and the change in frequencies appeared progressively.

V. CONCLUSION

This paper describes two signals, M- and P-calls, not reported or fully documented elsewhere in the literature, based on the analysis of a comprehensive data set, spanning 7 yrs and 7 sites spread over a 9 000 000 km² area in the southern Indian Ocean. More than 15 000 M-calls and 90 000 P-calls have been extracted from this data set.

Both M- and P-calls have general characteristics of biologic sounds, which are furthermore close to but different from other blue whale calls. These low frequency tonal units (~22 and ~27 Hz, respectively) lasting 10 s with ICIs longer than 2 min provide clues for identifying their source(s) as large baleen whales, possibly blue whale species. The geographic and seasonal distributions of M- and P-calls are similar, but neither of them matches those of the other known blue whale species dwelling in the southern Indian Ocean.

The described P-call is clearly distinct from an incomplete Z-call (unit A) produced by Antarctic blue whales. Although they are both tonal units with 10 s duration, their frequency is different, with an average difference of 0.6 Hz, and their ICI is different (160 s 60 s, respectively). In addition, at least in the southern Indian Ocean, they display different spatial and seasonal distributions. Mistaking them may thus introduce significant biases if used to infer the seasonal presence of their sources.

The disappearance of M-calls from the data recorded since 2010 and the drastic increase in the number of P-calls between 2007 and 2010 is a puzzling coincidence. The probable M-call presence off Namibia in 2012–2013 argues for a possible migration of its source from the Indian to the Atlantic Ocean. Further analyses of acoustic data from 2007 to 2010 may help understanding this observation. Additional data from other locations would also be helpful to better assess the distribution of the M- and P-call sources.

Finally, this paper provides the basis (what to search for, where, and when) to organize an expedition combining visual and acoustic observations to fully identify the whales that produce these vocalizations.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank the Captains and crew of RV Marion Dufresne for the successful deployments and recoveries of the hydrophones of the OHASISBIO⁶¹ and DEFLOHYDRO⁶⁰ experiments. French cruises were funded by the French Polar Institute (IPEV), with additional support from INSU-CNRS. NOAA/PMEL also contributed to the DEFLOHYDRO project. E.C.L. was supported by a Ph.D. fellowship from the University of Brest and from the Regional Council of Brittany (Conseil Régional de Bretagne). The contribution of Mickael Beauverger at LGO to the logistics and deployment cruises is greatly appreciated. We thank Kate M. Stafford for her careful reading and encouraging comments.

APPENDIX A: METHODS

1. Site location and data availability for the DEFLOHYDRO and OHASISBIO networks

See Table III.

2. Data analysis

After the automatic detection of P-calls, using the *Z-detector*, we post-processed the detections to check for false positives (i.e., unwanted Z-calls). These false

TABLE III. Site location and data availability for the DEFLOHYDRO and OHASISBIO autonomous hydrophone networks. The character “-” indicates continuous records without intermediate data recovery, “x” indicates a lack of recordings.

Site	Geographic coordinates	DEFLOHYDRO						OHASISBIO							
		2007		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
		Start	End	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End
RAMA	03° 50' S, 080° 30' E	x	x	x	x	x	x	05/05/12	-	-	09/19/13	x	x	x	x
MAD	26° 05' S, 058° 08' E	10/30/06	01/05/08	12/20/09	02/19/11	02/19/11	03/09/12	03/10/12	03/09/13	03/09/13	02/16/14	02/16/14	01/18/15	02/08/15	01/28/16
NEAMS	31° 35' S, 083° 14' E	10/10/06	04/26/08	02/13/10	-	-	03/04/12	03/04/12	03/04/13	03/04/13	x	x	To be recovered	To be recovered	
SWAMS	42° 59' S, 074° 35' E	10/11/06	01/13/08	01/17/10	11/21/10	x	x	02/29/12	02/27/13	02/28/13	02/07/14	02/07/14	01/27/15	01/27/15	01/20/16
NCRO	41° 14' S, 052° 59' E	x	x	12/25/09	01/20/11	01/20/11	01/31/12	01/29/12	02/10/13	02/12/13	01/10/14	01/11/14	01/11/15	01/11/15	01/08/16
WKER	46° 38' S, 060° 07' E	x	x	12/28/09	01/24/11	01/25/11	02/03/12	02/04/12	02/14/13	02/15/13	01/15/14	01/15/14	01/01/15	To be recovered	
SSEIR	33° 30' S, 070° 52' E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	02/13/14	02/13/14	02/04/15	02/05/15	01/18/16

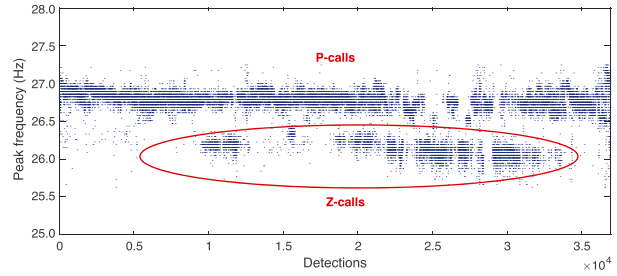


FIG. 11. (Color online) Peak frequency of each event detected at NEAMS site in 2013. The frequency gap between P-calls and Z-call units A is clearly visible.

positives were easily sorted out and removed, since their frequency is significantly and consistently different, as shown in Fig. 11.

The characteristic frequencies of the M- and P-calls are based on automatic measurements on each detected call (frequency of the peak amplitude). As shown in Fig. 12, M-call frequencies differ over 1 Hz among sites, thus, mean values are estimated per site (Table II). However, as shown in Fig. 13, the frequency of P-calls does not vary among sites within 0.5 Hz, thus the P-call frequency for a given time window is averaged over all sites. The P-call frequencies display a regular decline of about 1 Hz from 2007 to 2015 (Fig. 6; Table II).

APPENDIX B: COMPLEMENTARY RESULTS ON P-CALL OCCURRENCE PER SITE

See Fig. 14.

APPENDIX C: DIEL PATTERN

A. Methods

To analyze the diel pattern of both M- and P-calls, detections were sorted into four light regimes based on the altitude of the Sun: dawn, light, dusk, and night. Dawn hours start when the Sun is 12° below the horizon (i.e., morning nautical twilight) and end at sunrise; light hours are between sunrise and sunset; dusk is between sunset and the evening nautical twilight; and night hours are between dusk and dawn, when the altitude of the Sun is less than -12°. Daily hours of sunset, sunrise, and nautical twilights were obtained from the United States Naval Observatory Astronomical Applications Department Website (<http://aa.usno.navy.mil>)⁵⁹

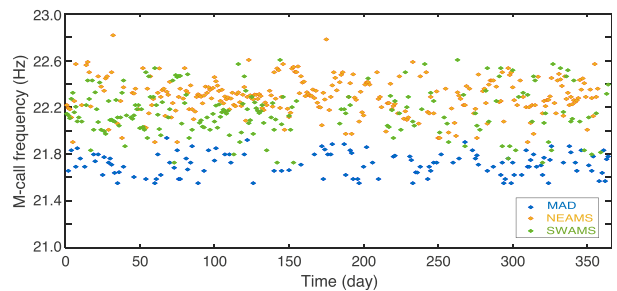


FIG. 12. (Color online) Daily average frequency of M-calls recorded in 2007 for each site.

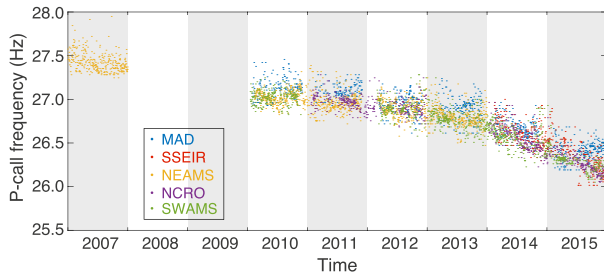


FIG. 13. (Color online) Daily average frequency of P-calls recorded from 2007 to 2015 for each site.

for each year and each site location. The daily number of calls in each light regime was calculated, and divided by the duration of the corresponding light period for a given day, to account for the differences of duration among the four light regimes and their seasonality. The resulting normalized detection rates (in detections/h), for each light regime and each day, were then adjusted by subtracting the mean number of detections per hour of the corresponding day.^{56,57} These adjusted means of calls per light period were finally averaged over the seasons of call presence depending on the site location, when these seasons displayed the same trend of variation per light regime. Seasons are defined by the dates of the solstices and equinoxes for each year. Because of the non-normal distribution of the adjusted means, Kruskal-Wallis (KW) tests⁵⁸ were applied to compare the light regimes for each site. In case of significant differences, Wilcoxon pairwise comparison tests Bonferroni corrections were used.

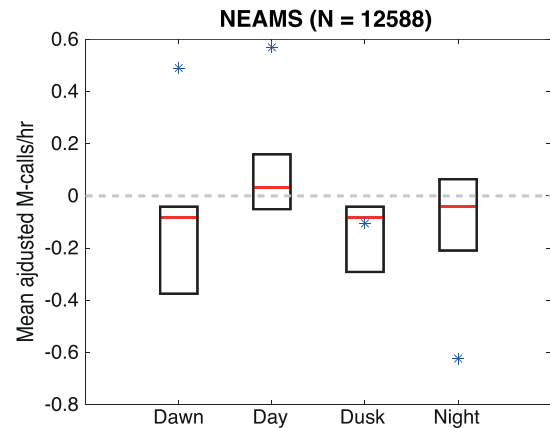


FIG. 15. (Color online) Boxplot of mean-adjusted number of M-calls per hour during four light regimes, averaged over the entire 2007 year at NEAMS. Lower and upper bounds of boxes represent lower and upper quartiles, respectively. Horizontal lines are median values and asterisks are mean values. Note that means (asterisks) differ from median due to outliers, not shown in the graphic for readability. N is the total number of detections during the seasons of presence.

B. Results

1. M-calls

Due to the low numbers of M-calls at MAD and SWAMS, the diel distribution is only meaningful for NEAMS. At this site, KW analysis of variance (ANOVA) rejects the null hypothesis that the call rate is the same for the four light regimes (KW = 87.5; $p < 0.001$). Wilcoxon pairwise comparison tests (W) indicate that significantly more M-calls are emitted during

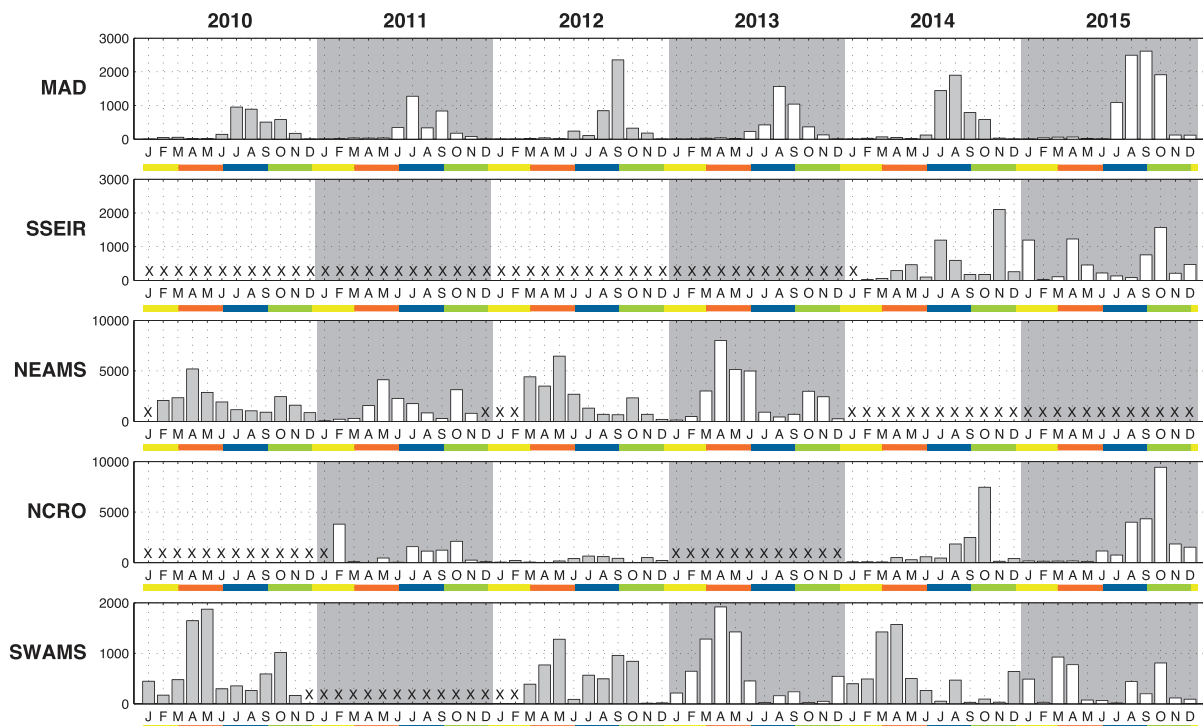


FIG. 14. (Color online) Number of P-calls per month at each OHASISBIO site from 2010 to 2015 (none are detected at site WKER). Note that the vertical scale differs depending on the site. "x" indicates that there is no available data. Horizontal bars outline the seasons (from left to right: summer, autumn, winter, spring, summer).

