



HAL
open science

Traitement et analyse de données bioacoustiques dans l'océan Indien austral : application aux baleines bleues

Maëlle Torterotot

► **To cite this version:**

Maëlle Torterotot. Traitement et analyse de données bioacoustiques dans l'océan Indien austral : application aux baleines bleues. Autre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2020. Français. NNT : 2020BRES0058 . tel-03372735

HAL Id: tel-03372735

<https://theses.hal.science/tel-03372735>

Submitted on 11 Oct 2021

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

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



THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE
DE BRETAGNE OCCIDENTALE

ECOLE DOCTORALE N° 598

Sciences de la Mer et du littoral

Spécialité : Acoustique sous-marine et traitement du signal

Par

Maëlle TORTEROTOT

**Traitement et analyse de données bioacoustiques
dans l'océan Indien austral
Application aux baleines bleues**

Thèse présentée et soutenue à Plouzané, le 5 novembre 2020

Unité de recherche : Géosciences Océan, UMR 6538

Rapporteurs avant soutenance

Christophe GUINET

Directeur de recherche CNRS, CEBC

Yvan SIMARD

Directeur de recherche, ISMER, UQAR

Composition du Jury :

Rapporteurs

Christophe GUINET, Directeur de recherche CNRS, CEBC

Yvan SIMARD, Directeur de recherche, ISMER, UQAR

Président du jury

Jean-Benoît CHARASSIN, Professeur, MNHN LOCEAN

Examineurs

Angélique DREMEAU, Maître de conférence, ENSTA Bretagne

Susannah BUCCHAN, Docteur, Université de Conception

Directeur de thèse

Jean-Yves ROYER, Directeur de recherche CNRS, LGO

Co-directeur de thèse

Flore SAMARAN, Maître de conférence, ENSTA Bretagne



Résumé

La baleine bleue (*Balaenoptera musculus ssp*), plus grand animal ayant jamais existé, a été menée au bord de l'extinction par la chasse baleinière intensive au 20^{ème} siècle. Depuis l'arrêt de la chasse en 1970, les effectifs augmentent, mais de nouvelles menaces liées aux activités humaine pèsent sur cette espèce classée en danger par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN). Dans l'océan Indien, région privilégiée des baleiniers, les aires de reproduction, d'alimentation et les couloirs de migrations des baleines bleues sont encore mal connus. L'analyse de 9 années de données acoustiques enregistrées par un réseau de 6 à 9 hydrophones (réseau OHASISBIO) apporte des informations complémentaires sur la distribution de trois populations de baleines bleues dans l'océan Indien austral et sur leur usage de cet espace.

Les méthodes de suivi par acoustique passive tirent parti de l'activité vocale élevée des baleines bleues pour étudier leur présence et leur comportement dans des lieux inaccessibles à l'observation visuelle directe. Afin de traiter notre base de données conséquente, nous avons détecté systématiquement les vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées, dites *D-calls*, de 3 populations de baleines bleues à l'aide d'un détecteur automatique dont les performances ont préalablement été évaluées méticuleusement. Des post-traitements se sont avérés nécessaires pour éliminer les fausses détections de *D-calls* causées par les tirs sismiques et les vocalisations à 40 Hz de de rorqual commun. Un point clé dans l'évaluation d'un détecteur automatique concerne les données annotées sur lesquelles ses performances sont testées. La constitution d'ensembles de données de référence est une problématique en soi pour laquelle des solutions sont ici proposées.

Les détections des vocalisations stéréotypées confirment et précisent les distributions spatiales et saisonnières décrites précédemment dans l'océan Indien austral. Les résultats révèlent que les baleines bleues Antarctique et pygmées utilisent le sud de l'océan Indien de façon très différente. Les vocalisations des premières sont détectées toute l'année alors que les vocalisations des populations pygmées sont détectées seulement périodiquement. De plus, les mouvements migratoires des baleines bleues Antarctique sont variables d'une année à l'autre alors que les patrons de présence saisonnière des baleines bleues pygmées sont stables. De telles différences dans l'occupation géographique et saisonnière du sud de

l'océan Indien par ces deux sous-espèces reflètent certainement des préférences alimentaires et des comportements spécifiques entre une sous-espèce très mobile – les baleines bleues Antarctique – et une sous-espèce qui réside dans l'océan Indien – les baleines bleues pygmées.

Pour la première fois, les vocalisations non-stéréotypées de baleines bleues, les *D-calls* ont été systématiquement recherchées dans les enregistrements OHASISBIO. Elles sont détectées sur l'ensemble des sites instrumentés, mais principalement aux sites sub-antarctiques. Leur occurrence saisonnière varie en fonction de la latitude, avec une présence accrue en hiver au nord et au printemps au sud. La répartition géographique des *D-calls*, comparée à celle des chants, met en évidence une modification du comportement vocal des baleines bleues, avec une production importante de chants au nord et réduite au sud, et inversement pour les *D-calls*. Ces observations suggèrent que l'océan Indien austral est utilisé comme une aire de reproduction au nord et comme une aire d'alimentation au sud. Elles laissent aussi entendre que les baleines bleues se nourriraient de façon opportuniste durant la migration, et même dans leurs aires d'hivernage au nord.

Cette collection multi-sites et pluriannuelle de vocalisations variées, permet de vérifier si leur production obéit à un rythme nycthéméral et si celui-ci varie selon le type de vocalisation, la saison ou le lieu. Les chants de baleines bleues Antarctique sont partout légèrement plus nombreux la journée que la nuit. Cependant, pour les 4 vocalisations étudiées, le rythme d'émission varie peu en fonction du régime de lumière, comparé à d'autres espèces de mysticètes. Mesurer ces rythmes ajoute finalement peu d'information sur le comportement des baleines bleues dans l'océan Indien austral.

Enfin, l'évolution du bruit ambiant, notamment la contribution des tirs sismiques au paysage acoustique, est caractérisée en raison de son impact potentiel sur les mammifères marins. Si le niveau de bruit ambiant semble décroître progressivement à certains sites d'écoute depuis 9 ans, le nombre important de tirs sismiques captés dans les régions les plus reculées de l'océan Indien austral, mais principalement au nord du réseau, souligne la prévalence de ce bruit anthropique.

Ces travaux confirment le grand intérêt de maintenir des observatoires acoustiques sur le long-terme pour caractériser les patrons saisonniers et géographiques de présence des mammifères marins et révéler de potentiels changements dans ces patrons. Ils mettent aussi en évidence le besoin de recourir à des méthodes de traitement de données standardisées, afin d'homogénéiser les études et faciliter leur comparaison. Les résultats de ces 9 années d'écoute attestent en outre que l'océan Indien austral, avec ses aires d'hivernage et d'alimentation et ses couloirs migratoires, est une région vitale pour les baleines bleues Antarctique et pygmées, qui semblent toutefois l'habiter de manière différente.

Abstract

Blue whales (*Balaenoptera musculus ssp*), the largest animals that have ever existed, were brought to the brink of extinction by whaling during the 20th century. Since the end of whaling in 1970, populations have been increasing, but new threats related to human activities weigh on this species, classified as endangered by the International Union for the Conservation of Nature (IUCN). In the Indian Ocean, a region of predilection for whalers, the breeding and feeding grounds of blue whales and their migration corridors are still poorly known. The analysis of 9 years of acoustic data recorded by a network of 6 to 9 hydrophones (OHASISBIO network) provides additional information on the distribution of three populations of blue whales in the Southern Indian Ocean and their use of this habitat.

Passive acoustic monitoring methods take advantage of the intensive blue whale vocal behavior to study them in remote places, difficult to access for direct visual observations. In order to study this large database, we systematically detected stereotyped and non-stereotyped (D-calls) calls of 3 blue whale populations, using an automated detector whose performances are first thoroughly evaluated. Post-processing algorithms were necessary to eliminate false D-call detections due to seismic shots and fin whale 40-Hz pulses. A key point in testing an automated detector is the annotated dataset on which its performances are measured. Building reference data sets is a problem in itself for which solutions are proposed here.

The detection of stereotyped calls confirms and refines the spatial and seasonal distributions previously described in the southern Indian Ocean. The results show that Antarctic and pygmy blue whales use the southern Indian Ocean in very different ways. Indeed, the calls of the former are recorded throughout the year while the pygmy blue whale calls are detected only periodically. Furthermore, the Antarctic blue whale migratory movements are variable from year to year, while the seasonal presence of pygmy blue whales follows a very stable pattern. Such differences in the geographical and seasonal occupation of the southern Indian Ocean by these two subspecies certainly reflect specific feeding preferences and behaviors between a highly mobile subspecies – the Antarctic blue whales – and a subspecies swelling in the Indian Ocean – the pygmy blue whales.

For the first time, non-stereotyped blue whale calls – D-calls – were systematically detected in the OHASISBIO recordings. They are recorded at all sites, but mainly in sub-antarctic regions. Their seasonal presence shifts with the latitude, since they are more abundant in winter in the north and in spring in the south. The geographical distribution of stereotyped songs and D-calls indicates that blue whales modify their vocal behavior with a significant production of songs in the north, whilst reduced in the south, and conversely for the D-calls. These observations suggest that the southern Indian Ocean is used both as a breeding/wintering ground in the north and a feeding ground in the south. They also indicate that blue whales may feed opportunistically during migration, even in their northern wintering grounds.

This multi-site, multi-year collection of vocalizations allows to verify whether their emission rate follow diurnal patterns and whether these patterns depend on the type of vocalization, the season or the location. The Antarctic blue whale songs are slightly more detected everywhere during the day than at night. However, the emission rate of the 4 studied vocalizations varies little according to the light regime, compared to other mysticete species. Measuring these diurnal patterns thus adds little information on blue whale's behavior in the southern Indian Ocean.

Finally, the ambient noise evolution, notably the contribution of seismic shots to the acoustic landscape, is characterized due to their potential impact on marine mammals. Although the ambient noise level seems to have been gradually decreasing at some sites over the past 9 years, the large number of seismic shots recorded in the most remote areas of the southern Indian Ocean, but mostly in the northern part of the network, underlines the prevalence of this anthropogenic noise.

This work highlights the great value of long-term acoustic observatories for characterizing the seasonal and geographical patterns of marine mammals and revealing potential changes in these patterns. It also underlines the need for standardized processing methods, in order to homogenize studies and facilitate their comparison. The results of these 9 years of passive acoustic monitoring confirm that the Indian Ocean, with its wintering and feeding grounds, and migration corridors between them, is important for both Antarctic and pygmy blue whales, although they seem to inhabit it in different ways

Remerciements

Merci ! Voilà, on y est, après 3 ans de travail de thèse, c'est le moment de remercier toutes les personnes qui m'ont accompagnée, aidée, encadrée, bichonnée, nourrie, hébergée, sortie de ma zone de confort, enseignée, et faite voyager, rire et grandir.

Tout d'abord, je remercie Jean-Yves Royer et Flore Samaran, pour leur encadrement de qualité, grâce auquel j'ai passé trois années formidables. Jean-Yves, merci pour ton partage de connaissances, tes relectures pointilleuses et tes remarques souvent très pertinentes sur mon travail. Je te remercie aussi de m'avoir permis d'embarquer par deux fois à bord du Marion Dufresne, à la découverte des missions océanographiques, du grand large et des terres australes.

Flore, merci de m'avoir fait confiance, d'avoir partagé avec moi tes connaissances et ta passion pour les mammifères marins. S'il y a trois ans je n'ai eu le droit qu'à un 😊, j'espère que maintenant tu m'accordes un 😊. Je suis aussi particulièrement reconnaissante pour ta bienveillance, ton hospitalité, tes astuces de couture et ce fameux magret de canard fumé. Et aussi, merci de continuer à me faire confiance pour la suite ! J'en profite pour remercier Manu par la même occasion, tant pour ses barbecues que pour avoir cassé ma voiture.

Un grand merci à Kate Stafford, qui m'a accueillie à bras ouverts dans son labo à Seattle. Nos discussions m'ont beaucoup fait réfléchir, apprendre et avancer. Merci aussi à Trevor Branch, qui, malgré un emploi du temps chargé, a pris le temps de répondre à mes nombreuses sollicitations.

Je remercie tout particulièrement Christophe Guinet et Yvan Simard, qui ont accepté d'être rapporteurs de ma thèse, ainsi que les examinateurs Jean-Benoit Charassin, Angélique Drémaud et Susannah Buchan, pour leurs remarques et conseils pertinents sur mes travaux de thèse. J'ai énormément apprécié discuter avec vous lors de ma soutenance virtuelle.

Merci également aux membres de mon comité de thèse, Isabelle Charrier, Florent Le Courtois et François-Xavier Socheleau, qui ont suivi mon travail et m'ont donné confiance en ma recherche.

Je suis très reconnaissante envers toutes les équipes techniques et administratives de l'IUEM et de l'ENSTA Bretagne qui m'ont facilité la vie pendant 3 ans pour me permettre de me concentrer sur ma thèse, et sans qui partir en mission n'aurait pas été aussi simple : Margot, Charlotte, Elisabeth, Elodie, Isabelle, Christophe, Annick et les autres. Merci à Mickaël Beauverger, pour son implication précieuse dans l'observatoire OHASISBIO, et pour avoir partagé avec moi ses connaissances sur les missions océanographiques et particulièrement sur Obs Austral.

J'ai une énorme pensée pour mes collègues, doctorants ou non, de l'IUEM et de l'ENSTA Bretagne. Fabio, Paulo, Milan, Thomas, Clément, Guillaume, Charles, Dorian, Gaëtan, Massimo, Marion, Ruth, Deno, et tous les autres, merci de m'avoir remonté le moral quand ça n'allait pas, de m'avoir initiée à Takenoko, au surf et à la bière locale. Merci Marie, pour tes cours de yoga qui m'ont aidé à me détendre, pour ce voyage en Irlande et pour ton amitié tout simplement. Un merci tout particulier Jean, Sabrina et Judith avec qui j'ai eu le plaisir de cohabiter dans la cave de l'IUEM et à Julie, qui va devoir me supporter encore un peu au quotidien ! Merci Manue de m'avoir passé le bébé et de m'avoir accompagnée au début de ma thèse et même après, mais d'un peu plus loin.

Mention spéciale à toutes les personnes extraordinaires que j'ai rencontrées à bord du Marion Dufresne, lors de ma première mission en 2018 : Coraline, Baptiste, Jonathan (la crèche du MD211) mon voisin Cédric (dont j'étais la voisine Totoro !), Philippe, Claude, Eric, Dany ; et de ma deuxième mission en 2019 : mes p'tites zouettes Carla, Camille, Mélyne, Céline, Marion (et Adrian, la zouz de la Réunion), mon presque voisin Cédric qui porte très bien le peignoir rose, et tous les autres... Vous m'avez accompagnée pendant ces quelques mois les plus incroyables de ma vie, rendu l'expérience encore plus folle, alors MERCI!!!

Merci aussi les copains et les copines de toujours, parce que sans vous, ma vie serait bien moins drôle. Merci Marine, Clara, Margaux et Manon de me supporter depuis plus de 10 ans (déjà!!!), Alex(andre), Charles-Etienne, Mathieu (même si tu es normand), Kaa-melott, Josh, Antoine, Rémi, Seb, Thibault, Aurore, Marine, Shinji, Léo. Un merci encore plus particulier à Manon qui a mis son talent à ma disposition et dont les illustrations se trouvent dans ce manuscrit.

Merci à mon amoureux de m'avoir souvent sortie la tête du guidon et de me cuisiner tant de bons petits plats, et à sa famille de m'avoir permis d'approcher mon sujet d'étude au plus près (même si cette baleine bleue ne parlait certainement pas le même dialecte que celles de l'océan Indien).

Enfin, je remercie toute ma famille de m'avoir soutenue et de s'être intéressée à ce que je faisais mais sans jamais me mettre la pression.

Valorisation des résultats de thèse

Publications scientifiques

Torterotot M., Samaran F. and Royer J.-Y. . (en préparation). Long-term acoustic monitoring of non-stereotyped blue whale calls in the southern Indian Ocean.

Torterotot M., Samaran F., Stafford K.M. and Royer J.-Y. (2020). Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*

Torterotot M., Royer J.-Y., and Samaran F. (2019). Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the southern Indian Ocean. In proceedings of *IEEE OCEANS*

Nguyen Hong Duc P., **Torterotot M.**, Samaran F., White P. R., Gérard O., Adam O. and Cazau D. (accepté en septembre 2020), Assessing inter-annotator agreement from collaborative annotation campaign in marine bioacoustics. *Ecological Informatics*

Communications scientifiques

Torterotot M., Samaran F., Royer J.-Y. (décembre 2019). Seasonal and geographical occurrence of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the southern Indian Ocean. *World Marine Mammal conference*, Barcelone, Espagne

Torterotot M., Samaran F., Royer J.-Y. (décembre 2019). Sounds from airguns and blue whales recorded from a long-term hydrophone network in the southern Indian Ocean. *178th Meeting of the Acoustical Society of America*, pp. 2939, San Diego Ca, USA

Torterotot, M., Samaran, F., Royer, J.-Y., (juin 2019). Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the Southern Indian Ocean. In *Proceedings of OCEANS 2019 MTS/IEEE*, pp. 190113-190009 Marseille, France.

Torterotot M., Samaran F., Royer J.-Y. (octobre 2018). Application d'une méthode de détection automatique sur les différentes vocalises de baleines bleues de l'océan Indien. *5ème Atelier Serenade*, Brest, France

Torterotot M., Socheleau F.-X., Samaran F., Royer J.-Y. (juin 2018). Automated detection of non-stereotyped whale calls using dictionary-based representations : application to blue whale D-calls. *8th International Detection, Classification, Localization and Density Estimation workshop*, Paris, France.

Activités complémentaires

Campagnes en mer Obs Austral sur le R/V Marion Dufresne 2, janvier-février 2018 et janvier-février 2019. Mise à l'eau et récupération d'hydrophones.

Séjour de recherche de trois mois (septembre-décembre 2019) à l'Applied Physics Laboratory, Université of Washington, Seattle, Etats-Unis avec K.M. Stafford. Financé par la bourse de mobilité ISblue, Interdisciplinary School for the blue planet (ANR-17-EURE-0015).

Communication grand public à la nuit des chercheurs, septembre 2018, Océanopolis, Brest

Communication grand public à la mer XXL, juillet 2019, Nantes

Communication grand public à l'Université de Bretagne Occidentale, organisé par l'Association Brestoïse des étudiants en Biologie, novembre 2018. *Suivi par acoustique passive des mouvements migratoires des baleines bleues dans l'océan Indien austral*

Secrétaire de l'association des doctorants de l'école doctorale des sciences de la mer et du littoral

Membre du comité d'organisation du workshop Serenade, octobre 2018, Brest

Représentante des doctorants au conseil de l'école doctorale des sciences de la mer et du littoral

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Remerciements	vii
Table des figures	xv
Liste des tableaux	xix
Introduction	1
1 Etat de l’art	5
1.1 Les baleines bleues : décimées, protégées mais toujours menacées	6
1.1.1 Les débuts de la chasse	6
1.1.2 L’industrialisation de la chasse	7
1.1.3 La régulation de la chasse	7
1.1.4 Bilan de la chasse pour les baleines bleues	8
1.1.5 Nouvelles menaces	10
1.2 Etudier les mammifères marins par acoustique passive	11
1.2.1 L’acoustique passive	12
1.2.2 La communication acoustique chez les mammifères marins	13
1.2.3 Les vocalisations de la baleine bleue	14
1.3 Les baleines bleues dans l’océan Indien austral	18

1.3.1	Une zone d'étude, deux océans	18
1.3.2	Les données de la thèse : le réseau OHASISBIO	19
1.3.3	Etat des connaissances sur les baleines bleues dans l'océan Indien austral	26
2	Détection automatique et manuelle de vocalisations de baleines bleues	29
2.1	Détection automatique des vocalisations de baleines bleues	30
2.1.1	Les détecteurs automatiques de vocalisations de baleines bleues .	31
2.1.2	Choix et fonctionnement du détecteur	32
2.1.3	Evaluation des performances du détecteur	34
2.1.4	Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the southern Indian Ocean	37
2.1.5	Limites du détecteur	49
2.2	De la reproductibilité des analyses d'acoustique passive	52
2.2.1	Standardiser le traitement des données	54
2.2.2	Standardiser les pratiques d'annotation	54
2.3	Discussion et perspectives	72
2.3.1	Perspectives pour un meilleur détecteur automatique	72
2.3.2	Perspectives concernant la standardisation du traitement des données d'acoustique passive	72
2.4	Conclusion	74
3	Distribution acoustique de trois populations de baleines bleues dans l'océan Indien austral	75
3.1	Introduction	75
3.2	Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring	76
3.3	Discussion	94
4	Présence saisonnière et spatiale des vocalisations non-stéréotypées de baleines	

bleues dans l’océan Indien austral	97
4.1 Introduction	97
4.2 Article en préparation	98
4.3 Discussion	125
5 Analyse des patrons journaliers d’émission des vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées de baleines bleues dans l’océan Indien austral	127
5.1 Introduction	127
5.2 Contexte	128
5.3 Méthodes	130
5.4 Résultats	131
5.5 Discussion	146
6 Evolution du bruit ambiant et contribution temporelle des tirs de canons à air au paysage acoustique	149
6.1 Introduction	149
6.2 Evolution du bruit ambiant dans l’océan Indien austral de 2010 à 2018 . .	150
6.2.1 Méthodes	150
6.2.2 Résultats	151
6.3 Contribution des tirs sismiques au paysage acoustique	154
6.3.1 Méthode	155
6.3.2 Résultats	157
6.4 Discussion	158
6.4.1 Evolution du bruit ambiant	158
6.4.2 Contribution des tirs sismiques	161
6.5 Conclusion	165
Discussion générale et conclusion	167
Bibliographie	179

Table des figures

1.1	Vue aérienne d'une baleine bleue, (photo Denis Pigot)	6
1.2	Evolution du nombre de prises annuelles de baleines bleue dans l'océan Indien	9
1.3	Elements d'une expérience de surveillance par acoustique passive.	12
1.4	Spectrogramme de séries de vocalisations stéréotypés d'une baleine bleue pygmée de Madagascar	15
1.5	Répartition des populations de baleines bleues en fonction de leur chant.	15
1.6	Spectrogrammes des vocalisations stéréotypées enregistrées dans l'océan Indien austral	16
1.7	Spectrogramme d'une série de 5 D-calls enregistrés dans l'océan Indien austral (au site WKER en 2015).	18
1.8	Limites de l'océan Indien selon l'Organisation Hydrographique Internationale.	19
1.9	Répartition des sites d'écoute du réseau OHASISBIO sur fond de carte bathymétrique de l'océan Indien austral.	20
1.10	Schéma d'une ligne de mouillage typique du réseau OHASISBIO.	21
1.11	Planning d'enregistrement	22
1.12	Spectrogramme annuel des données enregistrées au site SWAMS2 en 2014.	25
2.1	Spectrogramme montrant deux chorus de baleines bleues.	30
2.2	Schéma de fonctionnement général de l'algorithme SRD ou <i>Sparse Representation-based Detector</i> (Socheleau and Samaran, 2018)	35
2.3	Courbes ROC ou <i>Receiving Operator Curve</i> obtenues pour les 4 types de vocalisations recherchées dans les données.	37

2.4	Spectrogrammes d'interférences d'origine anthropique pouvant être détectées comme des D-calls	49
2.5	Spectrogrammes d'interférences d'origine biologique pouvant être détectées comme des D-calls	50
2.6	Patrons de détection sur différents triplets d'hydrophones du réseau OHA-SISBIO pour 3 populations acoustiques de baleines bleues.	51
2.7	Les différentes sources de variabilité dans la chaîne de traitement de données d'acoustique passive	52
2.8	L'interface de la plateforme d'annotation Aplose lors d'une campagne sur les données basses fréquences de DCLDE 2015.	57
5.1	Nombre de vocalisations stéréotypées de trois populations de baleines bleues et de D-calls par heure détectés chaque jour sur le site WKER en 2015.	132
5.2	Moyennes ajustées et erreurs types des rythmes d'émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique pour chaque heure de la journée.	135
5.3	Diagramme en boîtes à moustache des moyennes ajustées du nombre de vocalisations de baleines bleues Antarctique détectées par heure pour chaque régime de lumière.	136
5.4	Moyennes ajustées et erreurs types des rythmes d'émission des vocalisations de baleines bleues pygmées d'Australie pour chaque heure de la journée.	138
5.5	Diagramme en boîtes à moustache des moyennes ajustées du nombre de vocalisations de baleines bleues pygmées d'Australie détectées par heure pour chaque régime de lumière.	139
5.6	Moyennes ajustées et erreurs types des rythmes d'émission des vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar pour chaque heure de la journée.	141
5.7	Diagramme en boîtes à moustache des moyennes ajustées du nombre de vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar détectées par heure pour chaque régime de lumière.	142
5.8	Moyennes ajustées et erreurs types des rythmes d'émission des D-calls pour chaque heure de la journée.	144