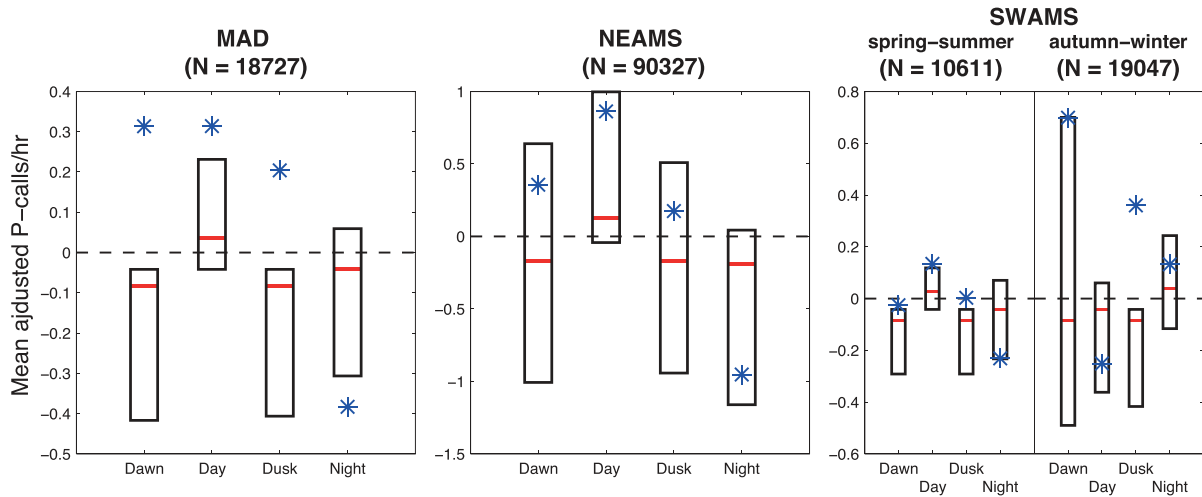


FIG. 16. (Color online) Boxplot of mean-adjusted number of P-calls per hour during four light regimes, averaged over the available years of the OHASISBIO-data, over winter and spring for MAD and the entire year for NEAMS. For SWAMS, the diel pattern is averaged over spring-summer on the left and over autumn-winter on the right. Lower and upper bounds of boxes represent lower and upper quartiles, respectively. Horizontal lines are median values and asterisks are mean values. Note that means (asterisks) differ from median due to outliers, not shown in the graphs for readability. N is the total number of detections during the seasons of presence.

daytime than during nighttime, and during dusk and dawn (Wilcoxon comparison test between day and, respectively, night, dusk, and dawn: $W = 23\,826; 8,369; 20\,661$, all $p < 0.00017$). Dawn and dusk are not significantly different ($W = 3176$; $p > 0.0083$), and none of them differs significantly from night (respectively, for dawn/night and dusk/night comparison: $W = 9072$ and 9351 ; $p > 0.0083$) (Fig. 15).

2. P-calls

Due to the limited number of P-calls in 2007, we excluded this year from our analysis. From 2010 onwards, the diel distribution is examined over the entire year for SSEIR, NEAMS, and SWAMS, and over winter and spring at MAD and NCRO, which are the two seasons of highest P-call presence. At MAD and NEAMS sites (Fig. 16),

TABLE IV. Wilcoxon pairwise comparison test results for diel patterns of P-calls detected at MAD, NEAMS, and SWAMS in the data from 2010 to 2015. W is the value of the test, p the probability to wrongly reject the null hypothesis. The test significance is indicated by *** if $p < 0.0002$, ** if $p < 0.0017$, * $p < 0.0083$, and NS if the test is non-significant, i.e. if $p > 0.0083$.

	Wilcoxon pairwise comparison test between	W	p	Significance
MAD	Dawn/Day	56 280	2.9×10^{-13}	***
	Dawn/Dusk	20 786	0.2505	NS
	Dawn/Night	66 920	0.5928	NS
	Day/Dusk	119 460	3.3×10^{-16}	***
	Day/Night	163 520	8.1×10^{-14}	***
	Dusk/Night	59 799	0.0297	NS
NEAMS	Dawn/Day	216 310	$< 2.2 \times 10^{-16}$	***
	Dawn/Dusk	135 340	0.2318	NS
	Dawn/Night	279 950	0.0055	*
	Day/Dusk	406 570	$< 2.2 \times 10^{-16}$	***
	Day/Night	532 870	$< 2.2 \times 10^{-16}$	***
	Dusk/Night	285 730	0.0002	***
SWAMS Spring-Summer	Dawn/Day	33 095	2.895×10^{-12}	***
	Dawn/Dusk	9231	0.9349	NS
	Dawn/Night	27 765	0.9067	NS
	Day/Dusk	72 712	2.2×10^{-14}	***
	Day/Night	87 457	8.7×10^{-9}	***
	Dusk/Night	23 320	0.0906	NS
SWAMS Autumn-Winter	Dawn/Day	53 509	0.0122	NS
	Dawn/Dusk	23 146	0.0778	NS
	Dawn/Night	55 439	0.0853	NS
	Day/Dusk	47 786	0.5162	NS
	Day/Night	56 436	1.1×10^{-6}	***
	Dusk/Night	42 698	3.9×10^{-6}	***

the detection rates per light regime vary similarly for the different seasons; they are thus averaged over these seasons. The null hypothesis that the call rate is the same for the four light regimes was rejected by KW ANOVAs (respectively, for MAD and NEAMS, $KW = 224.3$ and 462.3 ; both with $p < 0.001$). Wilcoxon pairwise comparison tests (W) show that day and night periods are significantly different from one another, with more P-calls emitted in daytime than in nighttime (Wilcoxon test results are presented in Table IV). Dusk and dawn are not significantly different from each other, or from night, but significantly differ from day, with higher call rates during the day (Fig. 16).

At SWAMS site, call rates vary with the season, but are similar in spring and summer, and in autumn and winter. Call rates per light regimes are thus averaged over each pair of seasons. KW ANOVA rejects the null hypothesis that the call rate is the same for the four light regimes for both groups of seasons (respectively, for spring-summer and autumn-winter, $KW = 182.6$ and 73.1 ; $p < 0.001$). Wilcoxon pairwise comparison tests show that in spring and summer, day and night call rates differ significantly, with more calls emitted during daytime. Conversely, during autumn and winter, significantly more calls are emitted during nighttime. Dawn and dusk are not significantly different from each other for either cases, and there is no general trend between these regimes and night or day. All statistical tests are presented in Table IV.

For SSEIR and NCRO, no general trend is found in the diel pattern. Variations occur between years and/or between seasons, which prevents any averaging. For conciseness, the statistical results are not presented here.

- ¹W. W. L. Au and M. C. Hastings, *Principles of Marine Bioacoustics* (Springer, New York, 2008), pp. 439–442.
- ²W. C. Cummings and P. O. Thompson, “Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*,” *J. Acoust. Soc. Am.* **50**, 1193–1198 (1971).
- ³D. K. Ljungblad, C. W. Clark, and H. Shimada, “Sc/49/sh17 a comparison of sounds attributed to pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus breviceauda*) recorded south of the Madagascar Plateau and those attributed to ‘true’ blue whales (*Balaenoptera musculus*) recorded off Antarctica,” *Rep. Int. Whaling Comm.* **48**, 439–442 (1998).
- ⁴D. K. Mellinger, K. M. Stafford, S. E. Moore, R. P. Dziak, and H. Matsumoto, “Fixed passive acoustic observation methods for cetaceans,” *Oceanography* **20**, 36–45 (2007).
- ⁵F. Samaran, O. Adam, and C. Guinet, “Discovery of a mid-latitude sympatric area for two Southern Hemisphere blue whale subspecies,” *Endanger. Species Res.* **12**, 157–165 (2010).
- ⁶K. M. Stafford, D. R. Bohnenstiehl, M. Tolstoy, E. Chapp, D. K. Mellinger, and S. E. Moore, “Antarctic-type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans,” *Deep Sea Res. Part I* **51**, 1337–1346 (2004).
- ⁷F. Samaran, K. M. Stafford, T. A. Branch, J. Gedamke, J.-Y. Royer, R. P. Dziak, and C. Guinet, “Seasonal and geographic variation of southern blue whale subspecies in the Indian Ocean,” *PLoS One* **8**, e71561 (2013).
- ⁸E. 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**, e0163587 (2016).
- ⁹G. M. Wenz, “Curious noises and the sonic environment in the ocean,” *Mar. Bioacoust.* **1**, 101–119 (1964).
- ¹⁰W. A. Watkins, J. E. George, M. A. Daher, K. Mullin, D. L. Martin, S. H. Haga, and N. A. DiMarzio, “Whale call data for the North Pacific: November 1995 through July 1999 occurrence of calling whales and source locations from SOSUS and other acoustic systems,” *Tech. Rep.* (Woods Hole Oceanographic Institution, 2000).
- ¹¹W. A. Watkins, M. A. Daher, J. E. George, and D. Rodriguez, “Twelve years of tracking 52-Hz whale calls from a unique source in the North Pacific,” *Deep Sea Res. Part I* **51**, 1889–1901 (2004).
- ¹²A. G. Sousa and D. Harris, “Description and seasonal detection of two potential whale calls recorded in the Indian Ocean,” *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, 1379–1388 (2015).
- ¹³D. C. Brodie and R. A. Dunn, “Low frequency baleen whale calls detected on ocean-bottom seismometers in the Lau basin, southwest Pacific Ocean,” *J. Acoust. Soc. Am.* **137**, 53–62 (2015).
- ¹⁴K. M. Stafford, S. L. Nieuwkirk, and C. G. Fox, “Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical Pacific,” *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 3687–3698 (1999).
- ¹⁵K. M. Stafford, D. K. Mellinger, S. E. Moore, and C. G. Fox, “Seasonal variability and detection range modeling of baleen whale calls in the Gulf of Alaska, 1999–2002,” *J. Acoust. Soc. Am.* **122**, 3378–3390 (2007).
- ¹⁶S. Rankin and J. Barlow, “Source of the North Pacific ‘boing’ sound attributed to minke whales,” *J. Acoust. Soc. Am.* **118**, 3346–3351 (2005).
- ¹⁷J.-Y. Royer, R. Chateau, R. P. Dziak, and D. R. Bohnenstiehl, “Seafloor seismicity, Antarctic ice-sounds, cetacean vocalizations and long-term ambient sound in the Indian Ocean basin,” *Geophys. J. Int.* **202**, 748–762 (2015).
- ¹⁸E. Tsang-Hin-Sun, J.-Y. Royer, and E. C. Leroy, “Low-frequency sound level in the southern Indian Ocean,” *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, 3439–3446 (2015).
- ¹⁹F. 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.* **127**, 3800–3808 (2010).
- ²⁰K. M. Stafford, E. Chapp, D. R. Bohnenstiehl, and M. Tolstoy, “Seasonal detection of three types of ‘pygmy’ blue whale calls in the Indian Ocean,” *Mar. Mammal Sci.* **27**, 828–840 (2011).
- ²¹A. N. Gavrilov and R. D. McCauley, “Acoustic detection and long-term monitoring of pygmy blue whales over the continental slope in southwest Australia,” *J. Acoust. Soc. Am.* **134**, 2505–2513 (2013).
- ²²A. Širović, J. A. Hildebrand, S. M. Wiggins, and D. Thiele, “Blue and fin whale acoustic presence around Antarctica during 2003 and 2004,” *Mar. Mammal Sci.* **25**, 125–136 (2009).
- ²³J.-F. D’Eu, J.-Y. Royer, and J. Perrot, “Long-term autonomous hydrophones for large-scale hydroacoustic monitoring of the oceans,” in *OCEANS, 2012-Yeosu* (IEEE, New York, 2012), pp. 1–6.
- ²⁴F.-X. Socheleau, E. C. Leroy, A. C. Pecci, F. Samaran, J. Bonnel, and J.-Y. Royer, “Automated detection of Antarctic blue whale calls,” *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, 3105–3117 (2015).
- ²⁵A. 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**, 4476–4480 (2012).
- ²⁶B. S. Miller, R. Leaper, S. Calderan, and J. Gedamke, “Red shift, blue shift: Investigating Doppler shifts, blubber thickness, and migration as explanations of seasonal variation in the tonality of Antarctic blue whale song,” *PLoS One* **9**, e107740 (2014).
- ²⁷B. M. Bolker, M. E. Brooks, C. J. Clark, S. W. Geange, J. R. Poulsen, M. H. Stevens, and J.-S. S. White, “Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution,” *Trends Ecol. Evol.* **24**, 127–135 (2009).
- ²⁸M. Friedman, “The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance,” *J. Am. Stat. Assoc.* **32**, 675–701 (1937).
- ²⁹F. Wilcoxon, “Individual comparisons by ranking methods,” *Biometrics Bull.* **1**, 80–83 (1945).
- ³⁰C. E. Bonferroni, *Il calcolo delle assicurazioni su gruppi di teste (Calculation of Insurance on Groups of Heads)* (Tipografia del Senato, 1935).
- ³¹R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing (www.R-project.org), R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (2016).
- ³²Stan Development Team, RStanArm: Bayesian applied regression modeling via Stan (<http://mc-stan.org>) (2016).
- ³³M. A. McDonald, J. A. Hildebrand, and S. Mesnick, “Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs,” *Endanger. Species Res.* **9**, 13–21 (2009).
- ³⁴S. Rankin, D. Ljungblad, C. Clark, and H. Kato, “Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 iwc/sower circumpolar cruises, Area v, Antarctica,” *J. Cetacean Res. Manage.* **7**, 13–20 (2005).

- ³⁵A. Širović, J. A. Hildebrand, S. M. Wiggins, M. A. McDonald, S. E. Moore, and D. Thiele, "Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the western Antarctic Peninsula," *Deep Sea Res. Part II* **51**, 2327–2344 (2004).
- ³⁶J. L. Miksis-Olds, J. A. Vernon, and K. D. Heaney, "The impact of ocean sound dynamics on estimates of signal detection range," *Aquatic Mammals* **41**, 444–454 (2015).
- ³⁷N. A. Mackintosh, "The distribution of southern blue and fin whales," in *Whales, Dolphins, and Porpoises*, edited by K. S. Norris (University of California Press, Berkeley, 1966), pp. 125–144.
- ³⁸J. S. Tripovich, H. Klinck, S. L. Nieuwkerk, T. Adams, D. K. Mellinger, N. E. Balcazar, K. Klinck, E. J. S. Hall, and T. L. Rogers, "Temporal segregation of the Australian and Antarctic blue whale call types (*Balaenoptera musculus* spp.)," *J. Mammalogy* **96**, 603–610 (2015).
- ³⁹E. M. Oleson, J. Barlow, J. Gordon, S. Rankin, and J. A. Hildebrand, "Low frequency calls of Bryde's whales," *Mar. Mammal Sci.* **19**, 407–419 (2003).
- ⁴⁰M. F. Baumgartner, S. M. Van Parijs, F. W. Wenzel, C. J. Tremblay, H. C. Esch, and A. M. Warde, "Low frequency vocalizations attributed to sei whales (*Balaenoptera borealis*)," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, 1339–1349 (2008).
- ⁴¹S. Rankin, T. F. Norris, M. A. Smultea, C. Oedekoven, A. M. Zoidis, E. Silva, and J. Rivers, "A visual sighting and acoustic detections of minke whales, *Balaenoptera acutorostrata* (cetacea: Balaenopteridae), in near-shore Hawaiian waters," *Pacific Sci.* **61**, 395–398 (2007).
- ⁴²R. S. Payne and S. McVay, "Songs of humpback whales," *Science* **173**, 585–597 (1971).
- ⁴³R. A. Dunlop, D. H. Cato, and M. J. Noad, "Non-song acoustic communication in migrating humpback whales (*Megaptera novaeangliae*)," *Mar. Mammal Sci.* **24**, 613–629 (2008).
- ⁴⁴A. K. Stimpert, W. W. L. Au, S. E. Parks, T. Hurst, and D. N. Wiley, "Common humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) sound types for passive acoustic monitoring," *J. Acoust. Soc. Am.* **129**, 476–482 (2011).
- ⁴⁵W. A. Watkins, P. Tyack, K. E. Moore, and J. E. Bird, "The 20-Hz signals of finback whales (*Balaenoptera physalus*)," *J. Acoust. Soc. Am.* **82**, 1901–1912 (1987).
- ⁴⁶M. A. McDonald, S. L. Mesnick, and J. A. Hildebrand, "Biogeographic characterization of blue whale song worldwide: Using song to identify populations," *J. Cetacean Res. Manage.* **8**, 55–65 (2006).
- ⁴⁷A. N. Gavrilov, R. D. McCauley, C. Salgado-Kent, J. S. Tripovich, and C. Burton, "Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time," *J. Acoust. Soc. Am.* **130**, 3651–3660 (2011).
- ⁴⁸H. Kato, T. Miyashita, and H. Shimada, "Segregation of the two subspecies of the blue whale in the southern hemisphere," *Rep. Int. Whaling Comm.* **45**, 273–283 (1995).
- ⁴⁹T. A. Branch, "Abundance of Antarctic blue whales south of 60 S from three complete circumpolar sets of surveys," *J. Cetacean Res. Manage.* **9**, 253–262 (2007).
- ⁵⁰T. A. Branch, K. M. Stafford, D. M. Palacios, C. Allison, J. L. Bannister, C. L. K. Burton, E. Cabrera, C. A. Carlson, B. Galletti Vernazzani, P. C. Gill, R. Huckle-Gaete, K. C. S. Jenner, M.-N. M. Jenner, K. Matsuoka, Y. A. Mikhalev, T. Miyashita, M. G. Morrice, S. Nishiwaki, V. J. Sturrock, D. Tormosov, R. C. Anderson, A. N. Bakeer, 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. Ljungblad, B. Maughan, R. D. McCauley, S. McKay, T. F. Norris, Oman Whale and Dolphin Research Group, S. Rankin, F. Samaran, D. Thiele, K. Van Waerebeek, 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**, 116–175 (2007).
- ⁵¹E. Blyth, "On the great rorqual of the Indian Ocean, with notices of other cetals, and of the Syrenia or marine pachyderms," *J. Asiatic Soc. Bengal* **28**, 481–498 (1859).
- ⁵²K. Thomisch, "Distribution patterns and migratory behavior of Antarctic blue whales," *Berichte zur Polar-und Meeresforschung= Rep. Polar Mar. Res.* **707**, 149–160 (2017).
- ⁵³S. E. Parks, C. W. Clark, and P. L. Tyack, "Short- and long-term changes in right whale calling behavior: The potential effects of noise on acoustic communication," *J. Acoust. Soc. Am.* **122**, 3725–3731 (2007).
- ⁵⁴V. Lesage, C. Barrette, M. Kingsley, and B. Sjare, "The effect of vessel noise on the vocal behavior of belugas in the St. Lawrence River estuary, Canada," *Mar. Mammal Sci.* **15**, 65–84 (1999).
- ⁵⁵I. C. Ansmann, J. C. Goold, P. G. H. Evans, M. Simmonds, and S. G. Keith, "Variation in the whistle characteristics of short-beaked common dolphins, *Delphinus delphis*, at two locations around the British Isles," *J. Mar. Biological Assoc. U. K.* **87**, 19–26 (2007).
- ⁵⁶K. M. Stafford, S. E. Moore, and C. G. Fox, "Diel variation in blue whale calls recorded in the eastern tropical Pacific," *Animal Behaviour* **69**, 951–958 (2005).
- ⁵⁷S. M. Wiggins, E. M. Oleson, M. A. McDonald, and J. A. Hildebrand, "Blue whale (*Balaenoptera musculus*) diel call patterns offshore of Southern California," *Aquatic Mammals* **31**, 161–168 (2005).
- ⁵⁸W. H. Kruskal and W. A. Wallis, "Use of ranks in one-criterion variance analysis," *J. Am. Stat. Assoc.* **47**, 583–621 (1952).
- ⁵⁹"Tables of sunrise/sunset and twilights," U.S. Naval Observatory, Astronomical Applications Dept., Washington, DC. Available at: <http://aa.usno.navy.mil/data/> (Last viewed 16 December 2015).
- ⁶⁰DEFLO-HYDRO cruises: Observation of the intraplate deformation of the oceanic lithosphere with hydrophones (2006-2008).
- ⁶¹OHASISBIO cruises: Hydroacoustic observation of the seismicity and biodiversity in the Indian Ocean (2009-2015).

Conclusion

L'étude du paysage acoustique et de la présence de grandes baleines dans l'océan Indien n'a débuté qu'il y a une quinzaine d'années, grâce à l'installation des stations hydroacoustiques permanentes de l'Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (OTICE ou CTBTO en anglais : *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization*) au nord et au sud des îles de Diego Garcia et de Crozet et au large du Cap Leeuwin, à l'ouest de l'Australie. Les premiers travaux ont permis d'identifier des vocalisations de baleines bleues Antarctique (Stafford et al., 2004). L'archipel de Crozet s'est ensuite révélé une aire de sympatrie pour les baleines bleues Antarctique ainsi que trois populations de baleines bleues pygmées (*i.e.* Madagascar, Australie et Sri-Lanka) (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b). Les données enregistrées par le réseau DEFLOHYDRO en 2007 ont confirmé ces observations et les ont étendues à plus grande échelle spatiale (Samaran et al., 2013). L'extension de ce réseau à partir de 2010 dans le projet OHASISBIO a permis d'élargir encore cette reconnaissance, tant à l'échelle spatiale que temporelle (Leroy et al., 2016, Chapitre 3). Il n'est donc pas surprenant que cette large collecte de données permette de découvrir de nouvelles signatures vocales, en quantité relativement importante, et ainsi de compléter notre connaissance du paysage acoustique de l'océan Indien austral.