5.9	Diagramme en boîtes à moustache des moyennes ajustées du nombre de D-calls détectés par heure pour chaque régime de lumière.	144
6.1	Distribution des niveaux de bruit pour différents percentiles moyennés sur les enregistrements de SWAMS en 2012 et 2013, d’après Tsang-Hin-Sun et al. (2015)	150
6.2	Niveaux de bruit dans la bande de fréquences 40-60 Hz des données long terme OHASISBIO de 2010 à 2018.	151
6.3	Niveaux de bruit dans la bande de fréquences 40-60 Hz des données OHASISBIO de 2010 à 2018.	152
6.4	Niveaux de bruit dans la bande de fréquences 40-60 Hz des données des nouveaux sites OHASISBIO de 2017 à 2018.	153
6.5	Niveaux de bruit journalier dans la bande de fréquences 40-60 Hz des enregistrements du site MAD.	154
6.6	Spectrogrammes d’enregistrements contenant des tirs de canons à air . . .	155
6.7	Etapes de la procédure de détection de tirs de canons à air dans les enregistrements.	156
6.8	Histogrammes du nombre de détections mensuel de D-calls à WKER en 2015 détaillant les faux positifs (a) avant et (b) après le post-traitement de détection des tirs de canons à air.	157
6.9	Proportion de fichiers avec des signaux acoustiques de tirs sismiques par an pour chaque site du réseau OHASISBIO.	158
6.10	Proportion de fichiers contenant des tirs sismiques par semaine pour chaque année d’enregistrement.	159
6.11	Niveaux de bruit moyens dans la bande 40-60 Hz des trois triplets installés à WKER en 2010.	161
6.12	Zones géographiques probables de gisements pétroliers marins non découverts.	162
6.13	Les différentes zones de risques autour d’une source sonore d’origine anthropique, d’après Southall et al. (2009, 2019)	164
7.14	Concentrations de chlorophyll A dans l’océan Indien (haut) en hiver et (bas) au printemps 2014, mesurée par satellite.	174

Liste des tableaux

1.1	Périodes d'enregistrements acquis par les hydrophones du réseau OHA-SISBIO	23
5.1	Résultats des tests de Kruskal-Wallis pour le rythme nycthémeral des baleines bleues Antarctique et pygmées d'Australie et de Madagascar	133
5.2	Résultats du test de la somme des rangs de Wilcoxon avec pour hypothèse nulle H_0 : il n'y a pas de différence significative du rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique en fonction du régime de lumière.	137
5.3	Résultats du test de la somme des rangs de Wilcoxon avec pour hypothèse nulle H_0 : il n'y a pas de différence significative du rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues pygmées d'Australie en fonction du régime de lumière.	140
5.4	Résultats du test de la somme des rangs de Wilcoxon avec pour hypothèse nulle H_0 : il n'y a pas de différence significative du rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar en fonction du régime de lumière.	143
5.5	Résultats du test de la somme des rangs de Wilcoxon avec pour hypothèse nulle H_0 : il n'y a pas de différence significative du rythme d'émission des D-calls en fonction du régime de lumière.	145

Introduction

Le paysage sonore sous-marins est composé d'une association de sons d'origine anthropique (*e.g.* navires, canons à air, sondeurs de bateaux), géophysique (*e.g.* séismes, vagues, craquements d'icebergs) et biologique. Les études de la composante biologique, dites bioacoustiques, initiées au sortir de la seconde guerre mondiale (Tavolga, 2012) sont aujourd'hui en plein essor pour surveiller de nombreuses espèces marines, des minuscules crevettes (Au and Banks, 1998), aux très grands cétacés (Cummins and Thompson, 1971), qui utilisent le son pour s'orienter, chasser ou communiquer. Pourtant, l'étude et le suivi des mammifères marins ont longtemps privilégié les méthodes d'observation visuelle, malgré leurs limitations. Elles dépendent fortement des conditions météorologiques et de luminosité et restent difficiles, voire impossibles à mettre en oeuvre dans des régions isolées, notamment aux hautes latitudes. De plus, elles ne sont pas particulièrement adaptées à des suivis continus sur le long terme. L'acoustique passive pallie avantageusement ces inconvénients. Cette méthode de suivi met en oeuvre des instruments autonomes pouvant être immergés dans des régions peu accessibles et enregistrer en continu le paysage sonore sous-marin pendant plusieurs mois, voire plusieurs années. De plus, les enregistrements ne dépendent pas (ou peu) des conditions météorologiques et de lumière. Néanmoins, ce moyen d'observation a aussi ses inconvénients : il nécessite une connaissance préalable des répertoires vocaux des espèces à surveiller et ne fournit qu'un indicateur partiel de la présence d'animaux. En effet, si la détection de vocalisations de mammifères marins dans les enregistrements signale leur présence aux alentours du capteur, l'absence de vocalisations, elle, n'est pas synonyme de leur absence. Malgré ces limitations, les applications de la bioacoustique passive sont nombreuses : études de distribution géographique et temporelle (Leroy et al., 2016), analyses comportementales (Oleson et al., 2007b), estimations de densité (McDonald and Fox, 1999) ou encore évaluations des effets des activités anthropiques (Di Iorio and Clark, 2010). Ces applications diverses et variées sont rendues possibles par la diversification des instruments de mesure (Mellinger et al., 2007) et par l'augmentation de leurs performances en termes d'autonomie et de capacités de stockage. Ces améliorations techniques se traduisent par une augmentation constante du volume de données. Leur accumulation suscite de nouveaux besoins méthodologiques de traitements automatiques, pour limiter le dépouillement ma-

nuel des données, long et fastidieux. Il s'avère en outre de plus en plus nécessaire de standardiser ces pratiques de traitement de la donnée d'acoustique passive, afin de faciliter la comparaison entre les nombreuses études et permettre des analyses globales ou à grande échelle.

Longtemps épargnées par les baleiniers en raison de leur taille imposante et de leur rapidité, les populations de baleines bleues (*Balaenoptera musculus ssp*) sont devenues des cibles privilégiées de la chasse commerciale à partir des années 1910. Au total, de 1900 jusqu'à l'arrêt officiel de la chasse à la fin des années 60, plus de 300 000 individus furent capturés dans l'hémisphère sud (Rocha et al., 1982). Les populations de baleines bleues Antarctique (*B.m. intermedia*) seraient passées de 239 000 individus dans les années 1920 à environ un millier au début des années 1970, soit moins de 1% de l'effectif initial Branch et al. (2004). Estimée à 2 280 individus en 1998, leur nombre atteindrait aujourd'hui environ 10 000 individus, en se basant sur un taux de croissance de 7,3% par an (Branch et al., 2007). On manque en revanche d'estimations fiables pour d'autres sous-espèces de baleines bleues, comme les baleines bleues pygmées (*B.m. breviceauda*). Les chiffres avancés indiquent une abondance pré-exploitation nettement inférieure à celle des baleines bleues Antarctique (Zemsky and Sazhinov, 1994). Les dernières estimations font état de quelques centaines, voire milliers d'individus ayant survécu à la chasse (Best et al., 2003; Kato et al., 2007; McCauley and Jenner, 2010; Jenner et al., 2008). L'acoustique passive est une approche idéale pour étudier cette espèce rare et discrète dans l'océan Indien austral, un environnement hauturier aux conditions météorologiques parfois extrêmes. Dans cette région, cette approche a déjà permis d'observer la présence de deux sous-espèces (Antarctique et pygmée), dont plusieurs populations acoustiques de baleines bleues pygmées (Samaran et al., 2010a; Stafford et al., 2011; Leroy et al., 2016, 2018b). Il reste cependant de nombreuses inconnues quant à la distribution, aux aires de reproduction et d'alimentation, au comportement et au rétablissement de ces populations.

Dans ce contexte, mes travaux de thèse se sont focalisés sur l'étude de 3 populations de baleines bleues et tentent, à partir de l'analyse de 9 ans d'enregistrements acoustiques dans l'océan Indien austral, d'apporter des éléments de réponses aux problématiques méthodologiques évoquées, en abordent les questions suivantes :

1. Comment évaluer les performances d'un détecteur automatique de vocalisations de baleines bleues et sa robustesse sur une grande base de données ?
2. Quelles sont les sources de variabilité dans l'annotation des données d'acoustique passive et comment standardiser les pratiques d'annotation ?
3. Quels sont les patrons de présence géographiques et saisonniers des vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées des baleines bleues dans l'océan Indien austral ?

4. Qu'en déduit-on sur le comportement acoustique des baleines bleues et sur leur utilisation de l'océan Indien comme lieu de reproduction et/ou d'alimentation ?

Avant d'aborder ces questions, le chapitre 1 de la thèse exposera plus en détail le contexte et les enjeux de ces travaux sur les populations de baleines bleues de l'océan Indien, largement décimées par la chasse et toujours menacées de nos jours. Il présentera aussi l'approche par acoustique passive et son application à l'étude des mammifères marins, et plus précisément des baleines bleues. Enfin, ce chapitre décrira les données acoustiques analysées, acquises de 2010 à 2018 par l'Observatoire HydroAcoustique de la SISmicité et de la BIODiversité (OHASISBIO) ainsi que l'état des connaissances sur l'occupation de cette région par les baleines bleues.

Le chapitre 2, méthodologique, exposera la méthode de détection automatique de vocalisations choisie pour cette thèse et détaillera l'évaluation de ses performances ainsi que la stratégie adoptée pour détecter 4 types de vocalisations différentes sur un important volume de données. Ces travaux sont présentés sous la forme d'un article publié dans les comptes rendus du congrès *OCEANS IEEE 2019* (Torterotot et al., 2019). Sera aussi abordée la problématique de l'annotation manuelle des enregistrements acoustiques, une étape cruciale du traitement des données. Les solutions proposées par le groupe brestois OSmOSE (Open Source meets Ocean Sound Explorers) pour standardiser les pratiques seront testées dans une expérience collective dont les conclusions font l'objet d'un article soumis en Juillet 2020 à la revue *Ecological Informatics* (Nguyen Hong Duc et al., 2020).

Le chapitre 3 présentera l'analyse des résultats de détection des vocalisations stéréotypées des baleines bleues dans les enregistrements de l'océan Indien austral. En sont déduites les distributions géographiques et temporelles des baleines bleues Antarctique et des baleines bleues pygmées de Madagascar et d'Australie. Ces répartitions seront comparées pour déterminer les périodes et les régions de co-occurrence des différentes populations. Ces résultats font l'objet d'un article accepté dans la revue *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography* (Torterotot et al., 2020).

Le chapitre 4 traitera des détections des vocalisations non-stéréotypées de baleines bleues, appelées D-calls. Suivra une analyse de leurs patrons géographique et temporel de présence, ainsi que de leur co-occurrence avec les vocalisations stéréotypées des baleines bleues. La comparaison des patrons de présence permettra de proposer des hypothèses sur l'utilisation de l'océan Indien par les baleines bleues. Les résultats sont synthétisés dans un article qui sera soumis prochainement.

Le chapitre 5 s'intéressera aux variations nyctémérales du rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues, stéréotypées ou non, et montrera si elles permettent de mieux comprendre le comportement et les stratégies d'alimentation de ces baleines.

Dans le contexte de la hausse du bruit ambiant dans les océans, lié aux activités anthropiques, et de son impact sur la faune marine, le chapitre 6 détaillera l'évolution du bruit ambiant et la contribution des tirs sismiques au paysage sonore de l'océan Indien austral, détectés en grand nombre par le réseau d'hydrophones OHASISBIO.

La discussion générale résumera les messages essentiels de ces travaux de thèse, en exposera les limites et proposera des perspectives de travail.

Chapitre 1

Etat de l'art

La baleine bleue (*Balaenoptera musculus*) (Linnaeus, 1785) est le plus grand animal ayant jamais vécu sur la planète Terre (Goldbogen et al., 2019) (Figure 1.1), pouvant dépasser les 30 mètres de long, et peser parfois jusqu'à 150 tonnes. Cette espèce de cétacé appartient au sous-ordre des mysticètes, aussi appelés baleines à fanons. Les baleines bleues peuplent tous les océans du globe, des latitudes tropicales jusqu'aux pôles. Quatre sous-espèces sont aujourd'hui reconnues : *B.m musculus* dans l'Atlantique et le Pacifique nord, *B.m. brevicauda* ou baleines bleues pygmées, dans les océans Indien et Pacifique sud (Ichihara, 1966), *B.m. intermedia* ou baleine bleue Antarctique, principalement dans l'océan Austral (Rice, 1998) et *B.m. indica* dans le Nord de l'océan Indien, le long des côtes du Sri Lanka (Blyth, 1859). La définition d'une cinquième sous-espèce résidant le long des côtes chiliennes est encore en discussion (LeDuc et al., 2017). Ces sous-espèces diffèrent par leur génétique (LeDuc et al., 2007), leur morphologie (Ichihara, 1966), leurs aires de répartition (Rice, 1998) et leurs signatures acoustiques (McDonald et al., 2006).

Depuis une quarantaine d'année, la baleine bleue est au cœur de nombreux programmes de recherche dans le monde entier. L'espèce a en effet été décimée par l'Homme jusque dans les années 70, alors que sa biologie et son écologie étaient encore largement méconnues. Ces travaux de thèse visent à développer des outils de traitement du signal acoustique pour faciliter l'étude de ces grandes baleines, puis à les appliquer à 9 ans de données d'acoustique passive enregistrées dans l'océan Indien austral et à interpréter les résultats en termes écologiques/biologiques. Disposer d'une meilleure vision globale de la répartition et du comportement des baleines bleues dans l'océan Indien austral est nécessaire pour mieux protéger ce grand mammifère des menaces nouvelles liées à l'accroissement des activités anthropiques. Dans un premier temps, ce chapitre dresse un bref historique de la chasse baleinière et de ces répercussions sur les populations de baleines bleues actuelles, puis présente les nouvelles menaces auxquelles l'espèce doit faire face de nos jours. Dans un second temps, il présente succinctement les méthodes de suivis



FIGURE 1.1 – Vue aérienne d'une baleine bleue, (photo Denis Pigot)

utilisées pour étudier l'évolution des populations de cétacés en s'intéressant plus particulièrement au suivi par acoustique passive. Ce chapitre décrit enfin la zone d'étude, les données exploitées dans ces travaux et l'état actuel des connaissances sur les baleines bleues qui peuplent l'océan Indien austral.

1.1 Les baleines bleues : décimées, protégées mais toujours menacées

1.1.1 Les débuts de la chasse

Le plus ancien témoignage de chasse à la baleine remonte à la préhistoire. A l'époque, les grandes baleines sont avant tout tuées pour leur viande. A partir du Moyen-Age, la chasse s'intensifie en Europe (Robineau, 2007). Elle prend une place prépondérante chez les populations Basques et devient source de richesse et de prospérité grâce à la revente de l'huile fabriquée à partir de la graisse des cétacés. La proie privilégiée des Basques est la baleine franche de l'Atlantique nord, ou baleine des Basques, maintenant appelée baleine noire (*Eubalaena glacialis*). Dès le 14^{ème} siècle, la diminution du nombre de baleines se fait ressentir et les marins vont alors étendre leur chasse vers le nord de l'océan

Atlantique. La chasse commerciale s'accroît encore avec l'arrivée dans cette course de nations telles que l'Allemagne, l'Angleterre et la Hollande. Au 18^{ème} siècle, les populations de baleines des Basques se résument à quelques centaines d'individus seulement et perdent leur intérêt aux yeux des chasseurs. Les Etats-Unis d'Amérique s'engagent à leur tour dans la chasse à la baleine au 19^{ème} siècle, et traquent une nouvelle proie de prédilection : le cachalot (*Physeter macrocephalus*). Tous les océans du globe sont dès lors parcourus à la recherche du précieux animal. Au milieu du 19^{ème}, la raréfaction des cachalots et la découverte du pétrole entraînent cependant un déclin de la chasse.

1.1.2 L'industrialisation de la chasse

Dès 1868, l'apparition de nouvelles technologies, comme le canon lance-harpon, marque le début de la chasse moderne. Les grands rorquals, pélagiques, rapides et puissants, jusqu'alors hors de portée des hommes, peuvent alors être chassés avec succès (Robineau, 2007). Les premières expéditions dans l'océan Austral datent de la fin du 19^{ème} siècle. Elles ont pour but d'évaluer les ressources baleinières et la rentabilité d'une chasse au large de l'Antarctique. De nombreux rorquals sont observés mais la rareté des baleines franches et le bilan financier désastreux des expéditions découragent les baleiniers d'explorer ces eaux pélagiques. Il faut attendre le début du 20^{ème} siècle et l'établissement de stations terrestres en Géorgie du sud pour voir la chasse prendre son essor en Antarctique. Au début, les proies des chasseurs sont majoritairement les baleines à bosses (*Megaptera novaeangliae*), qui fréquentent les zones côtières proches des stations. C'est la principale prise pendant près de 10 ans, jusqu'à la quasi-extinction du stock local. En 1910, les premiers navires-usines, principalement norvégiens, font leur apparition. Ils offrent la possibilité de d'extraire directement en mer les produits de la chasse (*i.e.* lard, viande, huile) et de les stocker tout en continuant à chasser. La traque peut alors se dérouler en haute mer et le nombre de captures, notamment de rorquals bleus et communs (*Balaenoptera physalus*) va s'accroître jusqu'à la fin des années 30.

1.1.3 La régulation de la chasse

Les prémices d'une réglementation de la chasse apparaissent au début du 20^{ème} siècle (Robineau, 2007). La communauté scientifique prend alors conscience que les méthodes d'exploitation sont barbares et mènent les baleines au bord de l'extinction. Les premiers accords internationaux pour limiter la chasse datent de 1931, mais les résultats sont décevants. En effet, ces traités autorisent la chasse d'individus immatures et peinent à imposer une limitation de la durée des expéditions et du nombre des navires-usines. Il faut attendre 1939 et le conflit mondial pour fournir une trêve aux cétacés. En 1949, au sor-

tir de la guerre, la Commission Baleinière Internationale (CBI ou International Whaling Commission, IWC) est fondée. Elle a pour but de prendre des mesures générales pour la protection des individus immatures et des espèces principalement menacées, la création de réserves naturelles et la définition de quotas de captures. Dans un premier temps, ces mesures sont peu efficaces et n'empêchent pas la diminution drastique des stocks. Les quotas de captures sont trop élevés par rapport à la taille des populations et la réglementation est facilement contournable. De plus, en réponse aux quotas, la capture d'un seul animal de grande taille devient plus rentable que celle de plusieurs animaux de plus petite dimension. C'est ainsi que la baleine bleue, le plus grand des cétacés, deviendra la première victime de la surexploitation de la chasse. Dans les années 60, le nombre de prises par navire baleinier diminue brusquement. Un comité scientifique est nommé par la CBI pour analyser ce phénomène. Leurs résultats publiés en 1963 dressent un portrait alarmant de la dynamique des populations de grandes baleines. Suite à ce constat, la CBI diminue les quotas annuels et, du fait de la raréfaction des proies, la chasse à la baleine devient une activité moins rentable et s'essouffle. Depuis les années 70, seuls quelques pays, comme le Japon, la Norvège et l'Islande continuent de chasser les grands rorquals, malgré la création en 1982 d'un moratoire sur l'interdiction de la chasse à but commercial.

1.1.4 Bilan de la chasse pour les baleines bleues

Des débuts de la chasse moderne en 1868 à l'abaissement drastique des quotas de chasse dans les années 1960, on estime à plus de 350 000 le nombre de baleines bleues tuées à l'échelle mondiale. D'après les chiffres des prises cumulées, au moins 11 000 baleines bleues sont tuées dans l'océan Atlantique entre la fin du 19^{ème} siècle et les années 1960. A la fin du 20^{ème} siècle, les études par photo-identification évaluent leur nombre à 1 500 individus dont seulement 1 000 serait matures (Thomas et al., 2016). En réponse à ces chiffres alarmant, le stock nord-Atlantique est listé comme vulnérable par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN ou International Union for Conservation of Nature, IUCN) (Reeves et al., 2003). Dans l'océan Pacifique nord, près de 9 000 baleines bleues sont tuées pendant la chasse. La plupart des prises sont relatées sur les côtes mexicaines, au sud de la mer de Béring et aux abords de la péninsule russes du Kamchatka (Rice, 1974; Brueggeman et al., 1985; Nishiwaki, 1966). La population du Pacifique nord-est est estimée à environ 2 000 individus en 1990 et celle de la côte mexicaine semble croissante (Calambokidis and Barlow, 2004; Barlow, 1994). Il n'existe à ce jour aucune estimation du nombre d'individus de la population dans l'océan Pacifique ouest. La plupart des prises déclarées dans le Pacifique du sud ont lieu le long des côtes chilienne, péruvienne et équatorienne (Clarke et al., 1978). Un recensement datant de 1997 dans les eaux économiques chiliennes estime le nombre d'individus à 303 (Williams et al., 2011).

L'océan Indien, région de rencontre entre les sous-espèces Antarctique et pygmée, a été un site de chasse privilégié par les baleiniers à partir de 1910. Le nombre annuel de prises de baleines bleues Antarctique, en bleu sur la Figure 1.2, atteint un record en 1930 de plus de 30 000 individus. La chasse marque un arrêt durant la seconde guerre mondiale

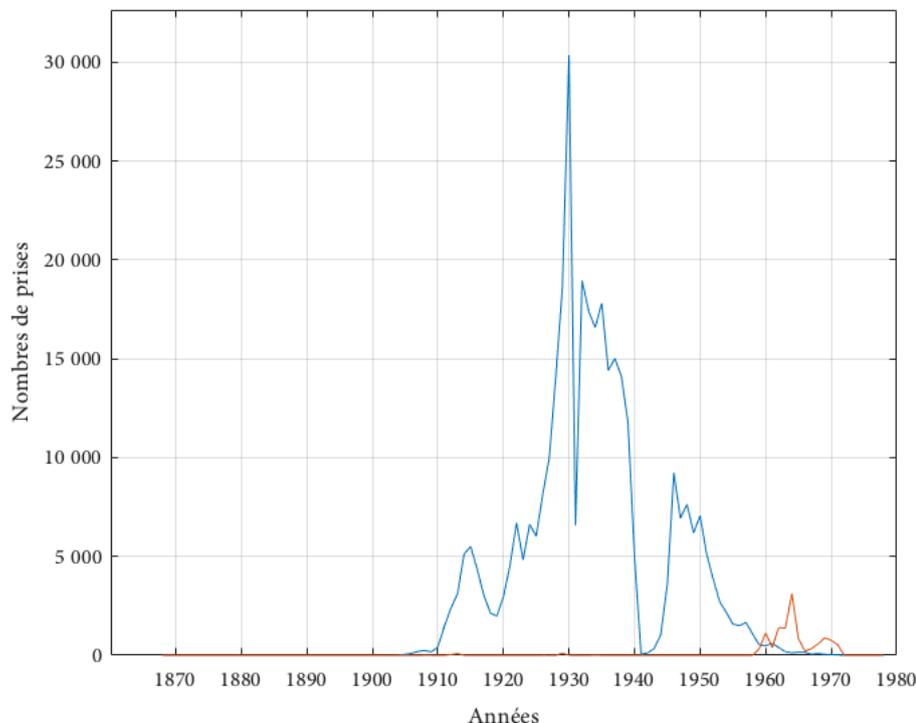


FIGURE 1.2 – Evolution du nombre de prises annuelles de baleines bleue Antarctique (bleue) et de baleines bleues pygmées (orange) dans l'océan Indien, d'après Branch et al. (2008, 2019). On distingue clairement les ralentissements de la chasse lors des deux guerres mondiales et après la crise de 1929.

mais reprend de plus belle entre 1945 et 1960. Le nombre de baleines bleues Antarctique, évalué à 239 000 avant la chasse, serait tombé à seulement 360 (Branch et al., 2004). L'estimation d'abondance la plus récente, basée sur une série de campagnes d'observation visuelle menées au sud du 60ème parallèle durant plusieurs étés australs de 1978 à 2007 (Branch and Butterworth, 2001), conclue à un accroissement des populations avec un décompte de 2 280 individus (Branch et al., 2004, 2007). Malgré cette tendance encourageante, la taille de la population atteint à peine 1% des chiffres initiaux. Sur ce constat alarmant, la baleine bleue Antarctique est déclarée en danger critique par l'UICN (Reilly, 2008). En 2019, ce statut est réévalué et l'espèce, montrant des signes de regain, est maintenant listée comme simplement en danger (Cooke, 2019). La sous-espèce pygmée n'a été clairement identifiée qu'en 1966 (Ichihara, 1966), après la plus grosse période de chasse intensive. La taille de leur population initiale, avant la chasse, est donc inconnue. D'après (Branch et al., 2007), cette sous-espèce n'aurait été chassée qu'à partir de la fin des années 1950 (Figure 1.2) et serait donc moins décimée que les baleines bleues Antarctique. Il est

néanmoins compliqué de différencier les prises de baleines bleues pygmées et Antarctiques, deux sous-espèces présentes dans l'océan Indien. De nos jours, les informations disponibles sur les baleines bleues pygmées sont encore trop parcellaires pour permettre à l'UICN de classer cette sous-espèce dans la liste rouge des espèces en danger.

1.1.5 Nouvelles menaces

Bien que l'arrêt de la chasse soit effectif depuis les années 70, l'accroissement des populations de baleines est freiné par de nouvelles pressions anthropiques. En premier lieu, les collisions avec des navires entraînent une mortalité importante chez les baleines bleues, en particulier le long de la côte ouest américaine où le trafic maritime est parmi le plus élevé au monde. Un modèle récent estime que près de 18 baleines bleues sont tuées chaque année dans cette région (Rockwood et al., 2017). Les collisions mortelles avec des navires sont également courantes autour du Sri Lanka, où l'habitat des baleines bleues recouvre l'une des plus grandes voies de navigation au monde (De Vos et al., 2016).

De nombreux cas d'enchevêtrement de baleines à fanons dans les engins de pêche abandonnés, perdus ou rejetés ont aussi été documentés (Cassoff et al., 2011; Knowlton et al., 2012; Moore and Van der Hoop, 2012). Cette menace semble moins importante pour les baleines bleues avec seulement quelques cas létaux rapportés, au large de la Californie et du Sri Lanka. Néanmoins, les enchevêtrements peuvent être une grande source de stress pour les animaux, pouvant diminuer leur succès reproductif ou leur durée de vie (Rolland et al., 2019). Les blessures produites par les enchevêtrements peuvent aussi affaiblir l'animal et le rendre plus vulnérable à d'autres causes de mortalité (Van der Hoop et al., 2017).

L'effet des polluants, des plastiques et des micro-plastiques sur les baleines bleues est encore inconnu. Comme cette espèce se nourrit de micro-organismes situés en bas du réseau trophique, il y a moins de risque d'accumulation de contaminant chimiques dans leur organismes (O'Shea and Brownell Jr, 1994). Cependant, les baleines à fanons sont très sensibles aux micro-plastiques en raison de leur système de filtration de petites particules de nourriture grâce aux fanons. La grande quantité de micro-plastiques mesurée chez les rorquals communs de Méditerranée (Fossi et al., 2012) et chez des baleines à bosse (Besseling et al., 2015) suggère que les baleines bleues sont aussi très exposées à cette nouvelle source de pollution.

Les sources de bruit anthropique sont nombreuses : trafic maritime, tirs sismiques, sonars et explosifs militaires. En plus de masquer les vocalisations des animaux (Clark et al., 2009), l'exposition au bruit anthropique est à l'origine d'un certain nombre de réactions comportementales, notamment observées chez les mysticètes :

- changements de comportement de nage et de plongée (Castellote et al., 2012; Dunlop et al., 2018),
- perturbations des comportements de recherche de nourriture, de repos et de socialisation (Hildebrand, 2009),
- déplacement de l'habitat (Weilgart, 2007; Davis et al., 2017),
- perte de l'audition (Southall et al., 2009).

L'observation d'échouages de cétacés coïncidant avec des émissions de bruits de forte intensité lors de tests de sonars militaires suggère même que la pollution sonore serait létale.

Le réchauffement et l'acidification des océans peuvent aussi affecter le bon état de santé et la répartition géographique du krill, la source principale de nourriture des baleines bleues (Roemmich and McGowan, 1995; Kawaguchi et al., 2011), entraînant alors un déplacement de l'habitat de ces dernières. De plus, la surpêche du krill, pour la fabrication de nombreux produits tels que l'huile ou la nourriture pour animaux de compagnie, devient une réelle menace. La raréfaction de ces micro-organismes pourrait avoir des conséquences désastreuses sur l'état de l'ensemble de l'éco-système austral. En particulier, privées de leur source d'alimentation principale, les baleines bleues se trouveraient vulnérables et leurs capacités de reproduction réduites, avec pour conséquence un déclin des populations.

Dans un but de conservation et de protection, il est aujourd'hui nécessaire de combler le manque d'information sur le rétablissement des populations de baleines bleues et leur évolution, et de mieux comprendre les effets des nouvelles pressions anthropiques qui menacent à nouveau cette espèce. Pour tenter de répondre à ces problématiques, l'approche par acoustique passive s'avère performante ; tirant parti du comportement vocal intense des mammifères marins, elle permet de surveiller sur le long-terme et en continu de vastes régions de l'océan.

1.2 Etudier les mammifères marins par acoustique passive

Les densités de populations et les aires de répartition des cétacés ont initialement été déduites des données de captures rapportées par les baleiniers. Après l'arrêt de la chasse, les méthodes d'observations visuelles ont pris le relais. Mais en dépit des efforts importants déployés pour organiser et mener des campagnes d'observation, cette approche

a montré ses limites. La raréfaction des individus, le temps très bref qu'ils passent à la surface et l'étendue de leur aire de répartition, rendent cette méthode très difficile à mettre en oeuvre et incomplète. En outre, les observations ne sont possibles que lorsque les conditions climatiques (ou de mer) le permettent, et uniquement de jour. L'acoustique passive pallie alors avantageusement ces inconvénients.

1.2.1 L'acoustique passive

Dans l'océan, les ondes acoustiques se propagent vite (environ 1500 m/s, soit 5 fois plus vite que dans l'air) et sur de grandes distances. Pour s'adapter à ce milieu quasiment imperméable à la lumière, les mammifères marins ont développé une activité vocale intense. Cette particularité incitera donc les scientifiques à étudier ces animaux à l'aide d'enregistrements acoustiques. L'acoustique passive permet de surveiller de façon non-invasive les animaux par toutes conditions de luminosité (Zimmer, 2011). Cette approche nécessite toutefois des observations préalables conjointes visuelles et acoustiques afin de pouvoir associer un son à un animal et ainsi documenter leurs répertoires acoustiques. Alors, à partir d'enregistrements acoustiques seuls, il est possible d'identifier les espèces fréquentant la zone d'écoute. Le principe d'une expérience d'acoustique passive est décrit sur la Figure 1.3. Les capteurs acoustiques sous-marins enregistrent le paysage sonore am-

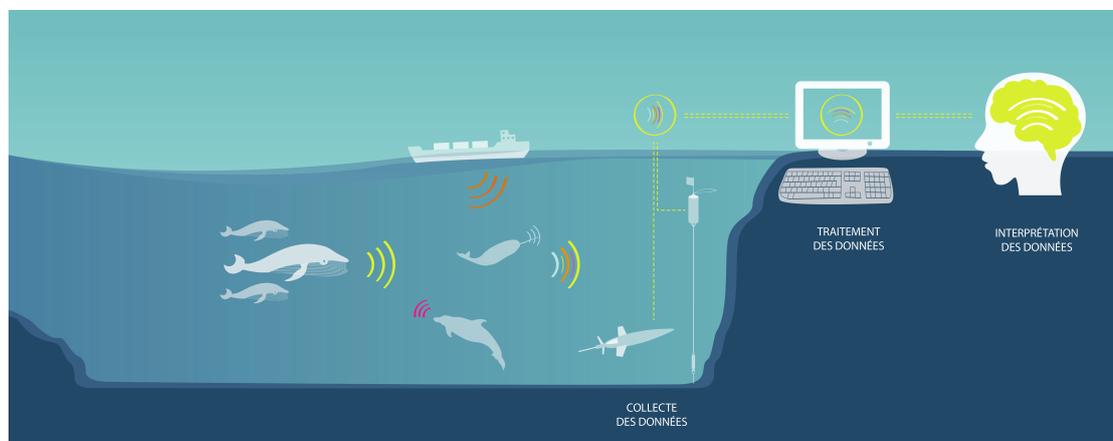


FIGURE 1.3 – Elements d'une expérience de surveillance par acoustique passive.

biant et généralement, les données sont stockées dans la mémoire interne de l'instrument et sont collectées lors de sa récupération. Elles peuvent aussi être transmises en temps réel par câble sous-marin, par radio, ou par satellite. En fonction des questions écologiques, plusieurs protocoles de mesures acoustiques peuvent être mis en oeuvre. Les plus courants sont de monter des hydrophones sur des mouillages fixes, des sismomètres fond de mer, des véhicules flottants ou sous-marins, ou sur des balises directement fixées sur l'animal (Mellinger et al., 2007). C'est en général durant le post-traitement que les vocalisations de cétacés sont détectées et identifiées parmi le bruit ambiant (voir Chapitre 2).

1.2.2 La communication acoustique chez les mammifères marins

Tous les mammifères marins utilisent le son pour s'orienter, chasser ou communiquer. Les odontocètes, ou cétacés à dents (*e.g.* orque, dauphin, marsouin), émettent généralement dans les hautes fréquences, de 1kHz à 200 kHz. Ils produisent 2 types de signaux sonores : les clics, signaux très courts et large bande, souvent émis en groupes (trains de clics) et utilisés pour l'écholocation, c'est-à-dire pour sonder le milieu et repérer des obstacles ou des proies ; et les sifflements, utilisés pour la communication entre individus (Richardson et al., 2013).

Les vocalisations des mysticètes sont divisées en deux catégories : les chants et les sons sociaux (Clark, 1990). Un chant est défini comme une séquence de notes formant un motif répété régulièrement. De nombreuses espèces d'oiseaux émettent des chants, en général pour séduire les femelles ou marquer leur territoire. Chez les mammifères en revanche, seules quelques espèces de singes et de baleines chantent (Geissmann, 2002; Clark, 1990). Quatre espèces de baleines à fanons émettent des chants : la baleine bleue (Alling et al., 1991), le rorqual commun (Watkins et al., 1987), la baleine boréale (*Balaena mysticetus*) (Ljungblad et al., 1982) et la baleine à bosse (Payne and McVay, 1971), certainement la plus étudiée. Chez cette dernière, les chants sont uniquement produits par les mâles, principalement en hiver lors de leur présence dans les eaux sub-tropicales. Le rôle exact des chants n'est pas encore exactement établi, même si la recherche d'une partenaire est l'hypothèse la plus probable. Les chants seraient alors une forme de message contenant des informations sur les aptitudes reproductives du mâle dans le but à la fois d'attirer les femelles et de tenir les autres mâles à distance (Helweg et al., 1992; Cholewiak, 2008).

Les sons sociaux, quant à eux, sont produits par de nombreux oiseaux et mammifères. Ils ont généralement une structure acoustique simple : ils sont courts, comportent peu de notes et sont partagés par tous les individus d'une même espèce (*i.e.* mâles, femelles et juvéniles de toutes les populations ; (Kondo and Watanabe, 2009)). On différencie deux types de sons sociaux : les sons agonistiques et les sons affiliatifs. Les premiers comprennent, par exemple, les signaux d'alarmes, en cas de danger, et de répulsion, en cas de menace et sont utilisés lors d'interactions hostiles (Evans et al., 1995). Les vocalisations affiliatives au contraire, sont émises envers des congénères ayant une relation d'affiliation comme des partenaires sexuels ou les membres d'un même groupe social. Les vocalisations d'alimentation rentrent dans cette catégorie. Elles sont émises dans un contexte de présence de nourriture afin d'attirer des congénères (Evans and Marler, 1994). Autre type de vocalisation affiliative, la vocalisation de contact contient diverses informations sociales pouvant être de différents ordres : reconnaissance individuelle (Tyack, 1997), reconnaissance du partenaire sexuel (principalement chez les espèces monogames) (Wanker

and Fischer, 2001) ou encore d'un membre de la famille comme la progéniture (Charrier et al., 2003). Les sons sociaux ont été étudiés chez plusieurs espèces de mysticètes. La baleine à bosse produit un large répertoire de vocalisations dites « sociales » durant sa migration (Dunlop et al., 2007), sur ses lieux d'alimentation (Thompson et al., 1977) et d'hivernage (Silber, 1986). Contrairement aux chants, ces vocalisations sont émises de manière erratique, c'est-à-dire de façon variable, sans motif continu. Elles sont générées par les mâles, les femelles et les juvéniles, généralement dans un contexte social (*i.e.* parmi des groupes de mâles escortant une femelle ou entre une mère et sa progéniture) (Zoidis et al., 2008). Ces sons ont été associés à des comportements alimentaires (Fournet et al., 2018) et à des interactions agressives (Silber, 1986) ou passives (Zoidis et al., 2008). Plusieurs hypothèses sont émises quant à leur fonction : les sons sociaux pourraient être un indicateur de l'état de motivation ou du niveau d'excitation de l'animal (Dunlop, 2017). Ils pourraient aussi favoriser des comportements alimentaires coopératifs, ou le contact entre les individus affiliés tels que les mères et leur progéniture (Indeck et al., 2020). La reconnaissance individuelle à l'aide de vocalisations n'a pas clairement été démontrée chez les mysticètes. Néanmoins, des études sur la baleine à bosse (Hafner et al., 1979) et sur la baleine franche de l'Atlantique nord (McCordic et al., 2016) suggèrent que certaines vocalisations contiennent des informations relatives à l'émetteur (*e.g.* sexe, taille, etc).

1.2.3 Les vocalisations de la baleine bleue

A l'instar des baleines à bosses, seuls les mâles baleine bleue émettent des chants (McDonald et al., 2001), définis comme des séries de longues vocalisations stéréotypées (>15 secondes) basses fréquences (20-100 Hz) et de forte intensité (> 180 dB ref 1 μ Pa)). Typiquement, une vocalisation est composée de deux à quatre unités qui peuvent être pulsées ou tonales, et répétées à intervalle régulier. Chaque série de vocalisations est interrompue par un intervalle de temps plus long d'environ une dizaine de minutes, dit intervalle inter-série, durant lequel la baleine remonte à la surface pour respirer (Cummings and Thompson, 1971). Ces paramètres descriptifs sont illustrés sur la Figure 1.4 pour le chant à deux unités de la baleine bleue pygmées de Madagascar. Une représentation des vocalisations dans le domaine temps-fréquence est généralement plus parlante qu'une représentation standard en temps-amplitude ; on y distingue aisément les différentes unités, leur durée, leur fréquence, leurs harmoniques et les intervalles qui les séparent (Figures 1.4 et 1.6).

Le chant des baleines bleues fournit un bon indicateur pour discerner les sous-espèces et populations (McDonald et al., 2006). Il existe neuf chants distincts, dont quatre proviennent des sous-espèces Antarctique et pygmées peuplant l'océan Indien. La Figure 1.5 montre la distribution géographique des chants des baleines bleues dans le monde.

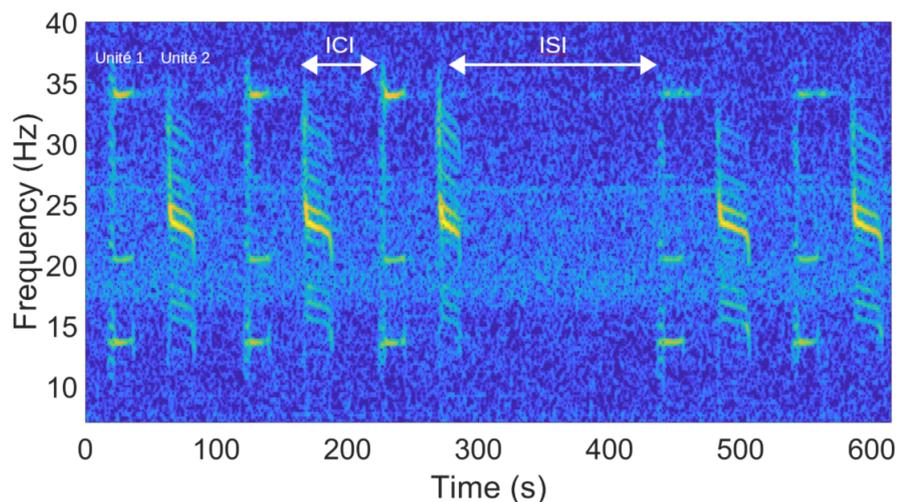


FIGURE 1.4 – Spectrogramme de séries de vocalisations stéréotypées d'une baleine bleue pygmée de la population de Madagascar. ICI : intervalle inter-vocalisation (ou *inter-call-interval*); ISI : intervalle inter-séries ou *inter-serie-interval*

Les chiffres 6, 8 et 9 correspondent respectivement aux baleines bleues Antarctique, aux baleines bleues pygmées de la population d'Australie (baleine bleue pygmée de l'est du bassin Indien) et de la population de Madagascar (baleine bleue pygmée de l'ouest du bassin Indien), étudiées dans cette thèse.

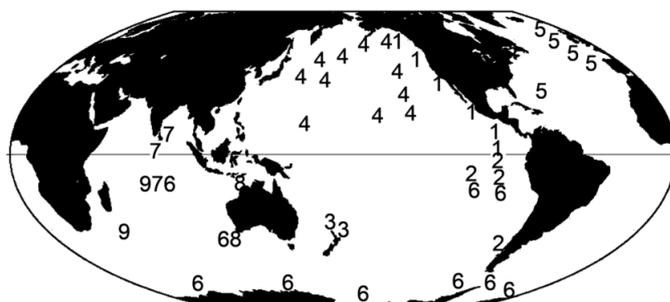


FIGURE 1.5 – Répartition des populations de baleines bleues en fonction de leur chant. Chaque chiffre correspond à une population distincte et son emplacement à un lieu où son chant a été enregistré. La baleine bleue Antarctique (6) est présente dans tout l'océan austral. Dans l'océan Indien, s'ajoute la sous-espèce des baleines bleues pygmées de type Madagascar (9), Australie (8) et Sri Lanka (7). Dans le Pacifique, sont répertoriées les populations du nord-est (1), du nord-ouest (4), les sous-espèces de baleines bleues pygmées du Chili (2) et de Nouvelle-Zélande (3) et une unique population enregistrée dans l'Atlantique nord (5). D'après (McDonald et al., 2006)

La durée d'une vocalisation de la baleine bleue Antarctique, (Figure 1.6 (a)), est d'environ 26 secondes et comprend trois unités tonales qui s'enchaînent sans silence (Ljungblad et al., 1998). La première unité, ou unité A, est un son de fréquence constante à 28 Hz durant 8 à 12 secondes. Elle est suivie d'une diminution en fréquence de 28 à 20 Hz pendant 1 à 2 secondes puis de l'unité B, légèrement modulée en fréquence de 20 à 18

Hz. En raison de leur forme en 'Z' dans le plan temps-fréquence, ces vocalisations sont appelées vocalisations en 'Z' ou *Z-call* en anglais.

La vocalisation de la baleine bleue pygmée de la population de Madagascar (Figures 1.4 et 1.6 (b)) comprend deux unités (Ljungblad et al., 1998). La première est un son tonal de 38 Hz qui dure 10-12 secondes. Elle est suivie 25 secondes plus tard, par un son modulé en fréquence allant de 28 à 15 Hz, qui devient tonal les 15-20 secondes finales. Les unités tonales sont accompagnées d'harmoniques.

La vocalisation de la baleine bleue pygmée de la population d'Australie (Figure 1.6 (c)) est composée de 3 unités (McCauley et al., 2001). La première est un son tonal à 19 Hz, qui saute après 21 secondes à 21 Hz et dure encore 22 secondes. La deuxième unité suit 5 à 10 secondes plus tard. C'est un son modulé en fréquence qui débute à 20 Hz et augmente jusqu'à atteindre 26 Hz au bout de 23 secondes. La dernière unité arrive 23 secondes plus tard. C'est une note tonale à 18-19 Hz, qui dure de 26 à 48 secondes. Toutes ces unités présentent aussi des harmoniques à plus hautes fréquences.

Parfois, la superposition de nombreuses vocalisations émises simultanément et à distance de l'hydrophone génère un bruit de forte intensité dans la bande de fréquence des vocalisations en question, appelé chorus (Figure 2.1 du chapitre 2)

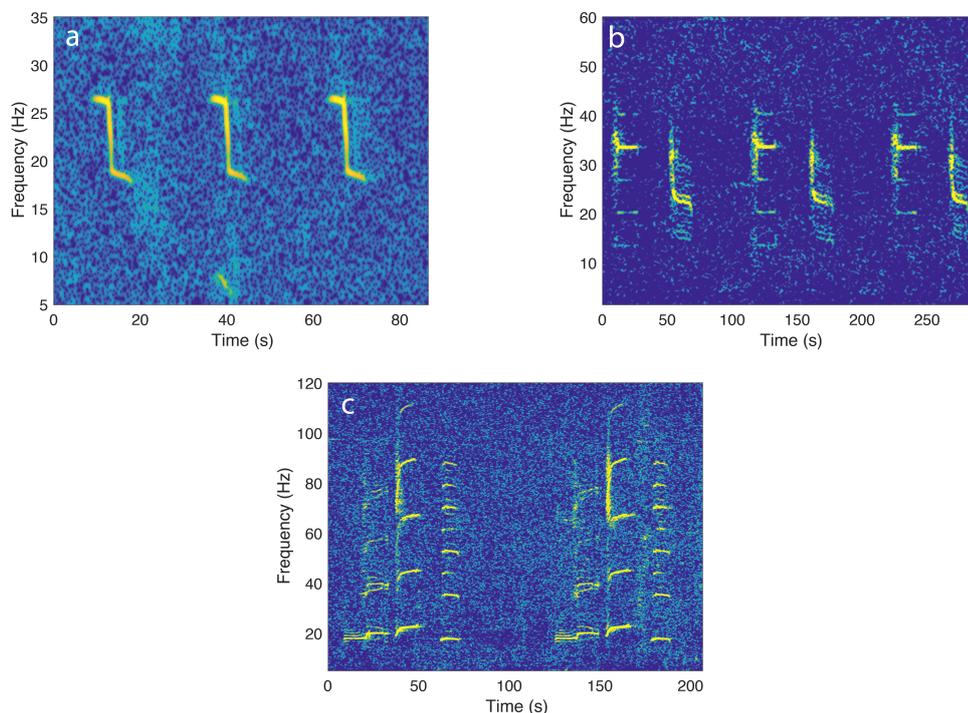


FIGURE 1.6 – Spectrogrammes des vocalisations stéréotypées enregistrées dans l’océan Indien austral formant les chants des baleines bleues (a) Antarctique, (b) pygmées de Madagascar, (c) pygmées d’Australie.

Ces chants sont considérés comme stables dans le temps. Ils n’évoluent que très peu aux fils de saisons et des années, mis à part une légère diminution long-terme en fré-

quence des vocalisations mise en évidence chez toutes les populations de baleines bleues de l'océan Indien (Leroy et al., 2018a). Le rôle de ces chants n'est pas encore totalement compris, mais comme chez les baleines à bosse, ils jouent certainement un rôle dans la recherche de partenaire (McDonald et al., 2001; Oleson et al., 2007a). Leur détection sur des zones d'alimentation (e.g. Širović et al. (2009); Thomisch et al. (2016)) laisse cependant penser qu'ils répondent aussi à un autre usage, tel que l'aide à la navigation ou à la détection de proies (Clark and Clapham, 2004).

Le premier enregistrement de vocalisations non-stéréotypées chez la baleine bleue, alors appelé *FM downswEEP call* en anglais, date de 1987 dans le Golfe de Californie (Thompson, 1996). En 1995-1996, des vocalisations semblables sont enregistrées au sud des côtes australiennes et sont probablement émises par des baleines bleues pygmées d'Australie (Ljungblad et al., 1997). Au cours des années 1990 et 2000, ces vocalisations, maintenant également appelées *D-calls* (McDonald et al., 2001), sont enregistrées pour la baleine bleue dans le Pacifique-est (McDonald et al., 2001) et nord (Stafford et al., 2001) et en Atlantique (Mellinger and Clark, 2003; Nieukirk et al., 2004). Ces mêmes sons ont été enregistrés en présence de baleines bleues Antarctique dans l'océan Austral (Miller et al., 2019), au sud de la Nouvelle-Zélande (Rankin et al., 2005), au sud de l'Atlantique (Širović et al., 2006) et le long des côtes sud-africaines (Shabangu et al., 2019). Dans l'océan Indien austral, des *D-calls* associés à la présence acoustique de baleines bleues pygmées de Madagascar ont été détectés autour de l'archipel de Crozet Samaran et al. (2010a). Des *D-calls* émis par des baleines bleues pygmées de Nouvelle-Zélande ont également été enregistrés (McDonald et al., 2006).