A partir de cet ensemble de 7 ans de données sur 5 à 7 sites distants, la distinction entre P-call et Z-call incomplet est difficile à mettre en doute. Leur ressemblance peut toutefois entraîner des confusions. Tripovich et al. (2015) présentent par exemple un spectrogramme d'enregistrements réalisés au large de l'Australie où ce qu'ils décrivent comme des Z-calls incomplets s'avèrent en fait des P-calls d'après la durée de l'intervalle inter-cris. Cette confusion involontaire révèle cependant la présence de P-calls dans l'océan Indien oriental, au sud de l'Australie (141° E), présence confirmée depuis à deux reprises (B. Miller, T. Rogers, comm. pers. 2017)².

Des P-calls auraient également été détectés au large de Diego Garcia en 2003 (D. Harris, comm. pers. 2017). Cette dernière information est primordiale puisqu'elle indique que cette signature vocale était bien présente avant 2007, où une très faible quantité de cris avaient été détectée. Pour expliquer la disparition des M-calls et l'apparition progressive de P-calls, une des hypothèses de notre article est

2. Les résultats de notre article ont été présentés à la réunion du groupe de travail *Acoustic trend* du partenariat international de recherche sur l'océan Austral (*the Southern Ocean Research Partnership, SORP*). Cette réunion, tenue à Bled en Slovénie en mai 2017, réunissait les plus grands spécialistes mondiaux travaillant sur les baleines bleues Antarctique (S. Buchan, K. Findlay, D. Harris, B. Miller, F. Samaran, A. Širović, K. Stafford et I. van Opzeeland), et a révélé que ces vocalisations avaient déjà été observées à plusieurs reprises dès 2003 et dans d'autres parties de l'océan Indien.

un changement de fréquence des M-calls, vers l'année 2007, vers une fréquence plus haute, afin de sortir de la bande de fréquence 18-26 Hz. En effet dans cette bande de fréquence, le chorus, constitué de la superposition de Z-calls et de pulses de rorquals communs émis à plus ou moins grande distance de l'hydrophone, peut potentiellement masquer les M-calls et réduire leur distance de détection. Cette hypothèse avait déjà été formulée, sans être publiée, à partir d'observations acoustiques au Cap Leeuwin (B. Miller, comm. pers. 2017). Les enregistrements de P-calls à Diego Garcia en 2003 et de M-calls au large de la Namibie en 2012 (Thomisch, 2017) semblent cependant la contredire et favoriser plutôt l'hypothèse d'un déplacement de populations.

Reprendre les enregistrements réalisés à Diego Garcia ainsi qu'aux stations situées au large de l'Australie permettrait de compléter nos connaissances sur ces deux vocalisations, tant sur leur occurrence dans le temps que sur leur distribution latitudinale et longitudinale. Au-delà, il reste à organiser une campagne associant observations visuelles et acoustiques pour lever le mystère sur les espèces sources de ces vocalisations. Notre analyse permet de proposer des sites et la meilleure période pour réaliser ces observations.

Conclusion et perspectives

Au cours de ces travaux de thèse, différents aspects du traitement et de l'analyse de signaux biacoustiques ont été abordés. Ce chapitre résume les principaux enseignements de cette thèse et présente les points qui pourraient être approfondis.

En termes de méthodologie

Un premier volet méthodologique a d'abord validé une méthode de traitement du signal appliquée à la détection automatique de vocalisations de baleine bleue Antarctique. Cette méthode de détection présente deux principaux avantages par rapport aux méthodes classiquement utilisées (*e.g.* corrélation de spectrogrammes) : elle s'affranchit d'un choix subjectif de paramètres *a priori* (*e.g.* modèle et seuil de détection, paramètres du spectrogramme), et elle possède surtout un seuil de détection qui s'adapte automatiquement au niveau de bruit ambiant, caractéristique importante dans un environnement acoustique très variable au cours du temps. La validation complète et poussée de la méthode sur des données réelles, au préalable manuellement annotées, a permis de l'appliquer avec confiance à large base de données disponibles pour cette thèse.

Un second volet méthodologique s'est intéressé au problème de la définition d'une base de données de référence pour tester et comparer les performances de méthodes de détection automatique. Cette étude, réalisée en collaboration avec l'équipe d'acoustique océanique de l'Institut Alfred Wegener à Bremerhaven, en Allemagne, au sein de laquelle j'ai passé 3 mois (novembre 2016 - février 2017), a permis d'évaluer la variabilité inter- mais aussi intra-analystes dans l'annotation manuelle d'un jeu de données acoustiques commun. Bien qu'attendue, cette variabilité s'est révélée d'une ampleur plus importante que prévue et remet en question l'approche habituelle utilisée pour tester les performances de détection. Une connaissance de ces performances, en termes de probabilité de détection et de taux de fausses alarmes, est nécessaire pour comparer quantitativement des études fondées sur différentes méthodes. L'annotation manuelle de données de référence ou "vérité", auxquelles les algorithmes de détection seront confrontés, s'avère tellement subjective qu'elle

rend l'évaluation de ces performances tout aussi subjective. Ce constat doit être pris en compte et remédié pour pouvoir comparer les résultats de méthodes de détection différentes. La difficulté de l'annotation manuelle des données et la subjectivité qui en résulte augmente notamment en présence de vocalisations de faible rapport signal à bruit (RSB) et/ou en présence d'un chorus important. Fixer un seuil de RSB en-dessous duquel les événements ne sont plus annotés serait une solution pour diminuer cette variabilité inter- et intra-analyste. Cependant, limiter les détections aux RSB les plus élevés revient à restreindre le rayon de détection, et donc à restreindre l'aire d'écoute, même s'il faut garder à l'esprit que la relation entre RSB et rayon de détection n'est pas linéaire. Une solution alternative serait de créer une base de données simulées, avec des Z-calls de RSB variés. Le nombre exact de vocalisations serait alors connu et la variabilité des annotations manuelles facilement contrôlée. Il reste, toutefois, que les détecteurs doivent être testés en conditions réelles de bruit et de propagation, ainsi qu'en présence d'interférences. L'idéal serait ainsi de pouvoir créer une base de données semi-artificielle de vocalisations simulées dans des environnements acoustiques réels. L'étude avec l'AWI soulève, outre la question du rayon de détection, la question de la formation et du rayon de propagation du chorus. Ce problème pourrait être abordé par une modélisation acoustique (Mellinger et al., 2015; Seger et al., 2016). Celle-ci permettrait peut-être de comprendre pourquoi le chorus dans l'océan Indien austral se présente sous forme d'une bande de bruit entre 18 et 28 Hz, alors qu'en mer de Weddell, il prend la forme d'une ligne plus ou moins continue à la fréquence de l'unité A du Z-call.

En termes d'analyse de la distribution géographique et saisonnière

Munis de cet algorithme de détection, nous avons pu ensuite analyser de façon systématique la base de données acoustiques fournie par les réseaux d'hydrophones OHASISBIO et DEFLOHYDRO. Cette analyse, pluri-annuelle et multi-site, confirme l'importance de l'océan Indien austral pour les baleines bleues Antarctique. Bien que présents toute l'année, les Z-calls présentent une occurrence particulièrement élevée de l'automne au printemps, avec une forte saisonnalité qui varie en fonction du site d'enregistrement. Cette saisonnalité, rapportée à l'échelle mensuelle, ne varie en fait pas au fil des ans. Cette observation démontre une certaine stabilité des mouvements migratoires de l'espèce, bien que la fréquentation des sites varie d'une année à l'autre. Il est donc possible qu'à l'échelle individuelle, les routes de migration et les zones d'hivernage changent au cours du temps. L'occurrence de Z-calls toute l'année à tous les sites indique aussi que toutes les baleines bleues Antarctique ne suivent pas ce schéma migratoire, comme l'avaient déjà mentionné d'autres études (*e.g.* Širović et al., 2004, 2009; Samaran et al., 2013; Thomisch

et al., 2016). Enfin, l'analyse du rythme nyctéméral d'émission des Z-calls met en évidence une plus forte émission de cris le jour.

La région couverte par le réseau OHASISBIO est indubitablement une zone centrale pour la baleine bleue Antarctique, notamment en dehors des périodes dites d'alimentation. La saisonnalité plus marquée des Z-calls aux sites nord du réseau (MAD et NEAMS) indique probablement que ces sites sont situés dans leur aire d'hivernage, et possiblement de reproduction. En revanche, en raison de sa situation subtropicale à subantarctique, le réseau OHASISBIO ne donne pas d'informations sur les aires estivales d'alimentation, situées aux latitudes plus élevées. Les enregistrements réalisés par l'*Australian Antarctic Division* en 2014-2015 sur deux sites (SKER et Casey) à proximité de l'Antarctique élargissent notre fenêtre d'observation. A ces sites, les Z-calls sont détectés toute l'année. Au site SKER, la majorité des Z-calls sont détectés en juillet-août 2014 et en mars-avril 2015. Au site Casey, les pics de détections ont lieu en mars et avril 2014. Les résultats obtenus à Casey en 2014 et à SKER en 2015 suggèrent que ces sites sont sur les routes de migration sud-nord, mais la variabilité observée entre 2014 et 2015 au site SKER et la présence d'un pic de détections pendant l'hiver austral 2014 à ce même site complexifient l'interprétation des résultats. Ici, la durée réduite des enregistrements (un à deux ans) limite la portée des conclusions, ce qui souligne tout l'intérêt d'une surveillance acoustique pluri-annuelle.

Au-delà de la description des patrons temporels et géographiques de présence des Z-calls dans la zone d'étude, la pluri-annualité et la continuité des enregistrements OHASISBIO ouvrent d'autres perspectives. Elle offre par exemple la possibilité d'évaluer les variations de présence des baleines bleues Antarctique à une échelle temporelle plus fine (*e.g.* semaine ou quinzaine) et, à partir de là, de tenter de les confronter aux variations de conditions environnementales (*e.g.* température de surface, concentration en chlorophylle A, fronts océaniques). Parmi celles-ci, il serait intéressant d'analyser les résultats des campagnes d'étude du micronecton par acoustique active, réalisées sur les routes du NO Marion Dufresne, à proximité des sites d'enregistrement. Ces sondages acoustiques donnent accès à la distribution et à l'abondance relative des euphausiacées et myctophidés (Behagle, 2015), dont la présence pourrait être déterminante pour attirer les baleines bleues Antarctique. Ces analyses environnementales permettraient d'identifier les facteurs influençant la distribution de l'espèce dans la zone d'écoute, et complèteraient le travail réalisé ici.

Les données OHASISBIO permettraient aussi d’approfondir notre analyse rapide de la présence saisonnière dans l’océan Indien austral de trois populations de baleines bleues pygmées (*i.e.* type Madagascar, Australie et Sri Lanka) et des rorquals communs, réalisée ici à partir du rapport chorus sur bruit des vocalisations. L’état actuel de ces populations est en fait très peu documenté. L’objectif serait alors d’appliquer une approche semblable à celle développée pour les baleines bleues Antarctique dans cette thèse, c’est-à-dire d’analyser systématiquement les données à l’aide d’algorithmes de reconnaissance adaptés. La difficulté résidera dans la mise au point de ces outils, car les signatures vocales de ces populations de baleines sont plus complexes que les Z-calls.