Les *D-calls* sont décrits comme des signaux courts, modulés en fréquence. Ils durent en moyenne 2 secondes (entre 1 et 8 secondes), commencent à une fréquence 56-85 Hz, augmentent rapidement en fréquence pour atteindre un court plateau (à environ 70Hz) puis redescendent en fréquence pour atteindre la bande 25-54 Hz. Les *D-calls*, contrairement aux autres vocalisations de baleines bleues, ne sont pas stéréotypés, comme le montre la série de 5 *D-calls* de la Figure 1.7, extraite d'un enregistrement de l'océan Indien. Ces vocalisations sont émises de façon irrégulière, parfois très rapprochées (quelques secondes d'intervalle) ou alors totalement isolées (Mellinger and Clark, 2003; Nieukirk et al., 2004).

Contrairement aux chants des baleines bleues, les *D-calls* seraient produits sans distinction par les mâles et les femelles (Oleson et al., 2007b) et n'ont pas de signature temps-fréquence spécifique à chaque population. Seule une poignée d'études, principalement dans les zones d'alimentation du sud de la côte californienne, ont examiné le contexte comportemental dans lequel étaient émis les *D-calls*. Elles suggèrent toutes que leur émission serait liée à des comportement sociaux (Oleson et al., 2007c; Lewis and Širović, 2017; Szesciorka et al., 2020). Des enregistrements provenant de balises acous-

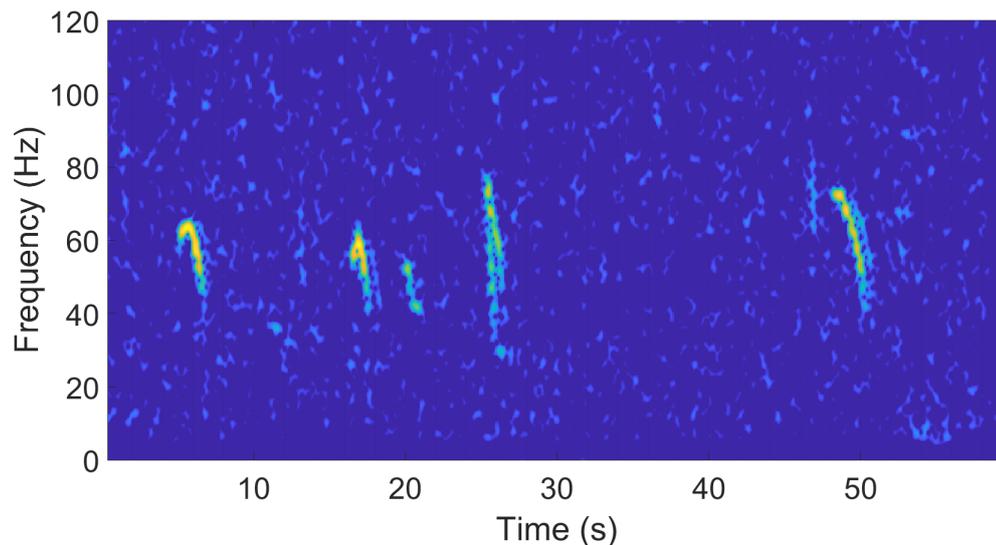


FIGURE 1.7 – Spectrogramme d'une série de 5 D-calls enregistrés dans l'océan Indien austral (au site WKER en 2015).

tiques directement fixées sur le dos de baleines bleues du Pacifique nord ont montré que des D-calls étaient émis lors de plongées peu profondes entre des plongées d'alimentation plus profondes (Oleson et al., 2007b; Lewis et al., 2018). Cette vocalisation pourrait alors avoir la fonction d'attirer des congénères sur des zones propices à l'alimentation ou de maintenir la communication entre des individus proches. La détection élevée de D-calls en Antarctique, aire d'alimentation des baleines bleues Antarctique, étaye l'hypothèse que cette vocalisation est utilisée dans un contexte d'alimentation (Miller et al., 2019). Dans l'estuaire du Saint-Laurent et le long de la côte chilienne, des D-calls ont également été détectés chez des couples de baleines bleues rejoints par un second mâle et s'engageant dans des comportements de surface actifs, probablement liés à la compétition entre mâles (Schall et al., 2019). Dans ce contexte, les D-calls maintiendraient la cohésion entre la première paire de baleines bleues.

1.3 Les baleines bleues dans l'océan Indien austral

1.3.1 Une zone d'étude, deux océans

L'océan Indien, troisième océan du globe par sa taille, s'étend sur une surface de 75 millions de km², soit près de 21% de la surface terrestre. Contrairement aux océans Atlantique et Pacifique, l'océan Indien n'a pas de frontière avec la zone polaire Arctique. Il est bordé à l'ouest par l'Afrique et la péninsule Arabique, au nord par l'Asie (Iran, Pakistan et Inde) et à l'est par la Birmanie, la Thaïlande, la Malaisie, l'Indonésie et l'Australie. Par convention, il est séparé de l'océan Atlantique à la longitude du cap des Aiguilles (20°E)

et de l'océan Pacifique à la longitude de l'île de Tasmanie (147°E ; Figure 1.8).

Au sud, il est géographiquement limité par l'océan austral à partir du 60^{ème} parallèle sud, ou par l'Antarctique selon les définitions. L'existence de l'océan Austral n'est pas universellement reconnue. En termes géopolitiques, il correspond aux portions des océans Atlantique, Pacifique et Indien qui entourent l'Antarctique, à partir de 60°S. En revanche, en termes océanographiques, la limite nord de l'océan austral se définit par la confrontation des eaux antarctiques froides avec les eaux tropicales sub-antarctiques plus chaudes. Dans l'océan Indien, cette limite, appelée convergence Antarctique ou zone frontale se situe autour de la latitude 45°S (Laws, 1985).

Notre zone d'étude s'étend de 24° S à 56° S et de 52° E à 83° E et couvre donc à la fois l'ouest et le centre de l'océan Indien, sous le tropique du Capricorne, et la partie nord de l'océan austral.

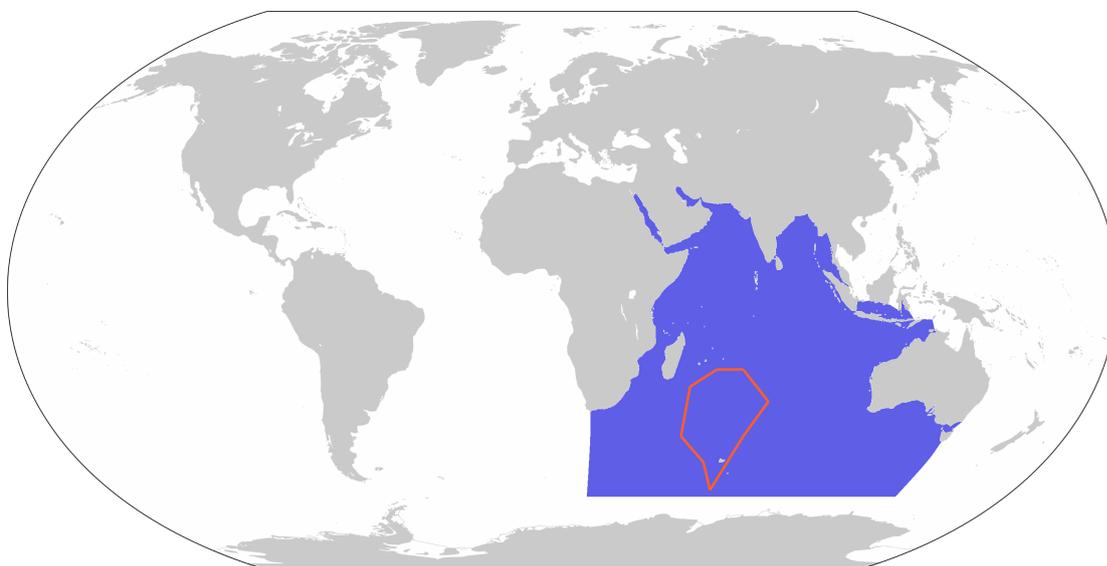


FIGURE 1.8 – Limites de l'océan Indien selon l'Organisation Hydrographique Internationale. En rouge, les limites de la zone d'étude de cette thèse (cf. Figure 1.9).

1.3.2 Les données de la thèse : le réseau OHASISBIO

Les données acoustiques utilisées dans cette thèse proviennent du réseau d'hydrophone OHASISBIO (Observatoire HydroAcoustique de la SISmicité et de la BIODiversité) situé dans le sud ouest de l'océan Indien (Figure 1.9). L'objectif de cet observatoire est double : étudier la sismicité des dorsales de l'océan Indien (Tsang-Hin-Sun, 2017; Lecoulant et al., 2019) et approfondir les connaissances sur la présence des grandes baleines dans la région (Leroy, 2017). Le réseau a été déployé en décembre 2009 et est toujours en place à ce jour. Entre 2010 et 2016, l'observatoire comprenait cinq mouillages permanents, situés au sud de l'île de la Réunion (MAD), au nord de l'archipel de Crozet

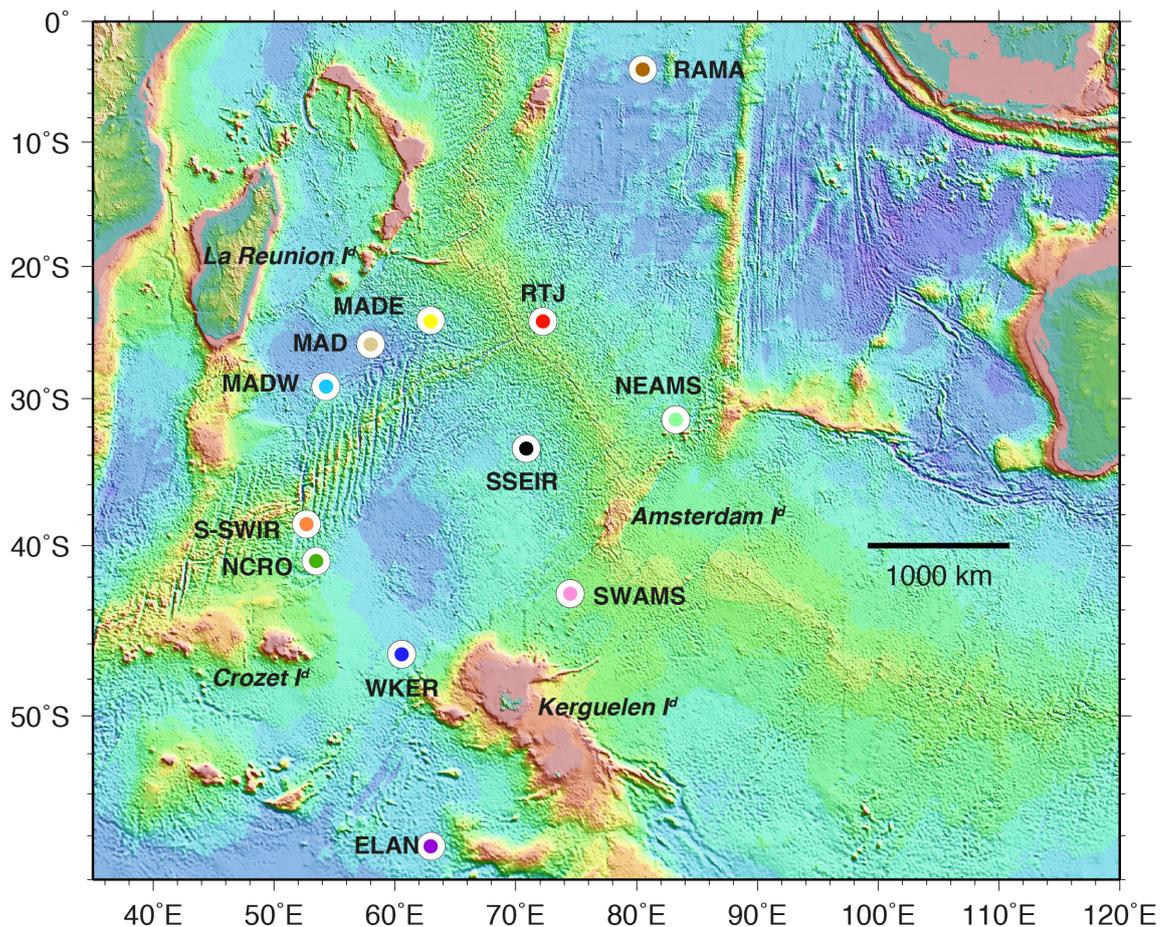


FIGURE 1.9 – Répartition des sites d'écoute du réseau OHASISBIO sur fond de carte bathymétrique de l'océan Indien austral. Les emplacements des sites sont indiqués par des points de couleurs.

(NCRO), au nord-ouest de l'île de Kerguelen (WKER), et au sud-ouest et nord-est des îles St Paul et Amsterdam (respectivement SWAMS et NEAMS). En 2012, un mouillage temporaire a été déployé légèrement au sud de l'Equateur, dans le bassin central Indien, à l'est de l'archipel Diego Garcia (RAMA). Il sera retiré l'année suivante. Depuis 2014, un nouveau site situé au sud de la dorsale sud-est indienne est instrumenté (SSEIR). En 2017, la géométrie du réseau est repensée pour améliorer la couverture au nord de la zone et affiner la localisation des aires d'hivernage des baleines bleues. Pour cela, trois nouveaux sites sont instrumentés : MADW, MADE, de chaque côté du précédent mouillage MAD et RTJ à la jonction des trois dorsales de l'océan Indien. Le nouveau site SSWIR, au sud de la dorsale sud-est indienne remplacera le mouillage NCRO et un site supplémentaire (ELAN) est instrumenté à 56° S, au sud-ouest du plateau de Kerguelen, pour compléter la couverture au sud du réseau. A partir de 2017, les mouillages des sites MAD et NCRO ne sont plus déployés. La plupart des sites sont équipés d'un seul hydrophone, mais des triplets ont été déployés temporairement à certains sites. En 2010 et 2011, des triplets formant des triangles de 30 km de côté sont installés à NCRO et WKER. En 2012 et 2013, seul le triplet de WKER est maintenu. Au début de l'année 2014, il est déplacé

au site SWAMS et réduit à un triangle de seulement 10 km de côté. De plus, en 2015 et 2016, le site SWAMS est équipé de deux instruments ultra basses-fréquences sur la même ligne de mouillage, l'un en profondeur et l'autre proche de la surface, mais seul les enregistrements du mouillage situé en profondeur seront examinés.

Chaque ligne de mouillage est composée d'un lest, d'un largueur acoustique, d'une ligne de longueur ajustable et d'une bouée immergée, dans laquelle se trouve l'hydrophone (Figure 1.10). Celui-ci est immergé entre 1 000 et 1 300 mètres de la surface, dans

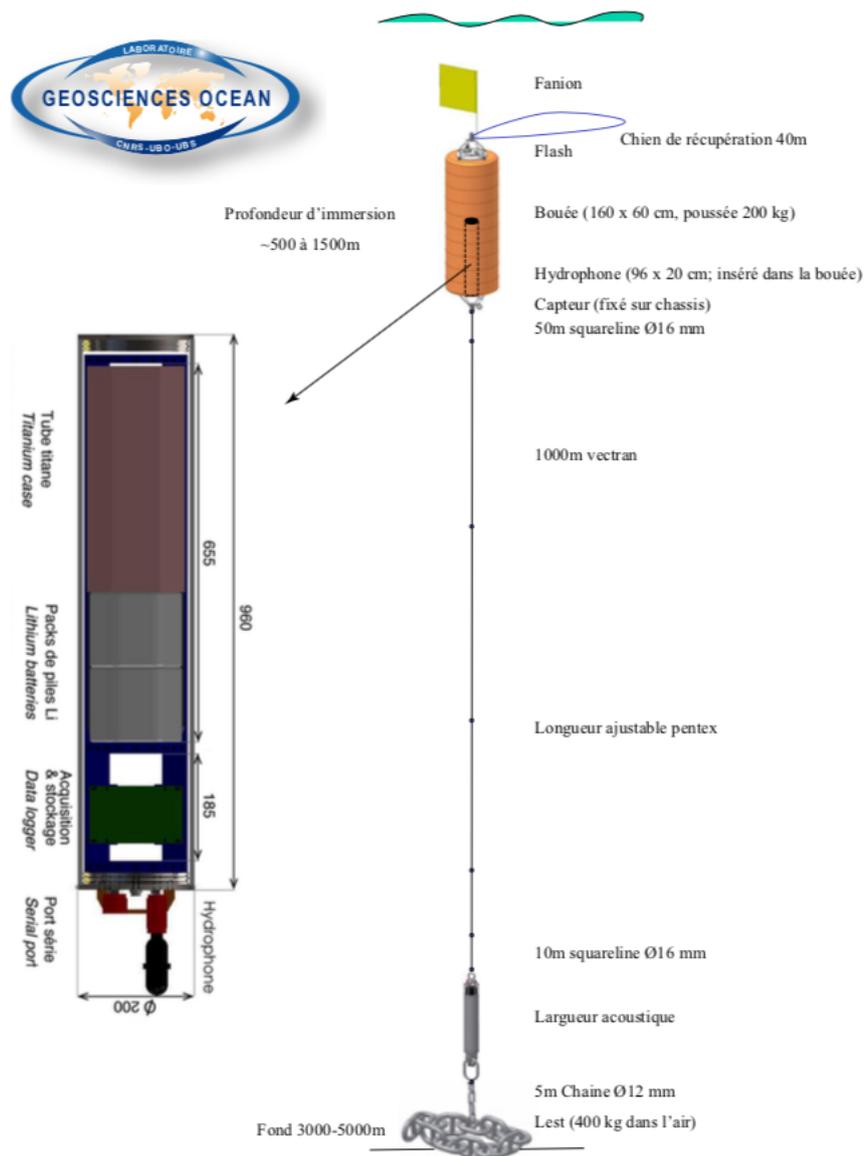


FIGURE 1.10 – Schéma d'une ligne de mouillage typique du réseau OHASISBIO.

l'axe du canal SOFAR (SOund Fixing And Ranging). Ce canal fonctionne comme un guide d'ondes dans lequel les basses fréquences peuvent se propager sur de très grandes distances avec une faible atténuation (Lurton, 2002). Les enregistrements sont continus à une fréquence d'échantillonnage de 240 Hz. La sensibilité des hydrophones est de -163.5

dB ref. 1V/ μPa , sauf pour les mouillages doubles à SWAMS en 2015 et 2016, dont la sensibilité est de -168.6 dB ref. 1V/ μPa . Les batteries des instruments sont prévues pour durer un an, pour permettre une récupération tous les janvier/février lors d'une rotation du R/V Marion Dufresne 2 dans les Terres Australes et Antarctique Françaises (TAAF). Cependant, il arrive parfois que l'acquisition de données s'arrête plus tôt que prévu, en raison d'un épuisement prématuré des batteries. Le Tableau 1.1 et la Figure 1.11 récapitulent les coordonnées de chaque site de mouillage ainsi que les périodes d'enregistrement.

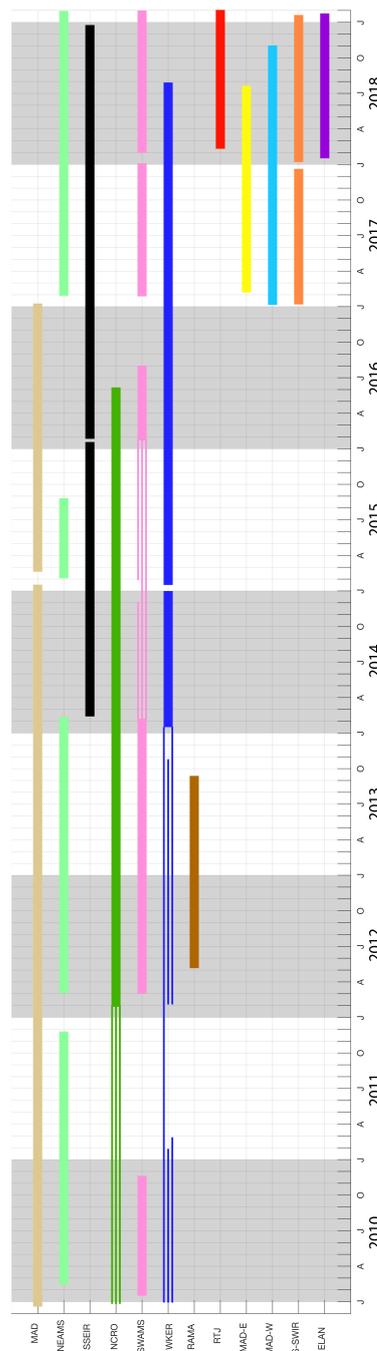


FIGURE 1.11 – Planning d'enregistrement

TABLE 1.1 – Périodes d'enregistrements acquis par les hydrophones du réseau OHASISBIO avec : nom et coordonnées géographiques des sites ; dates de début et de fin d'enregistrement . Un '—' indique un enregistrement continu sur plusieurs années ; un 'x' indique une absence d'enregistrement. Les dates en rouge indiquent les années de données non exploitées dans ces travaux. Les dates en bleu indiquent les données exploitées des triplets d'hydrophones.

Site	Geo. Coord.	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
		Start	Stop																
MAD	26°05'S, 058°08'E	20/12/09	19/02/11	19/02/11	09/03/12	10/03/12	09/03/12	09/03/13	16/02/14	16/02/14	18/01/15	18/02/15	28/01/16	29/01/16	09/01/17	x	x	x	x
NEAMS	31°35'S, 083°14'E	13/02/10	—	—	25/11/11	04/03/12	04/03/13	04/03/13	10/02/14	x	x	4/02/15	25/08/15	x	x	31/01/17	05/02/18	05/02/18	29/01/19
SSEIR	33°30'S, 70°30'E	x	x	x	x	x	x	x	x	13/02/14	04/02/15	05/02/15	18/01/16	25/01/16	04/02/17	04/02/17	08/02/18	08/02/18	23/12/18
NCRO 1	41°00'S, 52°49'E	25/12/09	19/01/11	20/01/11	30/01/12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NCRO 2	41°00'S, 53°10'E	25/12/09	20/01/11	21/01/11	31/01/12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NCRO 3	41°14'S, 52°59'E	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	08/01/16	06/06/16	x	x	x	x
SWAMS	42°59'S, 74°35'E	17/01/10	21/11/10	x	x	29/02/12	27/02/13	28/02/13	07/02/14	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
SWAMS 1	42°02'S, 74°36'E	x	x	x	x	x	x	x	07/02/14	02/12/14	27/01/15	20/01/16	21/01/16	01/08/16	28/01/17	06/01/18	31/01/18	30/01/19	
SWAMS 2	42°58'S, 74°31'E	x	x	x	x	x	x	x	07/02/14	27/01/15	27/01/15	20/01/16	x	x	x	x	x	x	x
SWAMS 3	42°57'S, 74°39'E	x	x	x	x	x	x	x	08/02/14	27/01/15	27/01/15	21/01/16	21/01/16	27/11/16	x	x	x	x	x
WKER 1	46°38'S, 60°07'E	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	x	x	x	x	x	x
WKER 2	46°34'S, 60°31'E	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	16/01/15	01/08/16	12/01/16	20/01/17	20/01/17	19/01/18	19/01/18	28/07/18
WKER 3	46°50'S, 60°24'E	28/12/09	25/01/11	25/01/11	26/02/11	03/02/12	16/02/13	16/02/13	16/01/14	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RAMA	03°50'S, 80°30'E	x	x	x	x	05/05/12	—	—	11/12/13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RTJ	24°15'S, 72°15'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11/02/18
MADE	24°11'S, 63°01'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	07/02/17	13/02/18	13/02/18	21/07/18
MADW	29°03'S, 54°16'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	06/01/17	06/01/18	06/01/18	3/11/18
S-SWIR	38°33'S, 52°53'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	08/01/17	22/12/17	09/01/18	14/01/19
ELAN	56°28'S, 62°59'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	16/01/18

Les données collectées n'ont pas toutes été traitées (cf. dates en rouge dans le Tableau 1.1). Les enregistrements du site NCRO en 2010 et 2013 étaient trop bruités pour permettre une analyse robuste. Les données de SWAMS 2010 n'ont pas pu être exploitées en raison de l'absence de date de début d'enregistrement dans l'entête des fichiers. Les détections dans les enregistrements de SWAMS2 en 2017 n'ont pas été retenus dans nos analyses (cf. section 2.1.5). Plus généralement, pour les données des triplets, les enregistrements d'un seul hydrophone ont été exploitées (dates en bleu dans Tableau 1.1), après avoir vérifié que tous les enregistrements des triplets présentaient des résultats de détection similaires (cf. section 2.1.5). A NCRO c'est le mouillage 2, le moins bruité, qui a été retenu en 2011. Le mouillage 1 a été retenu pour WKER entre 2010 et 2013. Enfin à SWAMS, les enregistrements du mouillage 2 en 2014 et ceux du mouillage 1 en 2015 et 2016 ont été traités.