De plus, en janvier 2017, la géométrie du réseau OHASISBIO a été modifiée (Figure 6.1), avec notamment un site nommé ELAN déployé à l’est du banc de l’Elan (56° S 61° E) qui complètera l’aire d’écoute vers les latitudes plus hautes, ainsi qu’un plus grand nombre de sites au nord du réseau. Cette nouvelle géométrie apportera sans doute des informations supplémentaires sur la distribution des espèces dans l’océan Indien austral, et permettra notamment d’affiner la localisation des aires d’hivernages de la baleine bleue Antarctique, grâce à la meilleure couverture du nord de la zone (sites MAD-E, MAD-W et RTJ).

En termes d’évolution des fréquences des vocalisations

Un autre résultat de notre analyse systématique des données acoustiques des réseaux OHASISBIO et DEFLOHYDRO a été la caractérisation de la diminution de fréquence des vocalisations de baleines bleues. Déjà remarquée pour les baleines bleues Antarctique (McDonald et al., 2009; Gavrilov et al., 2012; Miller et al., 2014) et pygmées d’Australie (Gavrilov et al., 2011) et du Sri Lanka (Miksis-Olds & Niekirk, 2016), cette décroissance annuelle de fréquence est démontrée pour la première fois ici pour les signatures vocales de la baleine bleue pygmée de Madagascar et du rorqual commun. La densité des mesures de fréquence de la baleine bleue Antarctique a permis d’en décrire précisément les variations inter-mais aussi intra-annuelles. On observe notamment une corrélation évidente entre variation saisonnière de la fréquence et variation du bruit ambiant dans des bandes fréquentielles proches du Z-call. Cette modulation de fréquence de l’ordre de -0.13 Hz/an sur le long-terme et de ± 0.1 Hz au cours de l’année s’expliquerait par une modulation de la puissance d’émission (effet Lombard; Lombard, 1911; Hotchkin & Parks, 2013). Il reste à expliquer pourquoi cette puissance d’émission varierait au cours du temps. D’après McDonald et al. (2009) et Miller et al. (2014), la décroissance annuelle de fréquence reflète une diminution de la puissance de la

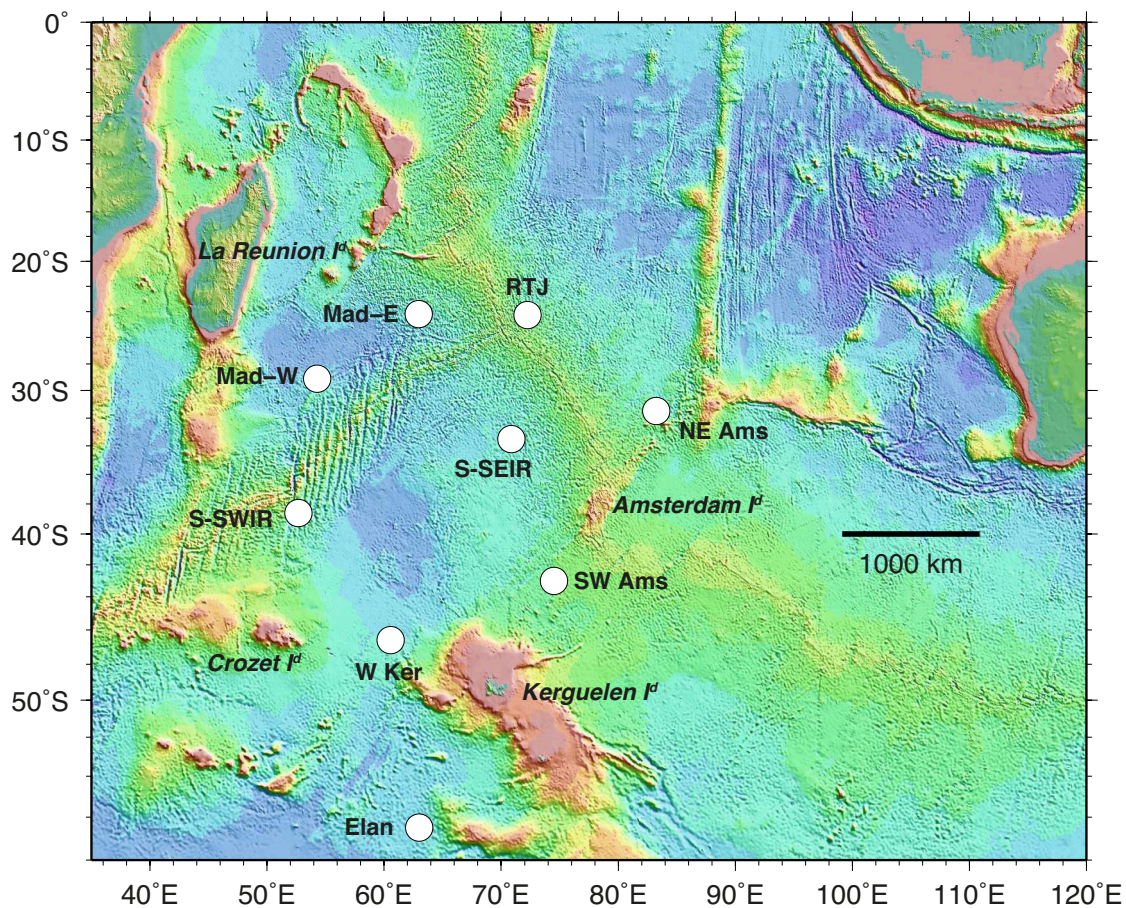


FIGURE 6.1 – Nouvelle disposition des sites du réseau OHASISBIO.

vocalisation à l'émission, répondant à une augmentation de la densité de population. Nous proposons une explication similaire à la variation saisonnière de fréquence, où la puissance d'émission s'adapterait aux variations de puissance du bruit ambiant basse-fréquence, ici probablement liées à la saisonnalité du bruit généré par la glace libre (*i.e.* icebergs). Les variations intra- et inter-annuelles semblent en effet être des phénomènes involontaires du fait de leur très faible amplitude (de l'ordre du dixième de Hertz) et répondraient à deux phénomènes différents à des échelles de temps différentes : 1) l'augmentation progressive de la densité de population suite à l'arrêt de la chasse, phénomène potentiellement commun à toutes les populations de baleines bleues ainsi qu'à celles de rorquals communs, et qui expliquerait alors que cette décroissance soit observée sur les signatures vocales de la majorité de ces populations ; 2) la variation saisonnière du bruit ambiant local dans les fréquences proches de celles de la signature vocale considérée. Ici encore, l'analyse détaillée des signatures vocales des baleines bleues pygmées et des rorquals communs permettrait de préciser leurs variations saisonnières de fréquence, d'explorer le lien avec le bruit ambiant dans des fréquences proches, et de vérifier notre hypothèse.

En termes d'exploration du répertoire des baleines

Enfin, notre analyse systématique des données a débouché sur la découverte inattendue de deux nouveaux types de vocalisations, dont les caractéristiques et patrons géographiques, saisonniers et nyctéméraux sont détaillés dans le sixième chapitre de cette thèse. Malgré une forte ressemblance avec la première unité du Z-call de baleine bleue Antarctique, le nouveau signal baptisé "P-call" est clairement différent d'un Z-call incomplet avec lequel il a parfois pu être confondu. Les caractéristiques de ces signaux démontrent leur caractère biologique indubitable et sont proches de celle des signatures vocales de baleines bleues. L'identification définitive de leur source nécessitera la combinaison d'observations visuelles et acoustiques. Les patrons géographiques et saisonniers de ces vocalisations, que nous avons établis dans notre étude, s'avèreront alors utiles pour cibler une telle expérience. Apparemment, l'un ou l'autre de ces signaux ont aussi été enregistrés au large de la Namibie (Thomisch et al., 2016), de l'Australie (Tripovich et al., 2015 et R. Ward, comm. pers. 2017), et de l'archipel de Diego Garcia (D. Harris, comm. pers. 2017), et ce à différentes périodes. Reprendre l'analyse de ces enregistrements permettrait sûrement de compléter nos connaissances sur leurs aires et périodes de répartition.

En termes de surveillance acoustique passive

En conclusion, ce travail de thèse apporte une vision plus complète de la distribution géographique et saisonnière de la baleine bleue Antarctique, espèce classée en danger critique d'extinction, dans l'océan Indien austral. Il répond notamment à certaines questions posées par des travaux antérieurs sur la même zone, qui s'interrogeaient, par exemple, sur la possibilité de généraliser à grande échelle temporelle les répartitions géographique et saisonnière observées sur un à deux ans de données (Samaran, 2008; Samaran et al., 2010b, 2013). Nous avons montré ici que la saisonnalité à l'échelle mensuelle était stable d'une année sur l'autre pendant 6 ans. Nos données pluri-annuelles et multi-sites confirment l'importance de l'océan Indien austral pour la baleine bleue Antarctique, au centre de leur migration saisonnière, et précisent un peu plus leur zone d'hivernage. Ces résultats soulignent encore, s'il en était besoin, la puissance et l'efficacité de l'approche par acoustique passive pour la surveillance des grandes baleines.

Bien que nos données acoustiques offrent encore de nombreuses perspectives d'études, déclinées ci-dessus, l'approche utilisée se heurte à des limites. L'une de ces limites, évoquée à plusieurs reprises, est la méconnaissance du niveau d'émission

des Z-calls à la source, nécessaire par exemple pour évaluer le rayon de détection. Mesurer le niveau d'émission nécessite de localiser la source de Z-call. C'était un des objectifs du déploiement des triplets d'hydrophones aux sites NCRO et WKER, puis SWAMS. L'exploitation de ces enregistrements, lors de différents stages réalisés à l'ENSTA Bretagne (Emmetière, 2015; Meillour, 2016), a permis de tester différentes méthodes de localisation. Elle met également en évidence la présence de zones d'ombre autour des triplets, où les Z-calls ne sont pas reçus par au moins un hydrophone. En fait, la localisation n'est précise que si l'individu se trouve à l'intérieur du triplet. A partir d'une séquence de 43 Z-calls consécutifs, que l'on suppose émis par le même individu, un niveau moyen d'émission de 183 dB re :1 μ Pa à 1 m entre 25 et 29 Hz a pu être déterminé avec une incertitude de 1 à 2 dB selon l'hydrophone considéré, pour une profondeur d'émission fixée à 35 m (Meillour, 2016). Ces travaux demandent à être poursuivis, afin de multiplier les mesures de niveau source pour disposer d'un échantillon significatif d'individus différents. Une fois la puissance d'émission cernée, il sera possible d'évaluer les rayons de détection de tous les Z-calls identifiés pour chacun des sites, de comparer des résultats de détection aux différents sites, d'évaluer les aires réelles de surveillance acoustique et donc la portée de l'écoute acoustique passive, et de calculer une densité de cris par aire de détection. Comme mentionné dans le chapitre 3, le rayon de détection est le paramètre clé pour répondre à ces questions. Une autre direction de recherche, en partie liée, concerne l'étude du chorus : à quelle distance se forme-t-il et se propage-t-il ?