Un spectrogramme annuel, comme celui de la Figure 1.12, calculé à partir des données du site SWAMS2 en 2014, permet d'avoir un aperçu général des espèces présentes dans les enregistrements et de leur saisonnalité. Les bandes horizontales sont en effet créées par l'accumulation de vocalisations stéréotypées des différentes sous-espèces et populations de grandes baleines.

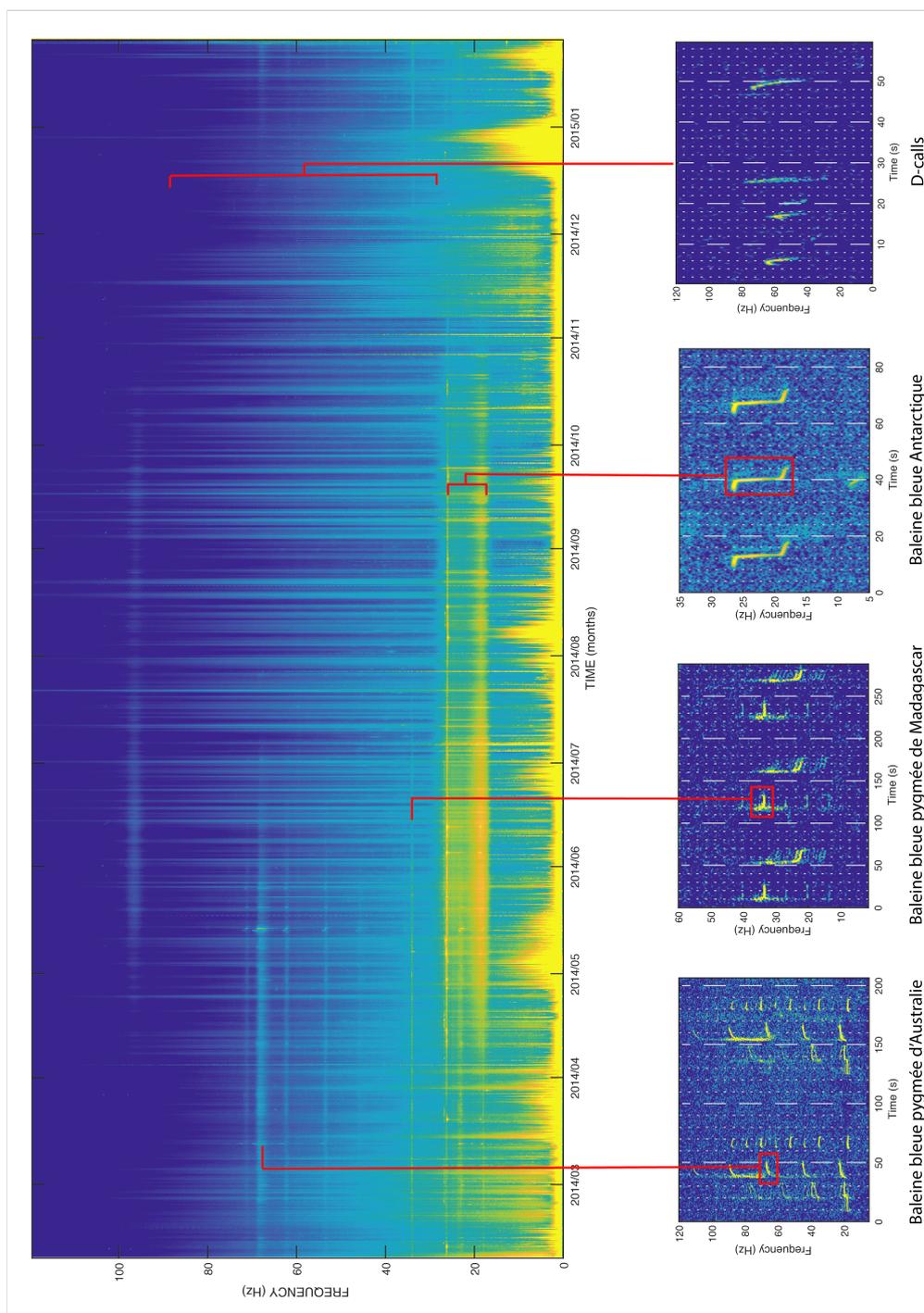


FIGURE 1.12 – Spectrogramme annuel des données enregistrées au site SWAMS2 en 2014 (taille de fenêtre = 6 heure, nfft = 24000, recouvrement = 0.5). Les lignes horizontales sont des indicateurs de la présence acoustique des sous-espèces et populations de baleines bleues. Les encadrés sont des agrandissements des vocalisations de chaque sous-espèce et populations de baleines bleues étudiées dans ces travaux (taille de fenêtre = 0.4 sec, nfft = 2400, recouvrement = 0.9). Le quatrième encadré est un agrandissement d'une série de D-calls.

1.3.3 Etat des connaissances sur les baleines bleues dans l'océan Indien austral

Suite à l'arrêt officiel de la chasse, la CBI a lancé deux programmes d'observations visuelles dans l'océan Austral : l'*International Decade of Cetacean Research* et le *Southern Ocean Whale and Ecosystem Research (IDCR/SOWER)*. De 1978 à 2004, tous les ans de décembre à février, des campagnes d'observation visuelle ont été programmées dans l'océan Austral, avec pour but d'échantillonner au mieux les grands cétacés (Branch and Butterworth, 2001; Ensor et al., 2007). A ces campagnes se sont ajoutés deux programmes japonais : le *Japanese Scouting Vessel* de 1965 à 1988 et le *Japanese Whale Research Program under Special Permit* de 1989 à 2005, avec des observations concentrées entre 35° E et 145° W (Miyashita et al., 1994, 1995). Les relevés visuels collectés durant ces campagnes montrent que les effectifs des populations de baleines bleues restent faibles, malgré l'arrêt de la chasse. Bien que des modèles statistiques concluent à une légère augmentation de la taille des populations depuis l'arrêt de la chasse (Branch et al., 2004, 2007), il convient de considérer ces résultats avec beaucoup de précautions. En effet, les nombreux paramètres à prendre en compte dans les calculs d'abondance (*e.g.* cohérence et précision des méthodes d'observation, identification des espèces et des sous-espèces) rendent les modèles statistiques difficiles à ajuster (Branch et al., 2004). Des observations plus récentes collectées plusieurs fois par an lors du passage du Marion Dufresne dans les Terres Australes et Antarctique Françaises soulignent les inconvénients de cette méthode difficile, couteuse et inadaptée pour le suivi long terme des baleines bleues dans l'océan Indien (Thiebot and Weimerskirch (2013); (K. Delord, Com. Pers.2020; Observatoire PELAGIS - UMS 3462, Université de La Rochelle / CNRS et Centre d'Etudes Biologiques de Chizé UMR 7372, CNRS).

Au début des années 2000, l'analyse d'enregistrements acoustiques collectés par des hydrophones autonomes a permis d'approfondir grandement nos connaissances sur la répartition des populations de baleines bleues dans l'hémisphère sud et de compléter l'information limitée recueillie lors de campagnes de recensement post-chasse. En effet, de nombreux hydrophones ont été déployés et sont pour certains toujours présents dans l'océan Austral, en particulier autour de la péninsule Antarctique et en mer de Weddell (Van Opzeeland et al., 2014). Les vocalisations des baleines bleues Antarctique y sont enregistrées majoritairement pendant l'été austral, mais aussi, plus sporadiquement, pendant l'hiver austral (Širović et al., 2004; Thomisch et al., 2016). Cette dernière observation remet en question les patrons traditionnels de migration dans lesquels les populations de baleines bleues hiverneraient seulement aux basses latitudes, désertant alors les hautes latitudes (Mackintosh, 1966). Dans les eaux sub-antarctiques de l'océan Indien, les vocalisations de baleines bleues Antarctique sont également enregistrées toute l'année mais plus fréquemment de la fin de l'automne jusqu'au printemps avec des pics de détection en

hiver (Samaran et al., 2010a, 2013; Tripovich et al., 2015; Leroy et al., 2016; McCauley et al., 2018).

Les chants de baleines bleues pygmées ont rarement été rapportés au sud de 60° S (Branch et al., 2007). La population de Madagascar migrerait des eaux occidentales subtropicales de l'océan Indien vers les eaux sub-antarctiques pendant l'automne austral, mais ne fréquenterait pas les hautes latitudes (Ichihara, 1966; Best et al., 2003; Stafford et al., 2011; Cerchio et al., 2018). La détection de vocalisations exclusivement pendant l'été et l'automne austral aux abords des îles Crozet étaye cette hypothèse et souligne l'importance de ces eaux comme aire d'alimentation (Samaran et al., 2010a). Très peu d'enregistrements témoignent de la présence de cette population pendant le printemps austral, néanmoins, des rapports baleiniers indiquent un nombre élevé de prises de mai à septembre au large de Durban, ce qui indique une possible zone d'hivernage au sud de l'Afrique (Branch et al., 2007). La population des baleines bleues pygmées australiennes migre le long de la côte sud-ouest de l'Australie en automne et en hiver austral pour aller hiverner dans les eaux indonésienne (Branch et al., 2007; Stafford et al., 2011; Double et al., 2014; Tripovich et al., 2015; McCauley et al., 2018). Leurs chants ont aussi été enregistré, dans une moindre mesure, à la fin de l'automne, début de l'hiver sur des stations situées au nord des îles Saint Paul et Amsterdam (80° E). Ceci indique qu'au moins une partie de cette population migre au nord-est de l'océan Indien durant l'hiver (Samaran et al., 2013). Leur chant n'est pas détecté dans l'ouest de l'océan Indien, ce qui suggère une aire de répartition limitée à l'est du bassin Indien (Leroy et al., 2018b).

La plupart des études menées avant 2016 dans l'océan Indien sont limitées dans le temps (environ 1 année d'enregistrement) et dans l'espace (3 – 4 sites d'enregistrement). De récents travaux menés, sur les sept premières années d'enregistrement du réseau OHA-SISBIO ont conforté les connaissances acquises depuis les années 2000 et apportent un nouvel éclairage sur la répartition géographique et spatiale des populations de baleines bleues peuplant l'océan Indien austral (Leroy, 2017). Tout d'abord, ces travaux ont confirmé l'importance de cet océan pour les baleines bleues Antarctique. En effet, les vocalisations de baleines bleues Antarctique ont été détectées toute l'année à tous les sites du réseau avec toutefois une forte présence saisonnière de l'automne au printemps. Ces observations ont aussi démontré une stabilité des mouvements migratoires de l'espèce, bien que la fréquentation des sites varie en fonction des années. Il est donc possible que d'une année à l'autre les migrations individuelles changent, peut-être en fonction des variables environnementales qui conditionnent l'attractivité des sites (Leroy et al., 2016). Des analyses similaires ont été effectuées sur les populations de baleines bleues pygmées, non pas à partir du nombre de vocalisations détectées, mais de la variation de puissance acoustique aux fréquences des unités les plus puissantes des vocalisations des baleines bleues pygmées (*i.e.* du chorus) (Leroy et al., 2018b). Les baleines bleues pygmées de Ma-

Madagascar et d'Australie ne migrent pas vers l'Antarctique, mais passent l'automne austral dans les eaux sub-antarctiques. Ces deux populations se répartissent longitudinalement dans l'océan Indien austral et remonteraient vers les basses latitudes pour y passer l'hiver, mais leurs mouvements migratoires sont encore mal connus.

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans la continuité de ceux initiés par Samaran et al. (2013) et Leroy (2017). Dans un premier temps, une partie méthodologique présentera les moyens mis en oeuvre pour détecter les vocalisations de baleines bleues dans les enregistrements OHASISBIO. L'accent sera mis sur la question de l'évaluation des performances de détection à partir de données annotées, particulièrement quand les annotations proviennent de plusieurs annotateurs. La détection systématique des vocalisations de baleines bleues pygmées dans les enregistrements viendront préciser les analyses de présence acoustique réalisée à partir de la puissance du chorus. Ces travaux s'intéresseront ensuite à la présence des vocalisations non-stéréotypées dans les enregistrements. A partir de ces deux indicateurs, des hypothèses sur l'usage de l'océan Indien par les baleines bleues seront formulées. Enfin, le dernier chapitre sera consacré à la description du bruit ambiant et à la présence de tirs sismiques dans les données, sources de bruit anthropique connues pour perturber les mammifères marins.

Chapitre 2

Détection automatique et manuelle de vocalisations de baleines bleues

Etudier les mammifères marins par acoustique passive revient à surveiller les sons qu'ils émettent, qui seront autant d'indicateurs de leur présence acoustique dans les enregistrements. Identifier et compter systématiquement les vocalisations de baleines bleues dans un grand jeu de données nécessite alors des outils de détection automatique. Dans cette thèse, le choix s'est porté sur l'algorithme développé par François-Xavier Socheleau, chercheur à l'IMT Atlantique à Brest. Cet outil repose sur un apprentissage à partir de dictionnaires de signaux connus et sur une représentation parcimonieuse des signaux d'intérêt (Socheleau and Samaran, 2018). Avant d'être appliqué sur l'ensemble des enregistrements acoustiques OHASISBIO, les performances de cet algorithme ont été évaluées sur des jeux de données préalablement annotés. Cette évaluation rendra compte de la robustesse du détecteur et de la fiabilité des résultats et permettra de valider les analyses biologiques et écologiques qui en seront déduites.

La standardisation du traitement des données d'acoustique passive devient un sujet de plus en plus discuté par la communauté bioacoustique (*e.g.* (Kanes, 2019)). Cette standardisation est nécessaire afin d'assurer la reproductibilité des études et de pouvoir les comparer entre elles. Elle implique la création et la mise à disposition de données de référence sur lesquelles les détecteurs pourront être testés et comparés, et la diffusion en accès libres des codes utilisés (*open-source*). A Brest, le groupe de travail OSmOSE travaille sur ces questions, en proposant une plateforme d'annotation collaborative (Aplose) et des algorithmes en accès libre.

La première partie de ce chapitre présente le détecteur utilisé et l'évaluation de ses performances et la seconde partie du chapitre aborde le travail effectué dans le cadre du groupe de recherche OSmOSE, sur l'annotation collaborative de données d'acoustique passive.

2.1 Détection automatique des vocalisations de baleines bleues

La première étape de toute étude de suivi par acoustique passive consiste à détecter les sons émis par ces animaux dans un paysage sonore souvent complexe. Pour l'étude des baleines bleues, deux métriques sont classiquement utilisées : la puissance du chorus et le nombre de vocalisations (Širović et al., 2004, 2009; Thomisch et al., 2016; Leroy et al., 2016). Le chorus correspond à l'élévation du niveau de bruit dans la bande de fréquences des vocalisations d'intérêt. Ce chorus est généré par la superposition de vocalisations émises simultanément par plusieurs baleines (Figure 2.1). Cummings and Thompson (1971); Leroy et al. (2018b) font l'hypothèse que le chorus de baleines bleues détecté serait généré à plusieurs centaines, voire un millier de kilomètres. Il est néanmoins difficile d'estimer de façon robuste son rayon de propagation qui dépend du niveau et de la profondeur d'émission, du nombre et de la répartition géographique des individus émetteurs, et aussi des paramètres du milieu de propagation (température, salinité, bathymétrie, bruit ambiant). Le calcul de la puissance du chorus ne nécessite qu'une connaissance *a priori* de la fréquence (ou bande de fréquences) de la vocalisation d'intérêt, et est relativement rapide. Cette métrique donne un premier indicateur de la présence acoustique de baleines bleues, toutefois dans un rayon large et indéterminé autour de l'hydrophone considéré.

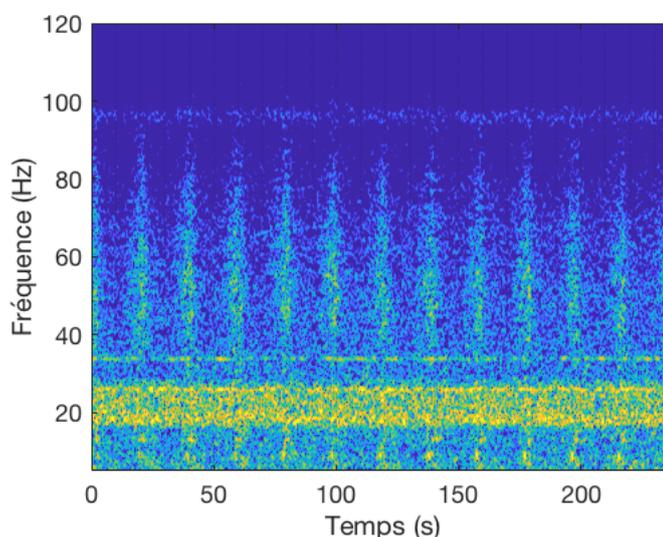


FIGURE 2.1 – Spectrogramme (taille de la fenêtre = 0.1, nfft = 480, recouvrement = 0.8) montrant deux chorus de baleines bleues (lignes horizontales) : produits par la juxtaposition de vocalisations de baleines bleues Antarctique, entre 18 et 28 Hz, et de vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar, à 35 Hz, et celui, plus ténu, produit par le rorqual commun à 98 Hz. Les lignes verticales un peu diffuses sont vraisemblablement des tirs sismiques.

Des indicateurs plus précis sont toutefois requis pour détailler la présence saisonnière

ou spatiale des baleines considérées. L'indicateur le plus précis revient à comptabiliser les vocalisations propres à chaque espèce ou population dans les enregistrements. Différentes métriques pourront ensuite être dérivées, comme le nombre de vocalisations détectées ou leur présence/absence par unité de temps (heure, semaine, mois, saison, année). Le rayon de détection des vocalisations de baleines bleues Antarctique est estimé à environ 200 km (Širović et al., 2007; Samaran et al., 2010b; Thomisch et al., 2016). Celui des vocalisations de baleines bleues pygmées est plus incertain, mais leurs niveaux sources sont plus faibles que celui des baleines bleues Antarctique (Samaran et al., 2010b). Le bruit ambiant est lui aussi plus faible dans les fréquences dans lesquelles elles émettent. Dans le même temps, leur chant à plus hautes fréquences se propagera moins loin. Au final, le rayon de détection des vocalisations de baleines bleues pygmées est donc probablement du même ordre de grandeur que celui des baleines bleues Antarctique, ou légèrement moindre (Samaran et al., 2010a). Dans tous les cas, il est plus faible que le rayon de détection du chorus, et est donc plus représentatif de la fréquentation d'un site par les baleines. La détection des vocalisations de baleine bleue est plus complexe que le calcul de la puissance acoustique du chorus. La méthode la plus élémentaire consiste à écouter et à visualiser les spectrogrammes, et à pointer manuellement les vocalisations d'intérêt (Stafford et al., 1999, 2001). Toutefois, la détection manuelle souffre d'un désagrément majeur : les séries temporelles sont souvent trop longues pour être systématiquement visualisées par un opérateur humain, qui plus est, si celui-ci s'intéresse à des vocalisations de plusieurs espèces. Dans notre cas, mises bout à bout, les données analysées dans cette thèse représentent environ 50 ans d'enregistrement. Pour analyser un tel jeu de données, il est nécessaire de recourir à des algorithmes de détection automatique.

2.1.1 Les détecteurs automatiques de vocalisations de baleines bleues

Détecter des vocalisations de cétacés est une tâche complexe compte tenu de la diversité des sons produits par ces animaux, de la dégradation éventuelle de ces signaux durant leur propagation jusqu'à l'hydrophone et enfin du bruit sous-marin ambiant, variable en fréquence et amplitude et parfois de niveau très élevé. De nombreuses méthodes de détection ont été proposées pour détecter les vocalisations stéréotypées de baleines bleues. Parmi les plus communes, on peut citer le filtrage adapté (Mellinger and Clark, 1997; Samaran, 2008; Bouffaut et al., 2018) ou encore la projection en sous-espaces (Socheleau et al., 2015). La méthode la plus communément utilisée reste certainement la corrélation de spectrogrammes (Mellinger and Clark, 2000). Basée sur la similitude entre un signal type, appelé *kernel* ou *template*, extrait des données ou construit à partir des caractéristiques dans le plan temps/fréquence du signal à détecter, elle s'est révélée être très performante pour la détection de vocalisations de baleines bleues dans de grandes bases de données (Stafford et al., 2004; Širović et al., 2004; Samaran et al., 2013; Sha-

bangu et al., 2019). Néanmoins, les méthodes précédemment citées présentent des limites non négligeables. Elles nécessitent soit le choix *a priori* d'un modèle de référence pour la corrélation de spectrogrammes, soit la définition d'un modèle statistique, complexe à caractériser pour décrire certaines vocalisations (Samaran, 2008; Socheleau et al., 2015; Bouffaut et al., 2018). Ces modèles ne prennent pas forcément en compte les potentiels changements de fréquence, d'amplitude et de durée des vocalisations, couramment observés dans des grands jeux de données aux paysages acoustiques variés. Enfin, ces méthodes gèrent mal la présence d'interférences (*e.g.* vocalisations d'autres espèces de mysticètes, bruits d'origine anthropique, de séismes ou d'icebergs).

A ce jour, aucun algorithme n'est optimal pour la détection des D-calls, vocalisations aux formes très variables dans le plan temps/fréquence (Figure 1.7). Mouy et al. (2009) comparent trois méthodes temps/fréquence de détection des vocalisations de baleines bleues dans l'estuaire du Saint-Laurent au Canada. Appliquées au D-calls, ces méthodes détectent un grand nombre d'interférences. Pour détecter des D-calls de baleines bleues Antarctique, (Shabangu et al., 2017) ont utilisé le logiciel XBAT (Figuroa and Robbins, 2008) avec une méthode de corrélation de bancs de spectrogrammes et rapportent un taux de détection situé entre 21% et 71 %, selon l'année dont est issu le modèle de vocalisation. Le nombre de fausses détections (détection d'un signal autre qu'un D-call) n'est pas précisé. Une nouvelle application de cette approche rapporte un taux de détection de 87%, sans plus de précision sur le taux de fausses alarmes (Shabangu et al., 2019). Un détecteur basé sur une loi de puissance généralisée, développé pour la détection d'unité du chant des baleines à bosse (Helble et al., 2012), a été utilisé pour détecter des D-calls dans des données acquises au large de l'Antarctique (Thomisch, 2017). Les performances sont évaluées sur deux jeux de données enregistrées en été et en hiver et les taux de détection varient de 75% en hiver à 67% en été, mais environ la moitié des détections automatiques sont en fait des interférences. Face à ces difficultés et limitations, la détection manuelle reste donc toujours d'actualité pour ces vocalisations (Oleson et al., 2007c; Samaran et al., 2010a; Lewis and Širović, 2017; Romagosa et al., 2020).

2.1.2 Choix et fonctionnement du détecteur

Afin de sélectionner le détecteur le plus adapté au traitement des données OHASIS-BIO dans le cadre de cette thèse, quatre critères ont été retenus :

- **robustesse** ; le détecteur doit prendre en compte la variabilité au sein d'un même type de vocalisation (fréquence, amplitude, durée, ...),
- **polyvalence** ; le détecteur doit être adaptable à la détection de 3 types de vocalisations stéréotypées et d'une vocalisation non-stéréotypée de baleines bleues,

- **fiabilité**; le détecteur doit avoir un taux de détection optimal pour un nombre de fausses alarmes minimal,
- **rapidité**; le détecteur doit pouvoir traiter plus de 50 ans de données en un temps raisonnable.

Le détecteur développé par François-Xavier Socheleau (Socheleau and Samaran, 2018) ensuite désigné par SRD pour *Sparse Representation-based Detector* répondait *a priori* à tous ces critères. L'intérêt de son approche réside dans l'alliance de dictionnaires et de la représentation parcimonieuse des vocalisations de baleines bleues. L'utilisation de dictionnaires permet de représenter la diversité de fréquences, d'amplitudes, de durées et de formes temps-fréquence des vocalisations. Des dictionnaires spécifiques sont définis en fonction de la vocalisation ciblée. Par exemple, ce détecteur avait déjà été testé pour la détection de vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar et de D-calls (Socheleau and Samaran, 2018). Bien que les performances aient été évaluées sur des petits jeux de données, le ratio 'nombre de détections correctes sur nombre de fausses détections' semblait prometteur (Socheleau and Samaran, 2018). Pour un enregistrement d'une durée de 6.5 heures (durée d'un fichier), le temps de calcul est d'environ 20 secondes pour les vocalisations stéréotypées et de 40 secondes pour les D-calls (avec un processeur 2,7 GHz). Le détecteur, lancé sur 8 processeurs en parallèles, offre ainsi un temps de traitement raisonnable.

La statistique de décision proposée par le SRD est une extension de celle mise en oeuvre pour le *Z-detector* (Socheleau et al., 2015), détecteur utilisé pour la recherche de vocalisations de baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien (Leroy, 2017) et dans l'océan Atlantique (Samaran et al., 2019). Cette métrique de décision, appelée *Sound to Interference plus Noise Ratio* ou SINR mesure la ressemblance entre le signal temporel observé et des représentations parcimonieuses de vocalisations modélisées à partir des signaux contenus dans le dictionnaire.