Plus généralement, des observations visuelles et comportementales, associées à des observations acoustiques, restent nécessaires pour établir le contexte de l'émission des Z-calls ou pour estimer le taux de vocalisation d'un individu (*call rate*). Sans idée précise sur ce point, il est impossible de déduire d'une quantité de cris un nombre d'individus, et donc impossible d'estimer une densité d'individus par acoustique. Concernant ce dernier point, l'interprétation des Z-calls comme indice de présence de baleines bleues Antarctique souffre d'un biais non négligeable : ces vocalisations sont vraisemblablement uniquement émises par les individus mâles (McDonald et al., 2001; Oleson et al., 2007b), ce qui restreint les conclusions en termes de présence et de distribution aux individus mâles vocalement actifs de la population. Dénombrer l'autre vocalisation des baleines bleues Antarctique, le D-call, *a priori* émise par les deux sexes, permettrait de corriger ce biais. Cependant, les D-calls ne sont pas stéréotypés et donc très variables en durée et en fréquences, d'où la difficulté d'élaborer une méthode robuste pour les détecter automatiquement. Il semble aussi que ces vocalisations soient communes à toutes les populations de

baleines bleues, il deviendrait alors impossible, à partir de ces seuls signaux, de différencier les populations. De même, comprendre le rôle de ces D-calls demanderait des observations conjointes visuelles, acoustiques et comportementales. Dans cette perspective, l'*Australian Antarctic Division* a réalisé, ces dernières années, des campagnes de suivi des baleines bleues combinant une localisation et surveillance par acoustique, à l'aide d'hydrophones directionnels sur bouées perdues (*sonobuoys*) et des études de photo-identification (*e.g.* Double et al., 2013, 2015; Cox et al., 2015; Miller et al., 2015). Comprendre le comportement vocal des baleines bleues et l'environnement dans lequel elles évoluent, par ces campagnes multi-approches, demeure un vrai défi dans les latitudes australes.

Ces différents verrous limitent encore actuellement la surveillance par acoustique passive. Certains d'entre eux semblent difficiles à lever (*e.g.* comportement, taux de vocalisation, estimation de la densité d'individus), tandis que d'autres semblent plus à portée de main (*e.g.* niveau d'émission à la source, rayon de détection, étude du chorus). Tous nécessitent des efforts et surtout des liens et des échanges entre la communauté biologiste et la communauté acoustique-traitement du signal.

En effet, le suivi par acoustique passive, en raison de la variété des sources qui composent un paysage acoustique, intéresse de multiples domaines et s'avère, par essence, multidisciplinaire. L'analyse de signaux acoustiques d'origine "géophonique" ou "biophonique" nécessite des connaissances propres aux domaines d'application (*e.g.* géophysique, biologie), mais aussi en acoustique (*e.g.* propagation des ondes, propriétés de la colonne d'eau), en traitement du signal et en statistiques. Ces travaux de thèse en sont une illustration puisqu'à l'interface entre biologie des populations, ma formation initiale, et méthodes de traitement du signal, auxquelles il a fallu me former pour exploiter les données acoustiques acquises. Et si le traitement du signal appliqué à la détection automatique de signaux de baleines bleues Antarctique et l'évaluation des méthodes de détection, développés dans la première partie de cette thèse, constituent le fondement de l'analyse des données, les résultats obtenus à l'aide ces méthodes ne prennent ensuite leur sens que dans le cadre d'une analyse en termes de biologie et d'écologie des populations.

Au fil des rencontres suscitées par mes travaux de thèse, j'ai pu appréhender l'interdépendance entre différents savoirs et différentes compétences et me rendre compte de la nécessité de développer des compétences trans-disciplinaires, avec, en amont, une prise de conscience des manques et besoins des différentes communautés. Ces échanges ont permis de répondre aux problématiques posées dans l'introduction de cette thèse, et, je l'espère, d'apporter une contribution à notre connaissance des

baleines bleues Antarctique (*e.g.* distribution géographique et saisonnière, zones d'hivernage, changement de fréquence de la vocalisation). Ces travaux mettent aussi en évidence des limites de la méthode, et renforcent ma conviction sur la nécessité d'interagir avec d'autres communautés scientifiques pour lever les verrous rencontrés et ainsi faire progresser efficacement la recherche en bioacoustique.

Bibliographie

- Au, W. W. & Hastings, M. C. (2008). *Principles of Marine Bioacoustics*. Springer.
- Balcazar, N. E., Klinck, H., Nieuwkerk, S. L., Mellinger, D. K., Klinck, K., Dziak, R. P., & Rogers, T. L. (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(1), 172–186.
- Balcazar, N. E., Tripovich, J. S., Klinck, H., Nieuwkerk, S. L., Mellinger, D. K., Dziak, R. P., & Rogers, T. L. (2015). Calls reveal population structure of blue whales across the southeast Indian Ocean and the southwest Pacific Ocean. *Journal of mammalogy*, 96(6), 1184–1193.
- Barlow, J. & Taylor, B. L. (2005). Estimates of sperm whale abundance in the northeastern temperate Pacific from a combined acoustic and visual survey. *Marine Mammal Science*, 21(3), 429–445.
- Behagle, N. (2015). *Structuration acoustique du micronecton de l'écosystème océanique du sud-ouest de l'océan Indien*. PhD thesis, Université de la Rochelle.
- Boisseau, O., Gillespie, D., Leaper, R., & Moscrop, A. (2008). Blue (*Balaenoptera musculus*) and fin (*B. physalus*) whale vocalisations measured from northern latitudes of the Atlantic Ocean. *Journal of Cetacean Research and Management*, 10(1), 23–30.
- Branch, T. & Butterworth, D. (2001). Estimates of abundance south of 60° S for cetacean species sighted frequently on the 1978/79 to 1997/98 iwc/idcr-sower sighting surveys. *Journal of Cetacean Research and Management*, 3(3), 251–270.
- Branch, T. A. (2007). Abundance of Antarctic blue whales south of 60 S from three complete circumpolar sets of surveys. *J. Cetacean Res. Manage*, 9(3), 253–262.
- Branch, T. A., Matsuoka, K., & Miyashita, T. (2004). Evidence for increases in Antarctic blue whales based on Bayesian modelling. *Marine Mammal Science*, 20(4), 726–754.

- Branch, T. A. & Mikhalev, Y. (2008). Regional differences in length at sexual maturity for female blue whales based on recovered soviet whaling data. *Marine Mammal Science*, 24(3), 690–703.
- Branch, T. A., Stafford, K. M., Palacios, D. M., Allison, C., Bannister, J. L., Burton, C. L., Cabrera, E., Carlson, C. A., Galletti Vernazzani, B., Gill, P. C., et al. (2007). Past and present distribution, densities and movements of blue whales *Balaenoptera musculus* in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean. *Mammal Review*, 37(2), 116–175.
- Brodie, D. C. & Dunn, R. A. (2015). Low frequency baleen whale calls detected on ocean-bottom seismometers in the Lau basin, southwest Pacific Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(1), 53–62.
- Brumm, H. (2004). The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology*, 73(3), 434–440.
- Brumm, H. & Slabbekoorn, H. (2005). Acoustic communication in noise. *Advances in the Study of Behavior*, 35, 151–209.
- Brumm, H., Voss, K., Köllmer, I., & Todt, D. (2004). Acoustic communication in noise : regulation of call characteristics in a New World monkey. *Journal of Experimental Biology*, 207(3), 443–448.
- Cerchio, S., Collins, T., Mashburn, S., Clark, C., & Rosenbaum, H. (2010). Acoustic evidence of blue whales and other baleen whale vocalizations off northern Angola. *International Whaling Commission Scientific Committee, Agadir, Morocco*.
- Chapman, D. (1964). Appendix v : Reports of the Committee of Three Scientists on the special scientific investigation of the Antarctic whale stocks. *Report of the International Whaling Commission*, 14, 32–106.
- Chapp, E., Bohnenstiehl, D. R., & Tolstoy, M. (2005). Sound-channel observations of ice-generated tremor in the Indian Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(6).
- Clapham, P. J., Young, S. B., & Brownell, R. L. (1999). Baleen whales : conservation issues and the status of the most endangered populations. *Mammal review*, 29(1), 37–62.
- Cox, M. J., Miller, B. S., & Double, M. C. (2015). A preliminary investigation of the distribution of krill in the vicinity of Antarctic blue whales. *Paper submitted for consideration by the IWC Scientific Committee. SC/66a/EM*.

- Croll, D. A., Clark, C. W., Acevedo, A., Tershy, B., Flores, S., Gedamke, J., & Urban, J. (2002). Bioacoustics : Only male fin whales sing loud songs. *Nature*, 417(6891), 809–809.
- Cummings, W. C. & Thompson, P. O. (1971). Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*. *The journal of the Acoustical Society of America*, 50(4B), 1193–1198.
- Deecke, V. B., Ford, J. K., & Spong, P. (2000). Dialect change in resident killer whales : implications for vocal learning and cultural transmission. *Animal Behaviour*, 60(5), 629–638.
- D’Eu, J.-F., Royer, J.-Y., & Perrot, J. (2012). Long-term autonomous hydrophones for large-scale hydroacoustic monitoring of the oceans. In *OCEANS, 2012-Yeosu* (pp. 1–6). : IEEE.
- Di Iorio, L. (2009). *Vocal Communication in Blue Whales (Balaenoptera Musculus) and Noise Interference*. PhD thesis, University of Zurich.
- Di Iorio, L. & Clark, C. W. (2010). Exposure to seismic survey alters blue whale acoustic communication. *Biology letters*, 6(1), 51–54.
- Double, M. C., Barlow, J., Miller, B. S., Olson, P., Andrews-Goff, V., Leaper, R., Ensor, P., Kelly, N., Lindsay, M., Peel, D., et al. (2013). Cruise report of the 2013 Antarctic blue whale voyage of the Southern Ocean Research Partnership. *Report SC65a/SH/21 submitted to the Scientific Committee of the International Whaling Commission. Jeju Island, Republic of Korea*.
- Double, M. C., Miller, B. S., Leaper, R., Olson, P., Cox, M. J., Miller, E., Calderan, S., Collins, K., Donnelly, D., Ensor, P., et al. (2015). Cruise report on blue whale research from the NZ/Aus Antarctic Ecosystems Voyage 2015 of the Southern Ocean Research Partnership. *International Whaling Commission SC/66a/SH7*.
- Dunlop, R. A., Cato, D. H., & Noad, M. J. (2014). Evidence of a Lombard response in migrating humpback whales (*Megaptera novaeangliae*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1), 430–437.
- Emmetière, R. (2015). Détection et localisation de baleines bleues par acoustique passive. Master’s thesis, École nationale supérieure de l’énergie, l’eau et l’environnement, Grenoble.
- Figuroa, H. & Robbins, M. (2008). XBAT : an open-source extensible platform for bioacoustic research and monitoring. *Computational bioacoustics for assessing biodiversity (Bundesamt für Naturschutz, Bonn)*, (pp. 143–155).

- Frank, S. D. & Ferris, A. N. (2011). Analysis and localization of blue whale vocalizations in the solomon sea using waveform amplitude data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(2), 731–736.
- Gavrilov, A. N. & McCauley, R. D. (2013). Acoustic detection and long-term monitoring of pygmy blue whales over the continental slope in southwest Australia. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(3), 2505–2513.
- Gavrilov, A. N., McCauley, R. D., & Gedamke, J. (2012). Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of Antarctic blue whales. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(6), 4476–4480.
- Gavrilov, A. N., McCauley, R. D., Salgado-Kent, C., Tripovich, J., & Burton, C. (2011). Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time. *The Journal of Acoustical Society of America*, 130(6), 3651–3660.
- Gedamke, J., Gales, N., Hildebrand, J., & Wiggins, S. (2007). Seasonal occurrence of low frequency whale vocalisations across eastern Antarctic and southern Australian waters, February 2004 to February 2007. *White paper presented to the Scientific Committee of the International Whaling Commission*.
- Halfwerk, W., Lea, A., Guerra, M., Page, R., & Ryan, M. (2015). Vocal responses to noise reveal the presence of the Lombard effect in a frog. *Behavioral Ecology*, 27(2), 669–676.
- Helble, T. A., D'Spain, G. L., Campbell, G. S., & Hildebrand, J. A. (2013a). Calibrating passive acoustic monitoring : correcting humpback whale call detections for site-specific and time-dependent environmental characteristics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5), EL400–EL406.
- Helble, T. A., Gerald, L., Hildebrand, J. A., Campbell, G. S., Campbell, R. L., & Heaney, K. D. (2013b). Site specific probability of passive acoustic detection of humpback whale calls from single fixed hydrophones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(3), 2556–2570.
- Hotchkiss, C. & Parks, S. (2013). The Lombard effect and other noise-induced vocal modifications : insight from mammalian communication systems. *Biological Reviews*, 88(4), 809–824.
- Ichihara, T. (1966). The pygmy blue whale, *Balaenoptera musculus brevicauda*, a new subspecies from the Antarctic. *Whales, dolphins and porpoises*, 9, 79–111.