En pratique, la première étape pour utiliser le SRD consiste à pré-traiter le signal d'observation (*i.e.* le signal dans lequel on cherche à savoir si une vocalisation est présente). Il est d'abord stationnarisé en temps et en fréquence, afin de s'affranchir des différents types de bruit de fond pouvant être rencontré dans un grand jeu de données. Un filtre passe bande est ensuite appliqué pour ne garder que la bande de fréquences des vocalisations (Figure 1.6). Ensuite vient l'étape de création du dictionnaire **D**. Celui-ci est construit à partir d'une base de données d'apprentissage de L vocalisations représentatives de la vocalisation à détecter. Le dictionnaire doit être assez grand pour décrire la variabilité des vocalisations, tout en ayant une taille limitée afin de restreindre le temps de calcul. Pour cela, la base de données d'apprentissage est compressée en utilisant l'algorithme K-SVD (Aharon et al., 2006) pour donner au dictionnaire **D** une dimension $M < L$. Les dimen-

sions M utilisées dans ces travaux ont été choisies d’après Guilment et al. (2018), $M = 45$ pour les D-calls et $M = 20$ pour les vocalisations stéréotypées. Une fois le dictionnaire construit, la détection proprement dite peut commencer. Le signal d’observation est alors parcouru par fenêtres de N échantillons. Pour chaque fenêtre d’observation, l’algorithme OMP pour *Orthogonal Machine Pursuit* (Pati et al., 1993) recherche la combinaison de K parmi M éléments du dictionnaire la plus semblable au signal observé. En d’autres termes, pour un vecteur d’observation y , et un dictionnaire \mathbf{D} connu *a priori*, l’algorithme estime ϑ comme la solution de

$$\min_{\vartheta \in \mathbb{R}^M} \|y - D\vartheta\|_2^2 \text{ avec } \|\vartheta\|_0 \leq K, \quad (2.1)$$

avec K le nombre maximum d’éléments non nuls de ϑ , aussi appelé contrainte de parcimonie. La valeur de K est directement reliée à la complexité de la vocalisation ciblée et a été choisi d’après Guilment et al. (2018), $K = 3$ pour la détection des D-calls et $K = 2$ pour la détection des vocalisations stéréotypées. Une fois la combinaison optimale déterminée, la métrique de décision (SINR), est mesurée par

$$SINR = \frac{\|D\vartheta\|_2^2}{\|y - D\vartheta\|_2^2}, \quad (2.2)$$

avec $\|D\vartheta\|_2^2$ l’estimation du signal d’intérêt et $\|y - D\vartheta\|_2^2$ l’estimation du bruit de fond et des interférences du signal d’observation. Ce critère de décision mesure la qualité de la reconstruction du signal observé par le signal théorique. Plus le SINR est élevé et plus le signal théorique ressemble au signal observé. La dernière étape est donc d’effectuer le test de seuillage suivant :

$$\tau_\eta(y) = \begin{cases} 1 & \text{si } SINR > \eta \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (2.3)$$

pour lequel une détection est considérée positive si et seulement si le SINR dépasse un seuil η défini *a priori*. Le schéma de la Figure 2.2 résume le principe de fonctionnement du détecteur. Pour une explication plus complète du fonctionnement théorique du détecteur, se référer à Socheleau and Samaran (2018) et à Torterotot et al. (2019), reproduit ci-après.

2.1.3 Évaluation des performances du détecteur

Des premiers tests de performances ont démontré le potentiel du SRD pour la détection de vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar et de D-calls (Socheleau and Samaran, 2018). Néanmoins, avant d’appliquer cet algorithme à la détection de vo-

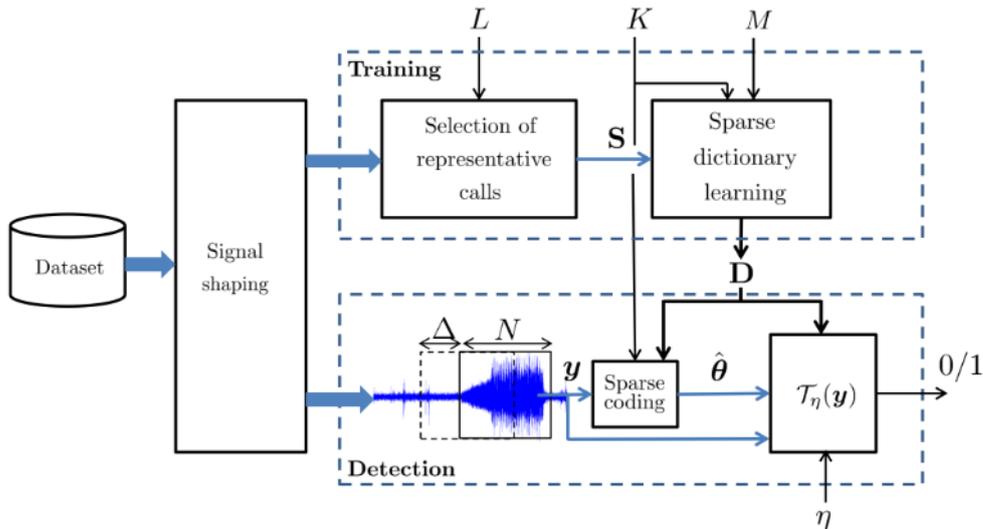


FIGURE 2.2 – Schéma de fonctionnement général de l'algorithme SRD ou *Sparse Representation-based Detector* (Socheleau and Samaran, 2018)

calisations de baleines bleues sur la totalité des données OHASISBIO, il était impératif d'évaluer précisément ses performances sur un jeu de données plus conséquent extrait de cette même base de données. Cela a tout d'abord permis de définir un seuil de détection approprié, afin de maximiser le nombre de bonnes détections tout en minimisant le nombre de fausses alarmes. Ensuite, la connaissance des atouts et des faiblesses du détecteur a conduit au développement d'une stratégie de détection adaptée, qui permettra des interprétations biologiques robustes (Širović, 2016; Leroy et al., 2018c). Enfin, bien caractériser les performances de détection est la clé pour rendre possible des comparaisons pertinentes entre plusieurs études.

Généralement, les performances de détection sont évaluées en comparant les résultats du détecteur automatique à un petit sous-ensemble de données annotées manuellement, dit "vérité terrain" (Helble et al., 2012; Socheleau et al., 2015; Bouffaut et al., 2018). Les taux de détection, ou rappel, et de fausse alarme (indicateurs respectivement de la proportion de vocalisations correctement détectées et du nombre de détections qui ne sont pas des vocalisations d'intérêt) sont deux métriques couramment utilisées pour caractériser ces performances. Idéalement, ces deux indicateurs doivent être constants et indépendants du jeu de données traité. Ainsi les performances calculées sur des sous-ensembles de données sont jugées représentatives pour l'ensemble du jeu de données. En pratique, plusieurs facteurs peuvent modifier les performances de détection : la variabilité des caractéristiques d'une vocalisation (fréquence, durée, amplitude...), l'abondance des vocalisations, le bruit ambiant et enfin des erreurs ou omissions dans l'annotation manuelle de référence (Širović, 2016; Leroy et al., 2018c).

Concrètement, les performances du SRD ont été évaluées en 3 étapes, chacune réalisée

sur un sous-ensemble de données différent :

1. L'objectif de la première étape est de choisir un seuil de détection η qui conciliera un taux élevé de détection avec un faible taux de fausses alarmes. Pour cela, quatre jeux de données (un pour chaque type de vocalisation) contenant des enregistrements venant de tous les sites ont été annotés manuellement. Au total, 3 467 D-calls, 1 697 vocalisations de baleines bleues pygmées d'Australie, 2 000 vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar et 1 499 vocalisations de baleines bleues Antarctique ont été annotés. Chaque ensemble de données préalablement annoté est séparé en deux : une partie servira de données d'apprentissage et l'autre de test. Le jeu de données d'apprentissage est composé de 50 annotations pour les vocalisations stéréotypées et de 200 annotations pour les D-calls, qui sont compressées pour former les dictionnaires. Puis les performances sont évaluées sur le jeu de données de test, contenant toutes les autres vocalisations. Pour s'assurer de la robustesse du détecteur, les performances sont calculées plusieurs fois, selon la méthode de validation croisée (*k-fold cross-validation*). A chaque itération, de nouvelles vocalisations choisies au hasard dans le jeu de données composent le dictionnaire. Les taux de détection et de fausses alarmes sont calculés pour différents seuils de détection η , ce qui permet de tracer une courbe ROC ou *Receiving Operator Curve* (Figure 2.3). Le seuil le plus approprié (*i.e.* celui pour lequel le taux de détection est optimal pour un taux de fausses alarmes minimal) peut alors être choisi. Ici, c'est le seuil qui correspond à un taux de fausses alarmes moyen de 1 par heure.
2. L'objectif de la deuxième étape est de caractériser la variabilité des performances due à l'annotateur. Pour cela, le détecteur est testé sur un même jeu de données annoté par 3 ou 4 personnes différentes, toutes expertes et habituées à annoter des données bioacoustiques. Cette fois, un seul dictionnaire est utilisé et le seuil de détection est fixé en fonction de ce qui a été déterminé à l'étape précédente.
3. L'objectif de la dernière étape est de caractériser l'effet de la présence d'interférences, mais aussi de longues périodes sans aucune vocalisation. En effet, les sous-ensembles de données annotés manuellement à l'étape 1 n'étaient pas forcément représentatifs de l'ensemble des données OHASISBIO. Le détecteur est donc testé sur une année d'enregistrements au site WKER en 2015. Toutes les détections sont ensuite manuellement vérifiées par un opérateur. En revanche les détections manquées ne sont pas prises en compte. Le taux de détection ne peut donc pas être vérifié, mais les fausses alarmes peuvent être quantifiées et classées par catégorie.

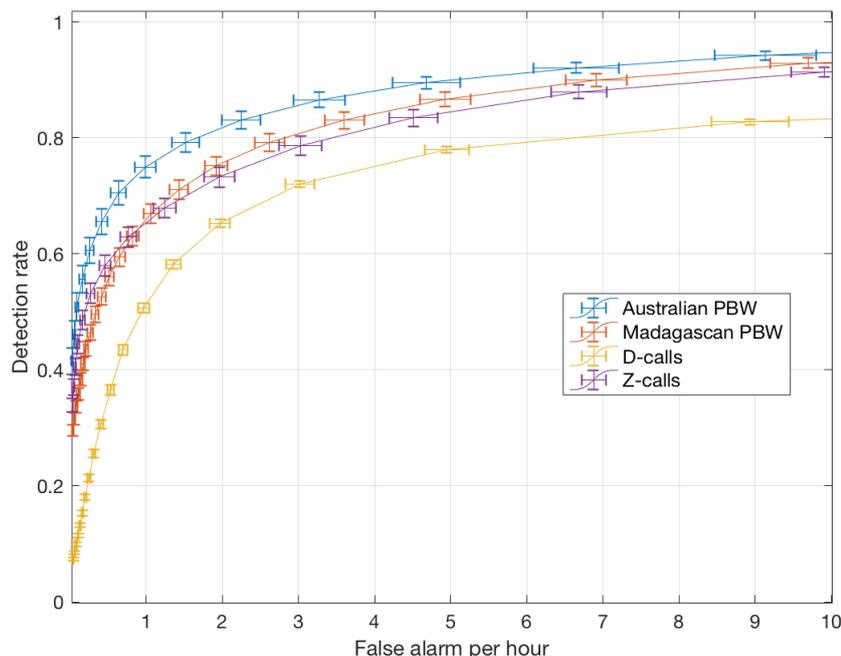


FIGURE 2.3 – Courbes ROC ou *Receiving Operator Curve* obtenues pour les 4 types de vocalisations recherchées dans les données. Les performances sur les vocalisations stéréotypées sont meilleures que pour les D-calls, quel que soit le taux de fausses alarmes par heure considéré (Torterotot et al., 2019).

2.1.4 Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the southern Indian Ocean

En résumé, l'article reproduit ci-après, paru dans les comptes rendus du congrès *IEEE OCEAN* (Marseille, Juin 2019), présente les performances de détection du détecteur SRD choisi pour traiter nos données. Grâce aux tests effectués, des seuils de détection fixes ont été établis. Ils sont différents pour les 4 types de vocalisations, mais génèrent des performances similaires. Pour un taux de fausses alarmes fixé à une par heure en moyenne, le taux de détection augmente avec le Rapport Signal sur Bruit (RSB) des vocalisations. Pour des RSB positifs, il atteint 90% pour les vocalisations stéréotypées et entre 80% et 90% pour les D-calls. De plus, la composition des dictionnaires influe peu sur les performances de détection. Le détecteur a ensuite été appliqué à une année entière d'enregistrements (WKER en 2015) afin de contrôler les performances sur des 'données réelles' et de caractériser l'influence de la présence d'interférences. Pour les vocalisation stéréotypées, le nombre de fausses alarmes est en moyenne plus faible que celui précédemment calculé sur des sous-ensembles de données. Les différentes méthodes d'annotation (*i.e.* annotation manuelle puis comparaison avec les résultats automatiques ou détection automatique puis vérification manuelle) peuvent expliquer ces différences. La présence de chorus de

forte intensité était la principale cause de fausses alarmes (surtout pour les vocalisations des baleines bleues pygmées de Madagascar). Ces interférences n'affecteront pas - ou très peu - les patrons de présence, les seuils de détections ont donc été conservés tels quels. En revanche, pour les D-calls, deux types d'interférences entraînent de nombreuses fausses alarmes : les vocalisations à 40 Hz des rorquals communs et les tirs de canons à air. Une stratégie de traitement post-détection a donc été mise en place afin d'éliminer le plus possible de ces fausses alarmes et ainsi limiter le travail très fastidieux de vérification manuelle.

Deux algorithmes différents de post-traitement ont été élaborés. Le premier permet de différencier les D-calls des vocalisations à 40 Hz des rorquals communs. Ces dernières sont beaucoup plus impulsionnelles (< 1 sec) (Watkins, 1981; Širović et al., 2013) que les D-calls. C'est donc sur un critère de durée que se base la méthode de classification. Le deuxième algorithme cherche à détecter la présence de tirs de canons à air et se base sur la périodicité de ces tirs. Celle-ci varie pour chaque campagne de tir, mais est constante au sein d'une même campagne sismique (entre 5 à 20 secondes) (*e.g.* (Fitzgibbon et al., 2017; Nieukirk et al., 2012)). Ces sons sont omniprésents dans nos données. Pour les détecter, une technique combinant un détecteur sur l'énergie et une mesure de périodicité est employée (Nieukirk et al., 2012; Mellinger et al., 2004b). Tous les fichiers contenant des tirs sismiques seront alors exclus de l'analyse. Les deux post-traitement ont été appliqués à l'année 2015 du site WKER. Les résultats montrent que presque 95% des interférences dues aux vocalisations à 40 Hz de rorquals communs et aux tirs sismiques ont été éliminées, tout en conservant 78% des D-calls initialement détectés.

L'analyse détaillée des vocalisations stéréotypées des baleines bleues a révélé des variations fréquentielles intra et inter-annuelles (Gavrilov et al. (2011, 2012); Leroy et al. (2018a)). Les dictionnaires utilisés ici contiennent des vocalisations provenant de plusieurs sites et de plusieurs périodes de l'année. Ils sont donc représentatifs de la potentielle diversité intra-annuelle des vocalisations. Cependant, l'application d'un dictionnaire de 2015 sur des données de 2010 a abouti à des performances largement dégradées. Il a donc été décidé de construire un dictionnaire par an, directement à partir des résultats de détection obtenus avec un dictionnaire d'une année contiguë. Les vocalisations de ce nouveau dictionnaire sont sélectionnées de façon aléatoire parmi les résultats de détection. Un analyste s'assure que le nouveau dictionnaire ne contienne aucun signal autre que la vocalisation d'intérêt. Sachant que la composition du dictionnaire n'influe pas sur les performances de détection, cette méthode permet d'obtenir des résultats de présence acoustique cohérents sur le long terme avec le même niveau de performance, tout en limitant le travail d'examen et d'annotation manuelle des données.

Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the Southern Indian Ocean

Maëlle Torterotot

Laboratoire Géosciences Océan
Université de Brest & CNRS
Brest, France
maelle.torterotot@univ-brest.fr

Jean-Yves Royer

Laboratoire Géosciences Océan
Université de Brest & CNRS
Brest, France
jean-yves.royer@univ-brest.fr

Flore Samaran

Lab-STICC, UMR CNRS 6285
ENSTA Bretagne
Brest, France
flore.samaran@ensta-bretagne.fr

Abstract—The most common approach to monitor mysticete acoustic presence is to detect and count their calls in audio records. To implement this method on large datasets, polyvalent and robust automated call detectors are required. Evaluating their performance is essential, to design a detection strategy adapted to study the available datasets. This assessment then enables accurate post-analyses and comparisons of multiple independent surveys. In this paper, we present the performance of a detector based on dictionaries and sparse representation of the signal to detect blue whale stereotyped and non-stereotyped vocalizations (D-calls) in a large acoustic database with multiple sites and years of recordings in the southern Indian Ocean. Results show that recall increases with the SNR (Sound to Noise Ratio) and reaches 90% for positive SNR stereotyped calls and between 80% and 90% for high SNR D-calls. A detailed analysis of the influence of dictionary composition, SNR of the calls, manual ground truth as well as interference types and abundance, on the performance variability is presented. Eventually, a detection strategy for long term acoustic monitoring is defined.

Index Terms—blue whales, bioacoustics, detection, performance evaluation, long term monitoring

I. INTRODUCTION

Blue whale (*Balaenoptera musculus ssp.*) acoustic repertoire is composed of two sound types: stereotyped calls and variable down-sweep calls, named D-calls hereinafter [1]. The former are repeated periodically by males only, over long periods of time, up to days, to form songs [2]. Each sub-species and population produces its own song, composed of specific calls [3]. Although their time-frequency shape is highly stereotyped, the pitch of tonal parts of many population calls is globally decreasing [4]. While the causes for this long-term frequency decrease are still unclear, a seasonal variation seems to be linked to the ambient noise level [5]. D-calls are low frequency down-sweeps, ranging from about 90 Hz to 30 Hz and lasting from 1 to 8 seconds, produced by males and females [7]. Unlike stereotyped calls, their time-frequency shape and duration are highly variable, and their occurrence is sporadic. D-calls have been recorded in the presence of blue whales in the Pacific [1], [8] and in the Atlantic [9], of Antarctic blue whales [10], [11] and of three acoustic

populations of pygmy blue whales in the Indian Ocean [12]–[14].

Easier to detect automatically, stereotyped calls are commonly used to monitor blue whale sub-species and population presence and migrations. Yet, the presence of blue whales in the Pacific has been attested by the occurrence of D-calls, whilst no stereotyped calls were detected [8], [15]. Besides, D-calls appear in the behavioral context of foraging [7], whereas songs are thought to be a reproductive display. Thus, monitoring both call types brings insights not only on blue whale migratory routes, but possibly on their breeding and feeding grounds.

In this paper, we use a detection method based on dictionary learning and sparse representations of stereotyped and non-stereotyped calls [16], [17]. The detector works with dictionaries built from temporal call signals and then considers variability in those calls by using sparse representations; hereinafter, it will be referred as a sparse representation detector or SRD. Preliminary tests on small datasets demonstrated the potential of this detection algorithm on Madagascan pygmy blue whale calls and Pacific blue whale D-calls [16]. However, before applying this detector to a larger dataset, it is imperative to thoroughly evaluate its performance and analyze its variability to develop a detection strategy that will allow meaningful interpretations and potential comparisons across different studies [6], [18]. Moreover, detection performance are needed to estimate accurate cetacean densities from passive acoustic data [19].

Performances are often determined by comparing the detector outputs with a ground-truth dataset, generally obtained by a manual annotation of a subset of the global dataset. Detection and false-alarm rates are two common metrics to measure these performances. Ideally, these metrics should be constant and independent from the selected data subset, so that the measured performances are representative for the entire dataset. In practice, as shown for instance for detections based on spectrogram correlations [18], the following factors can impact the detection performances: variability in the call characteristics, seasonal call abundance, ambient noise and

human analyst variability. The latter factor has been investigated in detail for Antarctic blue whale call detection, where independent manual annotations of identical datasets exhibited strong variability between analysts, which in turn reflected on the detection performances [6]. This variability illustrates the difficulty to reliably and reproducibly identify single calls in a whale chorus made of overlapping distant calls. Before performing automated detection on large datasets, it is also necessary to define if, how and which interfering acoustic signals may affect the performance of the detector. Once all these precautions are taken, an accurate detection strategy can be set up.

This paper investigates the performances of SRD before its application to detect diverse blue whale calls on a long-term dataset collected in the Southern Indian Ocean. Section II presents the methodology used to detect blue whale calls and to evaluate the detector performance in the available dataset. Section III focuses on the performance assessment. Finally, section IV discusses the results and how the detection strategy must be adjusted to investigate multiyear databases.

II. MATERIAL AND METHODS

A. Data collection

This study is based on acoustic data recorded by the OHASISBIO (Observatoire Hydro-Acoustique de la SISmicité et de la BIODiversité) hydrophone network, deployed in the Southern Indian ocean since 2010 [20]. This array is composed of 5 to 9 moorings, depending on the year, and covers a region spanning from 24° to 56° South and from 52° to 83° East (see Figure 1). Each mooring is composed of an anchor, an acoustic release and a hydrophone, moored at the depth of the sound fixing and ranging (SOFAR) channel. The recordings are continuous and sampled at 240 Hz.

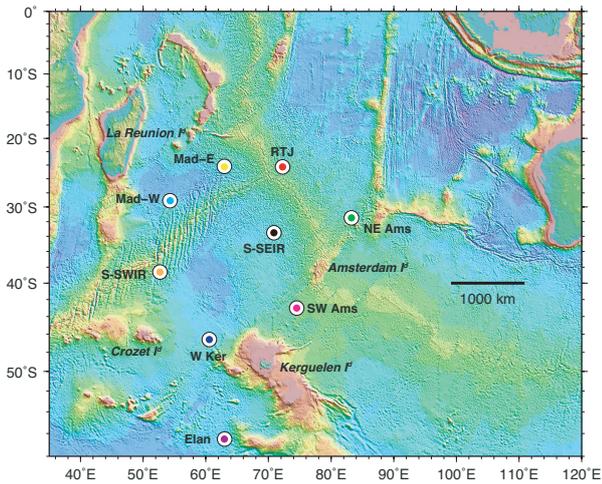


Fig. 1. The OHASISBIO hydrophone network in the Southern Indian ocean. Colored dots represent mooring sites.

Two blue whale sub-species dwell in this area: the Antarctic blue whale (*B. m. intermedia*), referred hereinafter as Ant BW, and the pygmy blue whale (*B. m. brevicauda*), among which

two acoustic populations are clearly identified in our acoustic records: the Madagascan (Mad PBW) and the Australian (Aus PBW) pygmy blue whales [21]. Each of these sub-species emits a distinctive and stereotyped call and possibly common or unrelated D-calls, as pictured on Figure 2.

B. Selected data subsets

Performances of the detector are evaluated on small subsets of this passive acoustic data. For the purpose of this study, three subsets have been created.

1) *Data subset 1*: To compute the performance metrics on interference-free data, four subsets (one for each call type) were built. Audio files were chosen to cover a large range of acoustic scenarios: from calls with high SNR to calls barely visible among the chorus, a din noise made of overlaid distant calls. For stereotyped calls, only data from 2015 were selected, to be invariant to the long-term call pitch shift [5]. For the data subset with D-calls, records were chosen among the whole OHASISBIO dataset, to account for potential geographical and temporal variability in the call type. A total of 240.5 hours of recordings were selected for the D-call data subset, 110.5 hours for Aus PBW, 78 hours for Mad PBW and 58.5 hours for Ant BW.

2) *Data subset 2*: This dataset will serve to evaluate the effects of the analyst ground-truth on the detection performances. Data selection process was similar to that of dataset 1, but with no overlap between the two datasets. However, the size of the three subsets for Mad PBW, Aus PBW and D-calls, are much smaller (6-hour long), so that multiple analysts could annotate them. Moreover, no Ant BW subset was built for this analysis.

3) *Data subset 3*: Once the performances were assessed on interference-free datasets, the detector was applied on one year of recording at site WKER. This site was chosen based on a manual inspection and previous analyses of the data that established the presence of the different call types [22]. The objective is to characterize the interferences that could lure the automated detection and to re-evaluate the false alarm rate in case of call absence.

C. Manual annotation

Manual annotation is solely considered for data subsets 1 and 2, as this is a long and tedious task that can only be achieved on small datasets.

1) *Data subset 1*: Manual annotation was made with Raven Pro 1.5 (Cornell Lab of Ornithology). Spectrograms with fixed parameters (Hanning windows with 50% overlap and 512-point FFT) were visually inspected by an expert human operator. Each call type was annotated one at a time. Only unit 2 of Aus PBW call and unit 1 of Mad PBW call were logged while for D-calls and Ant BW calls, the whole call was selected. Each manual detection was saved into a text file (beginning and end-time), to be compared with the automated detector outputs. A total of 3467 D-calls, 1697 Aus PBW calls, 2000 Mad PBW calls and 1499 Z-calls from Ant BW were logged by the analyst.

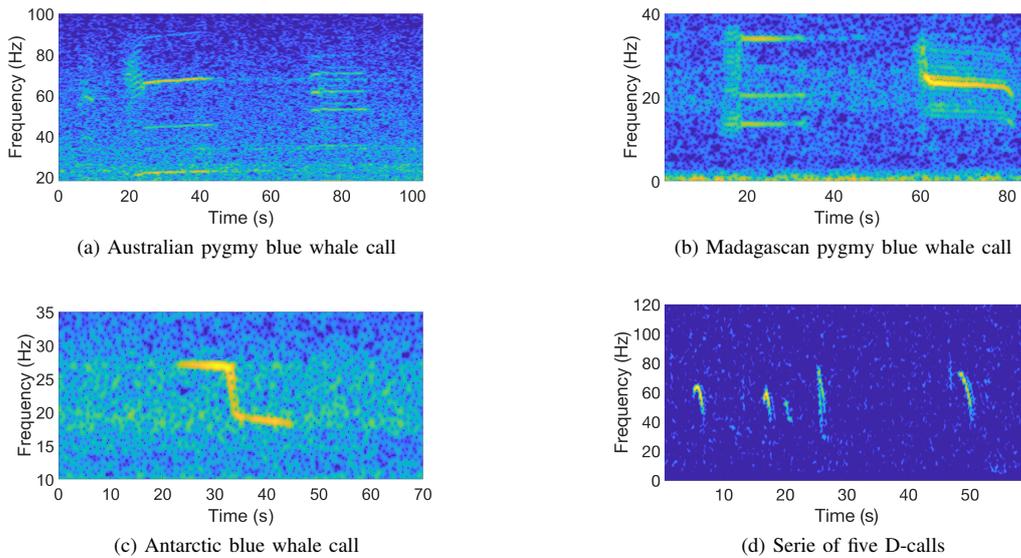


Fig. 2. Spectrogram of blue whale calls used to assess performance of the detector. (a) Australian pygmy blue whale stereotyped call (b) Madagascar pygmy blue whale stereotyped call (c) Antarctic blue whale stereotyped call (Z-call) (d) Serie of 5 D-calls

2) *Data subset 2*: Multi-analyst manual annotation was completed using the Apose online annotation platform developed by the Ocean Data Explorer project [23]. This platform can be remotely accessed by multiple analysts and displays spectrograms with fixed parameters (Hanning windows with 80% overlap and 512-point FFT). Four expert analysts annotated D-calls and three of them annotated stereotyped calls, all with the same annotation protocol as for data subset 1.

D. Pre-processing of the data

Before detection, the audio files are whitened using a FIR filter whose time-varying impulse response is derived from the noise power-spectral-density estimated every 300 seconds as described in [24, Appendix A]. This process makes the detection insensitive to the different types of background noise encountered in the dataset. Data are then bandpass filtered in the call frequency bandwidth reported in Table I. For stereotyped calls, data are also converted into baseband signals, with the frequency bounds reported in Table I, to reduce processing time.

TABLE I
FREQUENCY BANDWIDTH OF CALL TYPES USED FOR DETECTION

Call type	Frequency bandwidth (Hz)
D-calls	30 - 90
Mad PBW calls	35 - 45
Aus PBW calls	62 - 72
Ant BW calls	16 - 28

E. Detection method

The detector is based on dictionary learning and sparse representation of blue whales vocalizations. The principal asset of this method lays in the alliance of big dictionaries, that take

call variability into account, and linear combination of several elements of those dictionaries, to reflect call complexity. The detection principle is thoroughly described in [16].

Practically, detection is conducted in 2 steps :

1) *Dictionary creation*: dictionaries are directly designed from the data. Given a set of L time-based signals s , K-SVD algorithm [25] seeks the dictionary \mathbf{D} , of size $M \leq L$, that leads to the best possible representation for each signal in this set. Here, signals s of calls can well be represented by a linear combination of a small number K of non-zero coefficients in the basis \mathbf{D} . K is called sparsity constraint and is directly related to the complexity of each single call type to detect. If K is over-evaluated, the number of false detection will tend to increase. On the contrary, if K is under-estimated, the detector may miss true detections. The dictionary size M has to be large enough to depict the variability of the calls, but must also stay small to limit computing time. In this study, the size of the dictionary M and the sparsity constraint K have been taken from reference [17]: for the highly variable D-calls $M = 45$ and $K = 3$, and for the stereotyped calls $M = 20$ and $K = 2$.

2) *Detection*: The algorithm scans the acoustic data by bins of N samples, equals to the duration t of the calls composing the dictionary. For D-calls, $t = 8$ s, for Aus PBW calls $t = 25$ s, for Mad PBW calls $t = 20$ s and for Ant BW calls, $t = 18$ s. The Orthogonal Machine Pursuit (OMP) algorithm then seeks the linear combination of K elements among the M dictionary elements that best matches the observed signal. In other words, for an observation vector y and a known dictionary \mathbf{D} , the algorithm estimates θ as the approximate solution of

$$\min_{\theta \in \mathbb{R}^M} \|y - D\theta\|_2^2 \text{ subject to } \|\theta\|_0 \leq K. \quad (1)$$

Then the following threshold test,

$$\tau_{\eta}(y) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{\|D\theta\|_2^2}{\|y-D\theta\|_2^2} > \eta \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

with $\tau_{\eta}(y)$ the decision metric and η the detection threshold, is performed. $\tau_{\eta}(y)$ can be interpreted as a measure of the Signal to Interference-plus-Noise Ratio (SINR) with $\|D\theta\|_2^2$ an estimate of the signal of interest and $\|y-D\theta\|_2^2$ an estimate of the interference-plus-noise [16]. A detection is considered to be true only if the SINR is above the threshold η (see Section III-A for an explanation threshold choice).

F. Performances evaluation

Performances are tested in three steps, each one operated on a data subset presented in section II-B. The first step aims at appraising the detector performance on a controlled, interference-free dataset. The second step assesses the performance variability due to the annotator ground-truth data. The last step will test the performances against data variability, such as the presence of interferences, or various call abundance scenarios.

1) *Step 1:* The main goal is to determine the average detection and false-alarm rates for stereotyped calls and D-calls. In order to do that, two datasets are extracted from the manually annotated calls of data subset 1: a training set, used to build the dictionary, and a test set, used to evaluate the performances. Usually, the learning set is made of a greater percentage of calls (at least 60 %) of the dataset than the test set. However here the purpose of the method is to detect calls from a large database with a limited amount of calls that define the dictionary. Therefore, the training set is made of less calls (50 for stereotyped calls and 200 for D-calls) than the test set. Evaluation of performance is assessed by comparing the detector outputs from the test set, with the ground truth detections established by an experienced human operator. Automated detections can be either true positive, when the detected call matches with a manually annotated call, i.e. when the midpoint of the time of the automated detection falls within the time bounds of the manual detection and vice versa; or false positive, when the detector detects something that has not been logged by the expert analyst. Detection rate, also named recall, is defined as the proportion of true calls found by the automated detector against the total number of calls in the manually annotated data set:

$$\text{Recall} = \frac{\text{Number of true positive}}{\text{Total number of call in the ground truth}}. \quad (3)$$

The number of false alarm per hour, or false-alarm rate, is the ratio between the number of false positive and the duration of the dataset in hours.

$$\text{False alarm rate} = \frac{\text{Number of false positive}}{\text{Dataset duration (in hours)}}. \quad (4)$$

The second goal is then to evaluate the robustness of the detector by doing some cross validation, i.e. to test whether

the detector performance is dictionary dependent or not. Performances are computed multiple times on the same dataset by using the k-fold cross validation method to constitute the training and test sets. Mean and standard deviations are then computed for analysis.

2) *Step 2:* The second step is to assess the performance variability due to the analysts' manual annotation of the data. The dictionaries used by the detector are built from one of the step 1 training set. Detector outputs are compared to the ground truth built by the multiple analysts. Detection and false-alarm rates are then averaged and standard deviations computed for the three call types.

3) *Step 3:* To examine the effect of interferences and call abundances on the automated detection, the detector is tested on a larger dataset made of the acoustic data recorded at site WKER in 2015. The dictionaries used by the detector are the same as in step 2. Here, a detection rate cannot be reported, since a manual ground-truth of a whole year dataset would be time consuming and tedious to establish. Yet, a false-alarm rate can be quantified by checking and classifying the detector outputs: a detection is declared as true when the detection is indeed a call, or false when the output is an interference. The interferences are then manually sorted into categories, according to the types occurring the most regularly.

III. RESULTS - PERFORMANCE EVALUATION

In this section, performance and their variability are evaluated for stereotyped and non-stereotyped blue whale calls on three data subsets of the OHASISBIO hydroacoustic data.

A. Performance evaluation on data subset 1

Figure 3 represents the Receiver Operating Characteristic curves for all call types detection done on data subset 1. These curves represent the average detection rate as a function of the average false alarm rate, both estimated for the k test sets. The number of false alarms per hour is determined by the detection threshold η . Best performances are achieved when

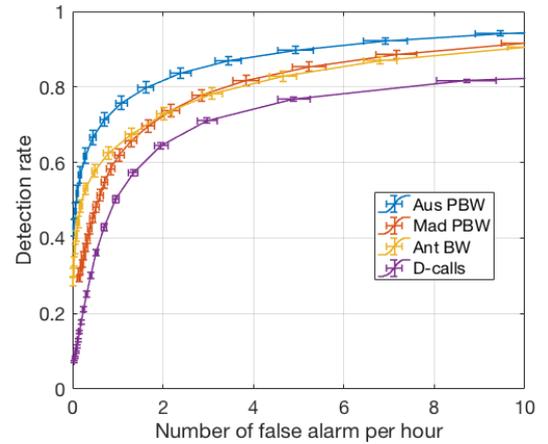


Fig. 3. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves for the three blue whale stereotyped calls and D-calls

the detection rate is maximized for the smallest false alarm rate possible. The detector seems to perform better on stereotyped calls, with a detection rate at least 10% higher than on D-calls, regardless of the false-alarm rate. Even among stereotyped calls, detection rates are variable with a higher detection rate for Aus PBW at constant false alarm rate. To evaluate the effect of the Sound to Noise Ratio of the calls on detection performance, Figure 4 displays the detection rate of all call types for a fixed threshold η set to -8.2 for Aus PBW, -8 for Mad PBW, -9.1 for Ant BW, and -11.6 for D-calls, which correspond to an average false-alarm rate of 1.15/h, 1.06/h, 1.06/h, and 0.96/h, respectively. For each noisy observation y of a call, the SNR is estimated in the call bandwidth reported in Table I as

$$SNR = \frac{y^T y}{N\sigma^2} - 1, \quad (5)$$

where y is the call signal and σ^2 is given by the robust estimator detailed in [24, Appendix A].

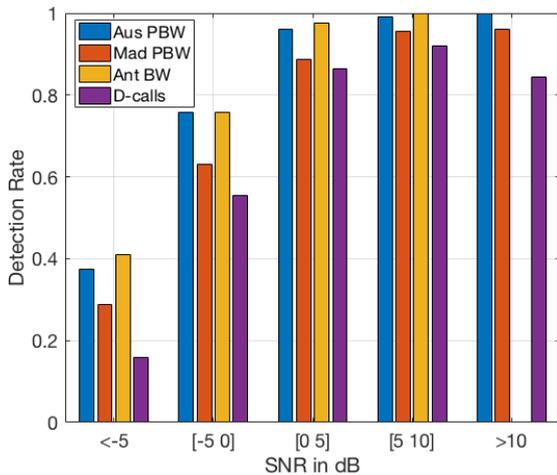


Fig. 4. Detection rate as a function of the Signal to Noise Ratio of the calls. The false alarm rate is set at 1 per hour for all the calls.

Detection rates increase with the SNR of the calls and become greater than 95% for stereotyped calls with a SNR above 5 dB. A variation in recall is observed within stereotyped calls and the detector performs globally better on Aus PBW and Ant BW calls than on Mad PBW calls. Overall, for D-calls, recall is lower and reaches a plateau between 80% and 90%, even for high SNR calls.

B. Performance evaluation on data subset 2

Detection was performed using dictionaries build in step 1 and detection threshold are defined as above. Means and standard deviations of the detection and false-alarm rates are illustrated in Figure 5. Average detection rate of Aus PBW and Mad PBW calls both reach 0.58 but with a wider standard deviation for Mad PBW calls (± 0.01 and ± 0.03 respectively). Mean recall values for D-calls is lower than for stereotyped calls (0.47 ± 0.01). All false alarm rate values are below one

per hour with lower value for Aus PBW calls (0.46 ± 0.32) than for Mad PBW and D-calls (0.67 ± 0.15 and 0.67 ± 0.15 respectively).

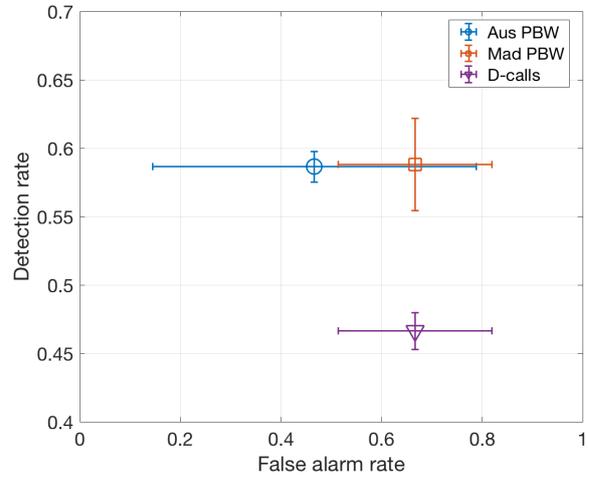


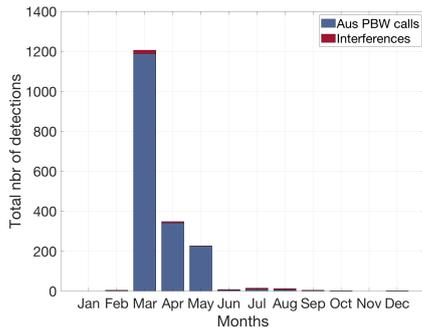
Fig. 5. Recall and false alarm rate (mean and standard deviations) for three call types, determined by comparing the detector outputs with different ground truth built by three analysts.

C. Performance evaluation on data subset 3

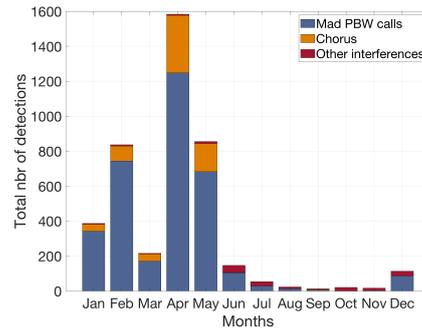
Long-term detections on WKER 2015 site are summarized in monthly histograms for each of the four calls (Figure 6). Detection patterns are highly seasonal with detection peaks in austral autumn for both pygmy blue whale acoustic populations and in winter and spring for Antarctic blue whale calls and D-calls. For stereotyped calls, the number of false alarm is far below the theoretical one false alarm per hour. This number is consistent over the year and therefore over different call abundance scenarios. Most interferences are due to chorus, especially for Mad PBW calls. Other interference types include ship noise and undetermined continuous banded noise in the call frequency bandwidth. For D-calls, the false alarm rates and types are very variable depending on the months. Two main categories of interferences have been identified: air gun shots and fin whale 40 Hz calls. The former are impulsive broadband sounds that are emitted periodically every 10 seconds during seismic surveys. The latter are thought to be social sounds produced by fin whales. They fall in the same frequency band as D-calls but they are more impulsive with a duration below one second; their spectrograms are compared in Figure 7. Other types of interference are mostly broadband short sounds and their occurrence seem constant over the month.

IV. DISCUSSION/CONCLUSION

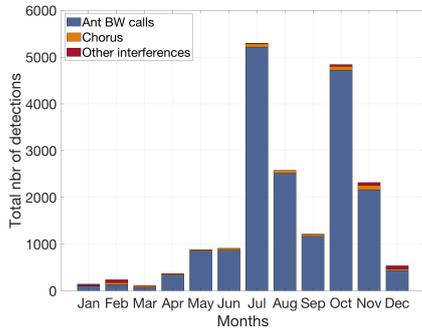
Evaluating detector performances is essential to allow the correct use and interpretation of passive acoustic data [18]. Multiple sources of performances variability of SRD are investigated in this study, including call type, composition of the dictionary, SNR, ground-truth manual annotation as well as interference type and abundance. Then, taking these



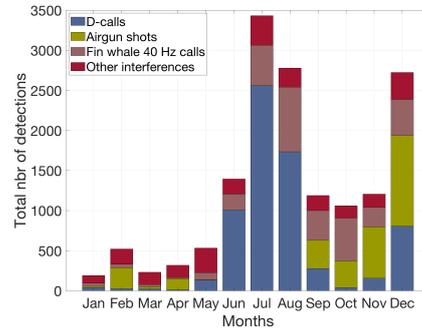
(a) Australian pygmy blue whale call detections for WKER 2015



(b) Madagascan pygmy blue whale call detections for WKER 2015

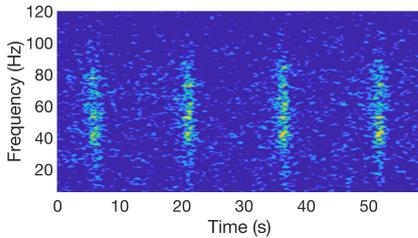


(c) Antarctic blue whale call detections for WKER 2015

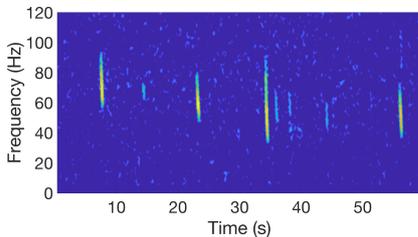


(d) D-calls detections for WKER 2015

Fig. 6. Detection patterns as found by the detector at site WKER in 2015. (a) Australian pygmy blue whale call detections (b) Madagascan pygmy blue whale call detections (c) Antarctic blue whale call detections (d) D-call detections



(a) Air gun shots



(b) Fin whale 40 Hz calls

Fig. 7. Spectrogram of the two main types of interferences mistaken for D-calls by the SRD

observations into consideration, a detection strategy for long-term monitoring is presented.

A. Call type, SNR and dictionary composition effects on the detection performances

An efficient detector must combine high recall with low and consistent false alarm rates. Here, for a predetermined false alarm rate, the detector appears to generally perform better on stereotyped calls. Indeed, while detection rate reaches almost 95% for high SNR stereotyped calls, it doesn't exceed 85% even for very high SNR D-calls. This trend is also observed in reference [26], where the detection performance are better for Ant BW stereotyped calls than for D-calls and in reference [27] where false alarm rate is particularly high for an average recall. D-calls, are highly variable but simple down-sweep signals, that can easily be mistaken for any kind of transient noise, often very abundant in underwater acoustic soundscapes (e.g. seismic shots). This may explain why most algorithm fail at identifying them, even when they have a high SNR.

Detection performances are also variable among stereotyped calls. If on the ROC curves in Figure 3 the detector seems to perform better on Aus PBW, Figure 4 actually shows that performances are equivalent for Aus PBW and Ant BW calls. But because the proportion of calls with a SNR below -5 dB is more than twice higher in the Ant BW dataset than in the

Aus PBW dataset, the overall performances are lower for Ant BW calls. For similar SNR bins, recall of Mad PBW is lower than for the two other stereotyped calls. The OHASISBIO dataset is characterized by the presence of an important chorus, especially in the Ant BW and Mad PBW frequency range. Reference [6] identified the presence of an Ant BW chorus as one of the main factors complicating reliable Ant BW call automated detection. They used two detectors that were designed to detect incomplete Ant BW calls, where the down-sweep and 18 Hz tonal unit are dissipated and where the tonal 28 Hz unit is the only unit left. Here, the detector is trained on a dataset with complete and incomplete calls and seems to perform well, even in the presence of an Ant BW chorus (e.g. Figure 6). However, the detector has more difficulty to deal with a Mad PBW chorus, probably due to the loudness of this chorus associated with the call simple time-frequency shape. As high SNR calls are more likely to have been emitted in the hydrophone vicinity, high detection rates of such calls imply that post-analysis on whale presence will be reliable in a small detection range. However, this range has not yet been properly estimated for blue whales. In view of the variable SNR proportions in the tested datasets, representing recall as a function of call SNR might be a good practice when reporting detector performances.

K-fold cross validation was used to make sure that performances were not dictionary dependent. Indeed, similarly to when a new kernel template is designed spectrogram correlation, performances should not be impacted when a new dictionary is built from data. Here, the recall standard deviation for a fixed false alarm rate of one false alarm per hour is in the order of ± 0.01 , allowing to state that the detection is not dictionary dependent.

B. Manual annotation effects on detection performances

Human annotators do not always select the same calls when building the ground truth, which impacts the recall and false alarm rate values. Many external factors can influence the analysts annotation behavior, such as their level of expertise, personality or the time of day [6]. Besides, variability in annotation is likely to be higher for low SNR, short duration or altered calls [18]. The error bars in Figure 5 show that even for a small data subset, variations in data annotations induces variations in the detector performance. A wider study including bigger datasets and more analysts could help building a standardized collaborative annotation methodology for reference datasets. We also observe that false alarm rate highly depends on the annotation procedure. Indeed, for datasets 1 and 2, human analyst(s) first annotated the datasets to create a ground-truth reference against which and the detector performances are assessed. For dataset 3, the detector was first applied on the data and then a human operator double checked the detections. The false alarm rate is much lower in this second approach. When an analyst annotates a dataset after the detector, she/he will tend to trust the detector and classify as calls what she/he may not have annotated otherwise. As a result, false alarm rates based on manual annotations with

no a priori will be overestimated, whereas false alarm rates based on a manual check of computer annotated data will be underestimated.

C. Interference and call abundance effects on detection performances

Performance variability is often defined according to three call abundance scenarios [6], [18]. But these scenarios often reflect different data qualities, with higher call abundances related to an increasing presence of high SNR calls, and lower call abundances often related to an increasing presence of low SNR calls and chorus [6]. Therefore, evaluating the effect of SNR on the performances, as shown in Figure 4, is equivalent. Influence of call abundance on false alarm rate can also be observed on dataset 3. Overall, this metric is stable over time periods covering different abundance scenarios, when only taking into account the false detections due to non specific interference types (e.g. air guns, fin whale 40 Hz calls).

Presence of interferences in large datasets is inevitable. Characterizing them is fundamental to avoid any bias during long term detection. By applying the SRD on a whole year, we were able to count and identify the interference types that could mislead the detector. For stereotyped calls, the main interference type was the chorus, especially for Mad PBW. It will not affect the presence patterns, but should probably be taken into account for an analysis on density estimation [19]. The two main interferences that affect the D-call detections — seismic airgun shots and fin whale 40 Hz pulses — are either very numerous or highly seasonal, and would completely bias an analysis of blue whale presence if not removed. Because those two sound types are well identified, the following detection strategy was designed to reject them automatically.

D. Strategy for long term detection

To be efficient, the detection strategy has to take into account the dataset and the call characteristics and the aim of the analysis that are going to be undertaken on the detection outputs. In this paper, the strategy aims at limiting the number of interference detections while keeping a correct recall, at least for high SNR calls.

1) *Limitation of false alarm detections:* Detection thresholds were determined empirically, after plotting detection and false alarm rates on ROC curves represented in Figure 3. A threshold corresponding to one false alarm per hour was chosen to limit the number of false detections in the long-term study. This is particularly important to discern periods of call absence. Moreover, if double-checking manually the detector outputs is an option for small datasets, in the case of OHASISBIO 50-year-records (all sites combined), this process would be far too tedious and time consuming.

2) *Automated interferences removal:* Testing the detector on one year of recording allowed to identify the sounds that were mistaken for calls by the detector. For stereotyped calls, most of the false alarms are due to chorus, and only a small, consistent number was due to 'true' interferences. However for

D-calls, detection of airgun shots and fin whales 40 Hz pulses is a major concern. Getting rid of those detections would greatly improve the long-term detection and avoid double checking too many data. Two methods were tested to discard those interferences.