- Ichihara, T. et al. (1981). Review of pygmy blue whale stock in the Antarctic. *Mammals in the Seas : General papers and large cetaceans*, 3, 211.
- Janik, V. M. (2005). Underwater acoustic communication networks in marine mammals. *Animal communication networks*, (pp. 390–415).
- Janik, V. M., Sayigh, L. S., & Wells, R. (2006). Signature whistle shape conveys identity information to bottlenose dolphins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(21), 8293–8297.
- Kato, H., Miyashita, T., & Shimada, H. (1995). Segregation of the two sub-species of the blue whale in the Southern Hemisphere. *Reports of the International Whaling Commission*, 45, 273–283.
- Kawamura, A. (1980). A review of food of balaenopterid whales. *Sci. Rep. Whales Res. Inst*, 32, 155–197.
- Krause, B. (2008). Anatomy of the soundscape : evolving perspectives. *Journal of the Audio Engineering Society*, 56(1/2), 73–80.
- Leroy, E. C., Royer, J.-Y., Bonnel, J., & Samaran, F. (2017a). Long-range impact of iceberg generated sounds on large-whale call-frequency. Submitted to Science.
- Leroy, E. C., Samaran, F., Bonnel, J., & 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).
- Leroy, E. C., Samaran, F., Bonnel, J., & Royer, J.-Y. (2017b). 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(3), 1413–1427.
- Leroy, E. C., Thomisch, K., Royer, J.-Y., Boebel, O., & Van Opzeeland, I. (in prep.). On the variability in acoustic annotations and automatic detections of antarctic blue whale calls under different acoustic conditions.
- Lesage, V., Barrette, C., Kingsley, M., & Sjare, B. (1999). The effect of vessel noise on the vocal behavior of belugas in the St. Lawrence River estuary, Canada. *Marine Mammal Science*, 15(1), 65–84.
- Ljungblad, D. K., Clark, C. W., & Shimada, H. (1998). Sc/49/sh17 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-International Whaling Commission*, 48, 439–442.
- Lombard, E. (1911). Le signe de l'élevation de la voix. *Ann. Maladies Oreille, Larynx, Nez, Pharynx*, 37(101-119), 25.
- Lopatka, M., Olivier, A., Laplanche, C., Zarzycki, J., & Motsch, J.-F. (2005). An attractive alternative for sperm whale click detection using the wavelet transform in comparison to the Fourier spectrogram. *Aquatic Mammals*, 31(4), 463.
- Mackintosh, N. A. (1966). The distribution of southern blue and fin whales. *Whales, dolphins, and porpoises*, (pp. 125–144).
- Mackintosh, N. A., Wheeler, J. F. G., & Clowes, A. J. (1929). *Southern blue and fin whales*. University Press.
- Marques, T. A., Thomas, L., Martin, S. W., Mellinger, D. K., Ward, J. A., Moretti, D. J., Harris, D., & Tyack, P. L. (2013). Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological Reviews*, 88(2), 287–309.
- Matsumoto, H., Bohnenstiehl, D. R., Tournadre, J., Dziak, R. P., Haxel, J. H., Lau, T.-K., Fowler, M., & Salo, S. A. (2014). Antarctic icebergs : A significant natural ocean sound source in the southern hemisphere. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(8), 3448–3458.
- McCauley, R. D., Jenner, C., Bannister, J. L., Cato, D. H., & Duncan, A. (2000). Blue whale calling in the Rottneest trench, Western Australia, and low frequency sea noise. In *Australian Acoustical Society Conference, Joondalup, Australia. unpublished*.
- McDonald, M. A. (2006). An acoustic survey of baleen whales off Great Barrier Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 40(4), 519–529.
- McDonald, M. A., Calambokidis, J., Teranishi, A. M., & Hildebrand, J. A. (2001). The acoustic calls of blue whales off California with gender data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(4), 1728–1735.
- McDonald, M. A., Hildebrand, J. A., & Mesnick, S. (2009). Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs. *Endangered Species Research*, 9(1), 13–21.

- McDonald, M. A., Mesnick, S. L., & Hildebrand, J. A. (2006). Biogeographic characterization of blue whale song worldwide : using song to identify populations. *Journal of cetacean research and management*, 8(1).
- McDonald, M. A. & Moore, S. E. (2002). Calls recorded from North Pacific right whales (*Eubalaena japonica*) in the eastern Bering Sea. *Journal of Cetacean Research and Management*, 4(3), 261–266.
- Meillour, M. (2016). Caractérisation des Vocalises de Baleines Bleues Antarctiques dans l’Océan Indien. Master’s thesis, Université de Bretagne Occidentale, Brest.
- Melcon, M. L., Cummins, A. J., Kerosky, S. M., Roche, L. K., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2012). Blue whales respond to anthropogenic noise. *PLoS One*, 7(2), e32681.
- Mellinger, D. K. & Clark, C. W. (1997). Methods for automatic detection of mysticete sounds. *Marine & Freshwater Behaviour & Phy*, 29(1-4), 163–181.
- Mellinger, D. K. & Clark, C. W. (2000). Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(6), 3518–3529.
- Mellinger, D. K., Kusel, E. T., & Nieukirk, S. L. (2015). Density estimation of northeast Pacific fin whales derived from frequency band energy. In *DCLDE : 7th International Workshop on Detection, Classification, Localization, and Density Estimation*.
- Mellinger, D. K., Stafford, K. M., Moore, S., Dziak, R. P., & Matsumoto, H. (2007). Fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4), 36.
- Miksis-Olds, J. L. & Nieukirk, 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(4), 2090–2090.
- Miksis-Olds, J. L., Vernon, J. A., & Heaney, K. D. (2015). The impact of ocean sound dynamics on estimates of signal detection range. *Aquatic Mammals*, 41(4), 444.
- Miller, B. S., Barlow, J., Calderan, S., Collins, K., Leaper, R., Olson, P., Ensor, P., Peel, D., Donnelly, D., Andrews-Goff, V., et al. (2015). Validating the reliability of passive acoustic localisation : a novel method for encountering rare and remote Antarctic blue whales. *Endangered Species Research*, 26(3), 257–269.

- Miller, B. S., Leaper, R., Calderan, S., & Gedamke, J. (2014). Red Shift, Blue Shift : Investigating Doppler Shifts, Blubber Thickness, and Migration as Explanations of Seasonal Variation in the Tonality of Antarctic Blue Whale Song. *PLoS one*, 9(9), e107740.
- Miller, P. J. & Bain, D. E. (2000). Within-pod variation in the sound production of a pod of killer whales, *Orcinus orca*. *Animal Behaviour*, 60(5), 617–628.
- Mizroch, S., Rice, D. W., & Breiwick, J. M. (1984). The blue whale, *Balaenoptera musculus*. *Marine Fisheries Review*, 46(4), 15–19.
- Nemoto, T. (1970). Feeding pattern of baleen whales in the ocean. *Marine Food Chains*. University of California Press, Berkeley, California, (pp. 241–252).
- Oleson, E. M., Calambokidis, J., Barlow, J., & Hildebrand, J. A. (2007a). Blue whale visual and acoustic encounter rates in the Southern California Bight. *Marine Mammal Science*, 23(3), 574–597.
- Oleson, E. M., Calambokidis, J., Burgess, W. C., McDonald, M. A., LeDuc, C. A., & Hildebrand, J. A. (2007b). Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. *Marine Ecology-Progress Series*, 330.
- Pangerc, T. (2010). *Baleen whale acoustic presence around South Georgia*. PhD thesis, University of East Anglia.
- Parks, S. E., Johnson, M., Nowacek, D., & Tyack, P. L. (2011). Individual right whales call louder in increased environmental noise. *Biology letters*, 7(1), 33–35.
- Payne, R. & Webb, D. (1971). Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 188(1), 110–141.
- Potter, J. R., Mellinger, D. K., & Clark, C. W. (1994). Marine mammal call discrimination using artificial neural networks. *The Journal of the Acoustical society of America*, 96(3), 1255–1262.
- Rankin, S. & Barlow, J. (2007). Vocalizations of the sei whale *Balaenoptera borealis* off the Hawaiian Islands. *Bioacoustics*, 16(2), 137–145.
- Rankin, S., Ljungblad, D., Clark, C., & Kato, H. (2005). Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 iwc/sower circumpolar cruises, Area v, Antarctica. *J. Cetacean Res. Manage*, 7(1), 13–20.

- Reilly, S. B., Bannister, J. L., Best, P. B., Brown, M., Brownell Jr. Robert L., Butterworth Doug S Clapham, P. J., Cooke, J., Donovan, G. P., Urbán, J., & Zerbini, A. N. (2008). *Balaenoptera musculus* ssp. *intermedia*. (errata version published in 2016). The IUCN Red List of Threatened Species 2008.
- Rendell, L. & Whitehead, H. (2005). Spatial and temporal variation in sperm whale coda vocalizations : stable usage and local dialects. *Animal Behaviour*, 70(1), 191–198.
- Rendell, L. E. & Whitehead, H. (2003). Vocal clans in sperm whales (*physeter macrocephalus*). *Proceedings of the Royal Society of London B : Biological Sciences*, 270(1512), 225–231.
- Risch, D., Clark, C. W., Dugan, P. J., Popescu, M., Siebert, U., & Van Parijs, S. M. (2013). Minke whale acoustic behavior and multi-year seasonal and diel vocalization patterns in massachusetts bay, usa. *Marine Ecology Progress Series*, 489, 279–295.
- Robineau, D. (2007). *Une histoire de la chasse à la baleine*. Vuilbert.
- Royer, J.-Y., Chateau, R., Dziak, R. P., & Bohnenstiehl, D. R. (2015). Seafloor seismicity, antarctic ice-sounds, cetacean vocalizations and long-term ambient sound in the Indian Ocean basin. *Geophysical Journal International*, 202(2), 748–762.
- Samaran, F. (2008). *Analyse des signaux acoustiques d'origine biologique enregistrés dans l'océan Indien : implications dans le recensement et le suivi des mouvements saisonniers des cétacés*. PhD thesis, Université de La Rochelle.
- Samaran, F., Adam, O., & Guinet, C. (2010a). Detection range modeling of blue whale calls in southwestern Indian Ocean. *Applied Acoustics*, 71(11), 1099–1106.
- Samaran, F., Adam, O., & Guinet, C. (2010b). Discovery of a mid-latitude sympatric area for two Southern Hemisphere blue whale subspecies. *Endangered Species Research*, 12(2), 157–165.
- Samaran, F., Adam, O., Motsch, J.-F., & Guinet, C. (2008). Definition of the Antarctic and pygmy blue whale call templates. application to fast automatic detection. *Canadian Acoustics*, 36(1), 93–103.
- Samaran, F., Guinet, C., Adam, O., Motsch, J.-F., & Cansi, Y. (2010c). Source level estimation of two blue whale subspecies in southwestern Indian Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(6), 3800–3808.

- Samaran, F., Stafford, K. M., Branch, T. A., Gedamke, J., Royer, J.-Y., Dziak, R. P., & Guinet, C. (2013). Seasonal and geographic variation of southern blue whale subspecies in the Indian Ocean. *PLoS one*, 8(8), e71561–e71561.
- Sciaccia, V., Caruso, F., Beranzoli, L., Chierici, F., De Domenico, E., Embriaco, D., Favali, P., Giovanetti, G., Larosa, G., Marinaro, G., et al. (2015). Annual acoustic presence of fin whale (*Balaenoptera physalus*) offshore eastern sicily, central mediterranean sea. *PLoS one*, 10(11), e0141838.
- Sears, R. (2009). *Blue whale, Balaenoptera musculus*. Encyclopedia of Marine Mammals. San Diego : Academic Press.
- Seeger, K. D., Thode, A. M., Urbán-R, J., Martínez-Loustalot, P., Jiménez-López, M. E., & López-Arzate, D. (2016). Humpback whale-generated ambient noise levels provide insight into singers' spatial densities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(3), 1581–1597.
- Širović, A. (2006). *Blue and fin whale acoustics and ecology off Antarctic Peninsula*. PhD thesis, University of California, San Diego.
- Širović, A. (2016). Variability in the performance of the spectrogram correlation detector for North-east Pacific blue whale calls. *Bioacoustics*, 25(2), 145–160.
- Širović, A. & Hildebrand, J. A. (2011). Using passive acoustics to model blue whale habitat off the Western Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 58(13), 1719–1728.
- Širović, A., Hildebrand, J. A., & Wiggins, S. M. (2007). Blue and fin whale call source levels and propagation range in the Southern Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(2), 1208–1215.
- Širović, A., Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M., McDonald, M. A., Moore, S. E., & Thiele, D. (2004). Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 51(17), 2327–2344.
- Širović, A., Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M., & Thiele, D. (2009). Blue and fin whale acoustic presence around Antarctica during 2003 and 2004. *Marine Mammal Science*, 25(1), 125–136.
- Širović, A., Rice, A., Chou, E., Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M., Roch, M. A., et al. (2015). Seven years of blue and fin whale call abundance in the Southern California Bight. *Endangered Species Research*, 28(1), 61–76.

- Socheleau, F.-X., Leroy, E., Pecci, A. C., Samaran, F., Bonnel, J., & Royer, J.-Y. (2015). Automated detection of Antarctic blue whale calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(5), 3105–3117.
- Sousa, A. G. & Harris, D. (2015). Description and seasonal detection of two potential whale calls recorded in the Indian Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3), 1379–1388.
- Stafford, K. M., Bohnenstiehl, D. R., Tolstoy, M., Chapp, E., Mellinger, D. K., & Moore, S. E. (2004). Antarctic-type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(10), 1337–1346.
- Stafford, K. M., Chapp, E., Bohnenstiel, D. R., & Tolstoy, M. (2011). Seasonal detection of three types of “pygmy” blue whale calls in the Indian Ocean. *Marine Mammal Science*, 27(4), 828–840.
- Stafford, K. M., Citta, J. J., Moore, S. E., Daher, M. A., & George, J. E. (2009). Environmental correlates of blue and fin whale call detections in the North Pacific Ocean from 1997 to 2002. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 37–53.
- Stafford, K. M., Fox, C. G., & Clark, D. S. (1998). Long-range acoustic detection and localization of blue whale calls in the northeast Pacific Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(6), 3616–3625.
- Stafford, K. M., Nieukirk, S. L., & Fox, C. G. (1999). Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical Pacific. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(6), 3687–3698.
- Stevenson, B. C., Borchers, D. L., Altwegg, R., Swift, R. J., Gillespie, D. M., & Measey, G. J. (2015). A general framework for animal density estimation from acoustic detections across a fixed microphone array. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(1), 38–48.
- Thode, A. M., D’Spain, G. L., & Kuperman, W. (2000). Matched-field processing, geoaoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(3), 1286–1300.
- Thomisch, K. (2017). *Distribution patterns and migratory behavior of Antarctic blue whales*. PhD thesis, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research.
- Thomisch, K., Boebel, O., Clark, C. W., Hagen, W., Spiesecke, S., Zitterbart, D. P., & Van Opzeeland, I. (2016). Spatio-temporal patterns in acoustic presence and

- distribution of Antarctic blue whales *Balaenoptera musculus intermedia* in the Weddell Sea. *Endangered Species Research*, 30, 239–253.
- Tournadre, J., Bouhier, N., Girard-Ardhuin, F., & Rémy, F. (2016). Antarctic icebergs distributions 1992–2014. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 121(1), 327–349.
- Tripovich, J. S., Klinck, H., Nieukirk, S. L., Adams, T., Mellinger, D. K., Balcazar, N. E., Klinck, K., Hall, E. J., & Rogers, T. L. (2015). Temporal segregation of the Australian and Antarctic blue whale call types (*Balaenoptera musculus spp.*). *Journal of Mammalogy*, (pp. gyv065).
- Tsang-Hin-Sun, E. (2016). *Dynamique spatiale et temporelle de dorsales à taux d'expansion contrastés dans l'océan Indien par une approche hydroacoustique*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale.
- Tsang-Hin-Sun, E., Royer, J.-Y., & Leroy, E. C. (2015). Low-frequency sound level in the southern Indian Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(6), 3439–3446.
- Tyack, P. L. (2000). *Functional aspects of cetacean communication*. In *Cetacean societies : field studies of dolphins and whales*. Mann, J.
- Tyack, P. L. & Clark, C. W. (2000). Communication and acoustic behavior of dolphins and whales. In *Hearing by whales and dolphins* (pp. 156–224). Springer.
- Tyack, P. L. & Miller, E. H. (2002). Vocal anatomy, acoustic communication and echolocation. *Marine mammal biology : An evolutionary approach*, (pp. 142–184).
- Van Opzeeland, I. (2010). *Acoustic ecology of marine mammals in polar oceans*. PhD thesis, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research.
- Van Opzeeland, I., Samaran, F., Stafford, K., Findlay, K., Gedamke, J., Harris, D., & Miller, B. S. (2013). Towards collective circum-antarctic passive acoustic monitoring : the southern ocean hydrophone network (sohn). *Polarforschung*, 83(2), 47–61.
- Watkins, W. A., Daher, M. A., George, J. E., & Rodriguez, D. (2004). Twelve years of tracking 52-Hz whale calls from a unique source in the North Pacific. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 51(12), 1889–1901.
- Watkins, W. A., Daher, M. A., Reppucci, G. M., George, J. E., Martin, D. L., DiMarzio, N. A., & Gannon, D. P. (2000a). Seasonality and distribution of whale calls in the North Pacific. *Oceanography*, 13(1), 62–67.

- Watkins, W. A., George, J. E., Daher, M. A., Mullin, K., Martin, D. L., Haga, S. H., & DiMarzio, N. A. (2000b). *Whale call data for the North Pacific : November 1995 through July 1999 occurrence of calling whales and source locations from SOSUS and other acoustic systems*. Technical report, Woods Hole Oceanographic Institution.
- Watkins, W. A., Tyack, P., Moore, K. E., & Bird, J. E. (1987). The 20-Hz signals of finback whales (*Balaenoptera physalus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(6), 1901–1912.
- Wenz, G. M. (1964). Curious noises and the sonic environment in the ocean. *Marine bio-acoustics*, 1, 101–119.
- Wiedenmann, J., Cresswell, K. A., Goldbogen, J., Potvin, J., & Mangel, M. (2011). Exploring the effects of reductions in krill biomass in the Southern Ocean on blue whales using a state-dependent foraging model. *Ecological Modelling*, 222(18), 3366–3379.
- Winn, H. E. & Winn, L. K. (1978). The song of the humpback whale *Megaptera novaeangliae* in the West Indies. *Marine Biology*, 47(2), 97–114.
- Zemsky, V., Berzin, A., Mikhailiev, Y., & Tormosov, D. (1995). Soviet Antarctic pelagic whaling after WWII : review of actual catch data. *Report of the International Whaling Commission*, 45, 131–135.
- Zemsky, V. & Sazhinov, E. (1982). Distribution and current abundance of pygmy blue whales. *Marine mammals. Southwest Fisheries Science Center Administrative Report LJ-94-02. All-Union Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography*, (pp. 53–70).

À chaque naissance de baleine, la mer fait une vague.

Sylvain TESSON

Surveillance acoustique des baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien austral : traitement, analyse et interprétation des signaux

Résumé : La baleine bleue Antarctique, *Balaenoptera musculus intermedia*, est en danger critique d'extinction depuis la chasse baleinière intensive du 20^e siècle. L'état de ses populations et leur écologie restent encore mal connus. En raison de l'inefficacité des observations visuelles, la surveillance par acoustique passive est privilégiée pour étudier cette espèce vocalement très active. Cette thèse porte sur l'analyse de 7 ans de surveillance acoustique passive dans l'océan Indien austral, région d'habitat et de migration particulièrement importante pour la baleine bleue Antarctique. Déployé depuis 2010 sur une aire de près de 9 000 000 km^2 , le réseau d'hydrophones OHASISBIO fournit une base de données acoustiques multi-site et pluri-annuelle. L'application d'un algorithme de détection automatique des vocalisations de baleines bleues Antarctique, préalablement testé et validé, a permis d'établir les patrons géographiques et saisonniers de présence de l'espèce au sein du réseau. L'analyse systématique de ces vocalisations a également permis de caractériser des variations intra- et inter-annuelles de leur fréquence, affectée par une décroissance long-terme et des modulations saisonnières. L'analyse préliminaire de signatures vocales d'autres espèces présentes dans le réseau - rorquals communs et trois populations de baleines bleues pygmées – a révélé des variations de fréquence similaires de leur vocalisation et permis d'esquisser leurs patrons géographiques et saisonniers. Enfin, deux vocalisations, jusqu'alors non décrites, aux caractéristiques semblables à celles de baleines bleues, ont été identifiées et caractérisées.

Mots clés : baleine bleue Antarctique, bioacoustique, acoustique passive, détection automatique, distribution géographique, saisonnalité, migration, variations de fréquence, océan Indien austral

Acoustic monitoring of Antarctic blue whales in the Southern Indian Ocean : data processing, analysis and interpretation

Summary : The Antarctic blue whale, *Balaenoptera musculus intermedia*, is currently critically endangered since the commercial whaling in the 20th century. The population recovery of this species, as well as its ecology, are still poorly known. Due to the ineffectiveness of visual observations, passive acoustics is a preferred method to monitor this highly vocal species. This dissertation presents an analysis of 7 years of passive acoustic monitoring in the southern Indian Ocean, known as a particularly important area of habitat and migration for the Antarctic blue whale. Deployed since 2010 over an area of about 9,000,000 km^2 , the OHASISBIO hydrophone network provides a multi-site and multi-year acoustic database. An algorithm for the automated detection of Antarctic blue whale calls, first tested and validated, has been applied to characterize the seasonal and geographic patterns of the species presence in the study area. The systematic analysis of these vocalizations also allowed to characterize intra- and inter-annual variations of their frequency, with a long-term decline and seasonal variations. A preliminary analysis of other vocal signatures recorded by the network, from 3 populations of pygmy blue whales and fin whales, highlighted similar variations of their frequencies and outlined their geographic and seasonal patterns of presence in the area. Finally, two previously undescribed vocalizations, with characteristics close to that of blue whale calls, were identified and characterized.

Keywords : Antarctic blue whale, bioacoustic, passive acoustic monitoring, automated detection, spatial distribution, seasonality, migration, frequency variations, southern Indian Ocean