- Fin whale 40 Hz pulses are shorter (less than a second long), and tend to concentrate more energy than D-calls [28]. Thus, a high amplitude peak is often detectable in their waveform. The calculation of the call to noise ratio (CNR) is used here to discriminate them from D-calls. CNR is computed within the time frame of every detection output. The signal part assigned to the call is defined between the two peaks surrounding the maximum amplitude peak so that they are the first two peaks (from the maximum amplitude peak) to be under the total peak mean. CNR is then computed as the peak power minus noise power, over the overall noise power. Figure 8 represents the distribution of this ratio for D-calls in blue, and fin whale 40 Hz calls in pink. D-calls mainly have a lower call to noise ratio than fin whales 40 Hz calls. Assuming that D-call CNRs follow a gamma distribution with $\alpha = 3.77$ and $\beta = 2.03$ and fin whale 40 Hz pulse CNR follow a normal distribution with $\mu = 17.8$ and $\sigma = 4.84$, setting a threshold of $\text{CNR} = 13$, allows to automatically discard about 68% of the fin whale calls while keeping 90% of D-calls.

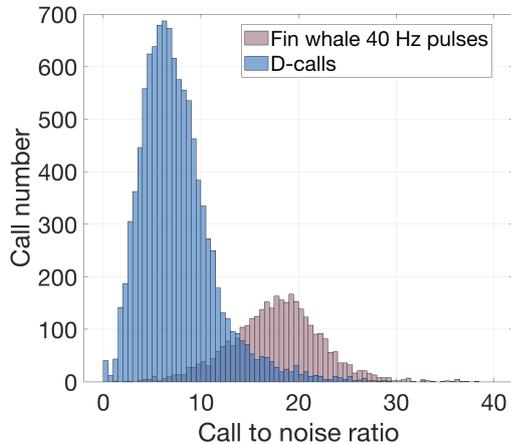


Fig. 8. CNR repartition of D-calls and fin whale 40 Hz calls detected by the SRD detector

- Air gun pulses are associated with both commercial and research seismic surveys and are generally fired every 8 to 15 seconds over time periods spanning from days to weeks [29], [30]. Periodicity of airgun shots thus will be used to discriminate them from D-calls. Therefore, discarding those sounds cannot be done directly on the detector outputs that contains only few airgun shots, for which the periodicity does not appear clearly. Instead, a new detection technic combining an energy sum detector [30], [31] and a periodicity measure is employed. In

practice, a spectrogram of each whitened (see paragraph II-D) sound file is computed with the following parameters: Hanning window with 90% overlap and 1200-point FFT). Values in the spectrogram are summed across frequencies within the 30-70 Hz band, resulting in a new time series with a sampling frequency of 2.99 Hz. Then, the power spectral density (PSD) estimate, found using Welch's overlapped segment averaging estimator, of 1.1-hour long signals is computed with 250-sample windows, 20% overlap and 1024-point FFT. Fin whale 20 Hz pulses are also produced periodically, but they are mainly emitted in the 15 Hz - 30 Hz bandwidth and have a 13-second inter pulse interval [32]. If a peak occurs in the FFT at a frequency from 0.083 Hz to 0.125 Hz, corresponding to air gun firing periodicity of 8 to 12 seconds, to exclude possible confusion with fin whale 20 Hz pulses, we consider that the whole file might contain airgun sounds and should therefore be excluded from the study.

Once those two automated processes are applied on D-calls detection outputs of WKER 2015, the D-Call detections can be sorted out (Figure 9). Almost 95% of the fin whale 40 Hz and air gun pulses have been eliminated while 78% of D-calls remains.

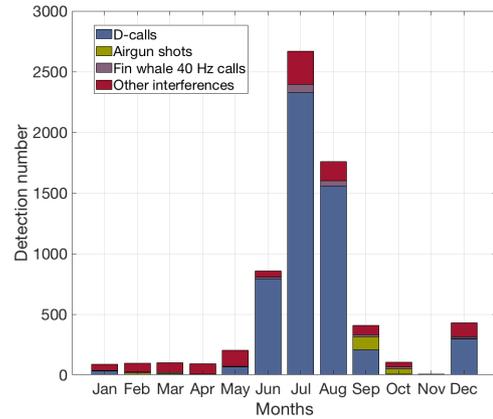


Fig. 9. Histogram of D-calls detections at WKER in 2015, after automated removal of fin whale 40 Hz and airgun pulses

3) *Adaption to blue whale call pitch shift*: Blue whale call-pitch displays inter-annual and intra-annual variations [5]. The latter are very limited in our dataset, due to the highly seasonal call presence [22]. The dictionaries used for stereotyped calls in this study were built from calls originating from different periods in 2015 only and thus should reflect these variations so that performances are not affected. The inter-annual decrease, at steady and specific rates for each whale population [5], has a higher magnitude and for a 8-year-long data set, a detection strategy must be designed to account for it. As shown in Figure 3, performances are dictionary independent. Therefore, the chosen approach is to build a new dictionary for every year, directly from the detector outputs based on a dictionary

from a contiguous year. Since for a given year, all sites display the same frequency decrease, the detector is only applied on one site from the new detection year. For each call type, the best site is selected to benefit from the most appropriate presence pattern : WKER for Ant BW calls, MAD for Mad PBW calls and NEAMS/SWAMS for Aus PBW calls. Each dictionary will be defined by 50 randomly-selected detector outputs among the ones with the higher SINR, to avoid any false-detections due to interferences. Dictionary parameters K and M will stay the same.

V. CONCLUSION

The performances of a detector based on dictionary learning and sparse representations (SRD) have been thoroughly evaluated for stereotyped and non-stereotyped calls of blue whales. They have been shown to vary with the call types, SNR, dictionary composition, annotator ground-truth and the presence of interferences. To palliate some detector weaknesses and to reduce the amount of double checking by an analyst, strategies have been designed to effectively and reproducibly apply this detector to a long-term dataset. In the future, this analysis will help us to implement this detection approach on the whole OHASIS-BIO database and to infer in confidence the blue whale presence, behavior and migratory routes in the Southern Indian Ocean from the detected calls.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to the officers and crew members of RV Marion Dufresne for the successful deployments and recoveries of the hydrophones of the OHASISBIO experiments. The contribution of Mickael Beauverger at LGO to the logistics and deployment cruises is greatly appreciated. The authors also wish to thank François-Xavier Socheleau, who developed the SRD, for his precious advice on automated mysticete call detection. M.T. was supported by a Ph.D. fellowship from the University of Brest.

REFERENCES

- [1] P.O. Thompson, Underwater Sounds of Blue Whales, *Balaenoptera musculus*, in the Gulf of California, Mexico. *Mar. Mammal Sci.*, 12 (April):288–293, 1996.
- [2] W.C. Cummings and P. O. Thompson, Underwater Sounds from the Blue Whale, *Balaenoptera musculus*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 50(4B):1193, 1971.
- [3] M.A. McDonald, S.L. Mesnick, and J.A. Hildebrand, Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: using song to identify populations. *J. Cetacean Res. Manage.*, 8(1):55–65, 2006.
- [4] M.A. McDonald, J.A. Hildebrand, and S.L. Mesnick, Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs. *Endang. Spec. Res.*, 9(1):13–21, 2009.
- [5] E.C. Leroy, J.-Y. Royer, J. Bonnel, and F. Samaran, Long-term and seasonal changes of large whale call frequency in the Southern Indian Ocean. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 1231-13, 2018.
- [6] E.C. Leroy, K. Thomisch, J.-Y. Royer, O. Boebel, and I. Van Opzeeland, On the reliability of acoustic annotations and automatic detections of Antarctic blue whale calls under different acoustic conditions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 144(2):740–754, 2018.
- [7] E.M. Oleson, J. Calambokidis, W. Burgess, M.A. McDonald, C.A. Leduc, and J.A. Hildebrand, Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 330(January):269–284, 2007.
- [8] L. Lewis and A. Širović, Variability in blue whale acoustic behavior off southern California. *Mar. Mammal Sci.*, 34:311–329, 2017.
- [9] D.K. Mellinger, and C.W. Clark, Blue whale (*Balaenoptera musculus*) sounds from the North Atlantic. *J. Acoust. Soc. Am.*, 114(2):1108–1119, 2003.
- [10] A. Širović, J.A. Hildebrand, and D. Thiele, Baleen whales in the Scotia Sea during January and February 2003. *J. Cetacean Res. Manage.*, 8 (2):161–171, 2006.
- [11] F.W. Shabangu, K.P. Findlay, D. Yemane, K.M. Stafford, M. van den Berg, B. Blows and R.K. Andrew, Seasonal occurrence and diel calling behaviour of Antarctic blue whales and fin whales in relation to environmental conditions off the west coast of South Africa. *J. of Marine Systems*, 190:25–39, 2019.
- [12] F. 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.*, 36:93–103, 2008.
- [13] M.A. McDonald, An acoustic survey of baleen whales off Great Barrier Island, New Zealand. *New Zeal. J. Mar. Fresh. Res.*, 4:519–529, 2006.
- [14] D.K. Ljungblad, K.M. Stafford, H. Shimada, and K. Matsuoka, Sounds attributed to Blue Whales Recorded off the Southwest Coast of Australia in December 1995. *Rep. Intl. Whal. Comm.*, 47:435–439, 1997. ISSN 15610713.
- [15] E.M. Oleson, S.M. Wiggins, and J.A. Hildebrand, Temporal separation of blue whale call types on a southern California feeding ground. *Animal Behaviour*, 74:881–894, 2007.
- [16] F.-X. Socheleau, and F. Samaran, Detection of Mysticete Calls: a sparse representation-based approach. *Res. Report IMT Atlantique*, 1-19, 2017
- [17] T. Guilment, F.-X. Socheleau, D. Pastor, and S. Vallez, Sparse representation-based classification of mysticete calls. *J. Acoust. Soc. Am.*, 144(3):1550–1563, 2018.
- [18] A. Širović, Variability in the performance of the spectrogram correlation detector for North-east Pacific blue whale calls. *Bioacoustics*, 25(2): 145–160, 2016.
- [19] T.A. Marques, L. Thomas, S.W. Martin, D.K. Mellinger, J.A. Ward, D.J. Moretti, D. Harris, and P.L. Tyack, Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological Reviews*, 88(2):287–309, 2013.
- [20] J.-Y. Royer OHA-SIS-BIO: Hydroacoustic observatory of the seismicity and biodiversity in the Indian Ocean <https://doi.org/10.18142/229>, 2009.
- [21] F. Samaran, K.M. Stafford, T.A. Branch, J. Gedamke, J.-Y. Royer, R.P. Dziak, and C. Guinet, Variability in the performance of the spectrogram correlation detector for North-east Pacific blue whale calls. *Bioacoustics*, 8(8):1–10, 2013.
- [22] E.C. Leroy, F. Samaran, K.M. Stafford, J. Bonnel, and J.-Y. Royer, Broad-scale study of the seasonal and geographic occurrence of blue and fin whales in the Southern Indian Ocean. *Endang. Species Res.*, 37289–300, 2018.
- [23] <https://oceandataexplorer.org/>
- [24] F.-X. Socheleau, E.C. Leroy, A. Carvallo Pecci, F. Samaran, J. Bonnel, and J.-Y. Royer, Automated detection of Antarctic blue whale calls. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(5):3105–3117, 2015.
- [25] M. Aharon, M. Elad, and A. Bruckstein, K-svd: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation. *IEEE Trans. Signal Proces.*, 54(11):4311, 2006.
- [26] F.W. Shabangu, D. Yemane, K.M. Stafford, P. Ensor, and K.P. Findlay, Modelling the effects of environmental conditions on the acoustic occurrence and behaviour of Antarctic blue whales *PLoS ONE*, 12(2): 1-24, 2017.
- [27] K. Thomisch, Distribution patterns and migratory behavior of Antarctic blue whales *PhD thesis, Alfred Wegener Institut*, , 2017.
- [28] A. Širović, L.N. Williams, S.M. Kerosky, S.M. Wiggins, and J.A. Hildebrand, Temporal separation of two fin whale call types across the eastern North Pacific *Marine Biology*, 160(1):47-57, 2013.
- [29] Q.P. Fitzgibbon, R.D. Day, R.D. Mccauley, C.J. Simon, and J.M. Semmens, The impact of seismic air gun exposure on the haemolymph physiology and nutritional condition of spiny lobster, *Jasus edwardsii* *Marine Pol. Bulletin*, 125(1-2):146-156, 2017.
- [30] S.L. Nieuwkerk, D.K. Mellinger, S.E. Moore, K. Klinck, R.P. Dziak, and J. Goslin, Sounds from airguns and fin whales recorded in the mid-Atlantic Ocean, 1999-2009 *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(2):1102-1112, 2012.
- [31] D.K. Mellinger, K.M. Stafford, and C.G. Fox, Seasonal occurrence of sperm whale (*Physeter Macrocephalus*) sounds in the gulf of Alaska, 1999-2001 *Mar. Mammal Sci.*, 20(1):48-62, 2004.
- [32] A. Širović, Ana, 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: Topical Studies in Oceanography*, 51:2327-2344, 2004.

2.1.5 Limites du détecteur

L'évaluation des performances du détecteur a permis de se rendre compte de ses atouts, mais aussi de ses limites. Une difficulté dans sa mise en oeuvre est liée à la création des dictionnaires. En effet, leur utilisation doit faciliter la représentation de la variabilité des vocalisations (*e.g.* formes complètes ou incomplètes, formes en présence d'interférences). Cependant, pour qu'un dictionnaire soit exhaustif et représentatif de cette variabilité, notamment dans le cas présent où les fréquences des signaux changent au cours du temps, il faudrait examiner et annoter un très grand nombre de données, provenant idéalement de toutes les années d'enregistrement. Pour résoudre cette difficulté, nous avons opté pour l'utilisation d'un dictionnaire différent par année d'observation pour les vocalisations stéréotypées. Une solution pour diminuer la tâche d'annotation serait d'utiliser des modèles paramétriques pour représenter les vocalisations dans les dictionnaires (Socheleau and Samaran, 2018). Utiliser ces modèles permettrait de rechercher des types de vocalisations plus rares, sans avoir au préalable trouvé et annoté ces vocalisations dans une base de données d'apprentissage. Néanmoins, les modèles statistiques ne sont pas toujours triviaux à définir, surtout pour des vocalisations complexes.

Le nombre élevé de fausses alarmes lors de la détection de D-calls est une limite importante du SRD. Ces vocalisations sont de simples *chirp* ou modulations de fréquences entre environ 100 Hz et 30 Hz. De nombreux bruits sous-marins ont des caractéristiques similaires, à commencer par les bruits anthropiques comme des bruits de chaîne, des bruits électroniques ou encore des tirs de canons à air (voir Figure 2.4). De nombreuses espèces

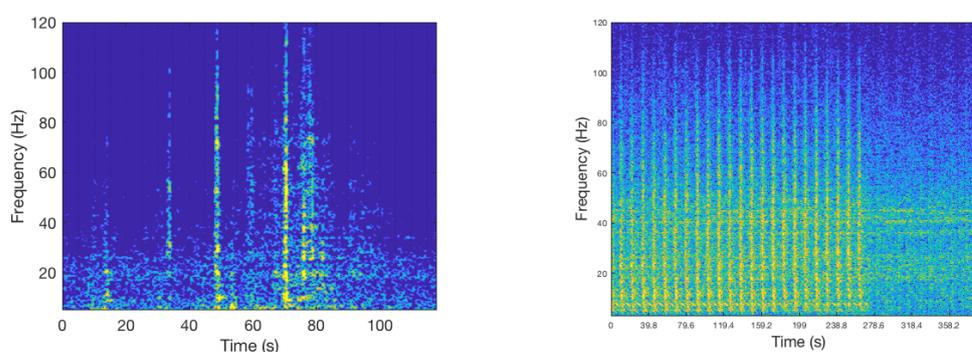


FIGURE 2.4 – Spectrogrammes d'interférences pouvant être détectées comme des D-calls : possiblement bruits de mouillage ou chocs sur le mouillage à gauche et tirs sismiques à droite

de mysticètes produisent des vocalisations semblables aux D-calls (Figure 2.5). Les rorquals communs produisent un son impulsionnel (<1 sec) appelé vocalisation à 40 Hz, mais qui peut se situer entre 100 et 30 Hz (Watkins, 1981; Širović et al., 2013). Un son similaire est produit par les baleines franches (*Eubalaena* sp.) mais contrairement aux D-calls, il est modulé des basses vers les hautes fréquences (Cummings et al., 1972; Clark,

1982; Webster et al., 2016). Les rorquals de Rudolphi (*Balaenoptera borealis*) émettent une variété de *downsweeps* (sons modulés des hautes aux basses fréquences), principalement entre 100 et 20 Hz (McDonald et al., 2005; Rankin and Barlow, 2007; Baumgartner et al., 2008; Tremblay et al., 2019). Les sons produits par les rorquals de Bryde (*Balaenoptera edeni*) sont assez peu documentés, mais les spectrogrammes présentés par Širović et al. (2014) montrent des séries de courts *downsweeps* répétés régulièrement entre 120 et 70 Hz. Enfin, certains sons émis par les petits rorquals (*Balaenoptera bonaerensis*) ressemblent aussi à des D-calls Dominello and Širović (2016). Aucune étude acoustique ne s'est réellement intéressée à la présence de ces baleines dans le sud-ouest de l'océan Indien. Néanmoins, leur détection dans tous les océans du globe et plus particulièrement aux alentours de l'océan Indien rend leur présence tout à fait probable dans notre secteur.

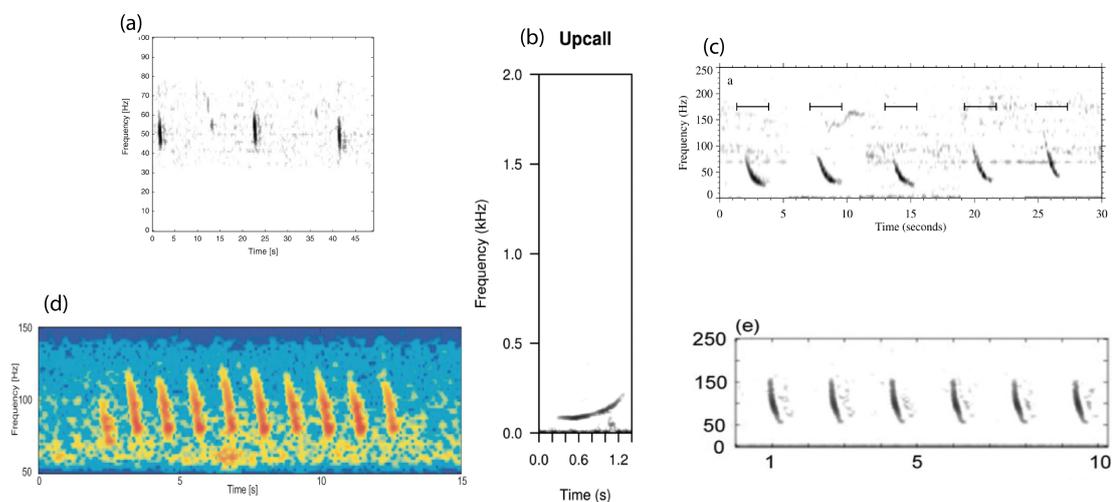


FIGURE 2.5 – Spectrogrammes de vocalisations de (a) rorquals communs (Širović et al., 2013) (b) baleines franches australes (Webster et al., 2016) (c) rorquals de Rudolphi (Baumgartner et al., 2008) (d) rorquals de Bryde (Širović et al., 2014) (e) petits rorquals (Dominello and Širović, 2016)

Comme mentionné plus haut, les deux types d'interférences les plus communs dans les données OHASISBIO sont les tirs sismiques et les vocalisations à 40 Hz de rorqual commun. Les algorithmes de post-traitement mis en place permettent d'en débarrasser d'un maximum automatiquement. Néanmoins, une vérification manuelle est toujours requise, afin d'éliminer les fausses alarmes provoquées par les autres sources citées ci-dessus. Ce tri a été fait en se basant sur les spectrogrammes fournis dans les divers articles de la littérature.

Les données provenant des triplets d'hydrophones se sont avérées utiles pour tester la fiabilité du détecteur en comparant les patrons de détection. La Figure 2.6 représente le nombre de détections par semaine sur trois triplets d'hydrophones (NCRO, SWAMS, WKER). Les patrons de présence quasi-identiques entre hydrophones d'un même site indiquent tout d'abord que les résultats de détection sont robustes et fiables. Ensuite, cela

2.1 Détection automatique des vocalisations de baleines bleues

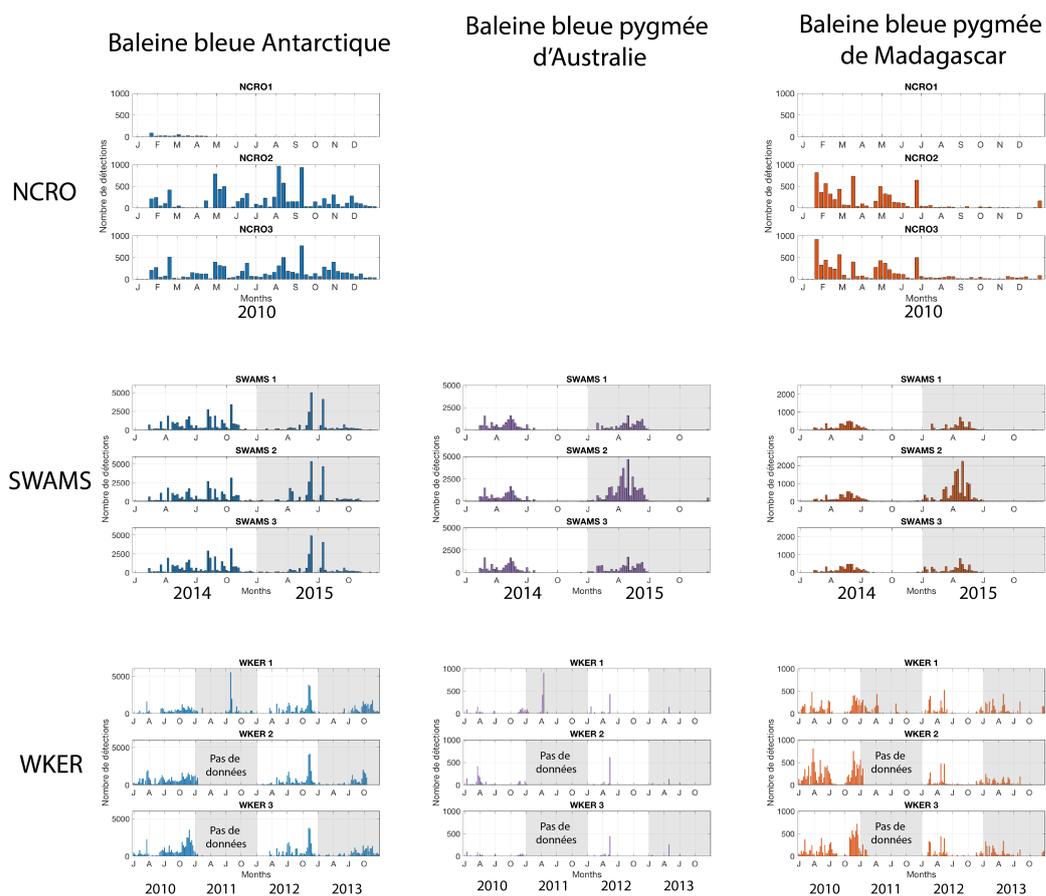


FIGURE 2.6 – Patterns de détection sur différents triplets d’hydrophones du réseau OHA-SISBIO pour 3 populations acoustiques de baleines bleues. En ordonnée, le nombre de détections par semaine et en abscisse, les mois de l’année (J : Janvier, A : Avril, J : Juillet, O : Octobre)

signifie qu’ils sont représentatifs de la présence de baleines bleues dans un rayon plus élevé que l’espace des hydrophones ($> 30\text{km}$). Une exception concerne l’hydrophone 2 du site SWAMS (2015), pour lequel le nombre de détections de vocalisations de baleines bleues pygmées d’Australie et de Madagascar est le double (voire plus) de celui détecté sur les enregistrements des hydrophones 1 et 3. La détection des vocalisations de baleines bleues Antarctique ne semble pas affectée. Le site SWAMS-2 est équipé d’un capteur Ultra Basse Fréquences (UBF) dont la sensibilité diffère des autres. L’explication la plus probable est que la sensibilité des hydrophones influe sur le seuil de détection et donc sur les performances du détecteur. Ces tests ayant été effectués après avoir appliqué le détecteur à l’ensemble des données, il a été décidé d’exclure toutes les détections provenant d’hydrophones UBF de nos analyses. Le nombre de détections est aussi beaucoup plus faible sur les enregistrements au site NCRO-1 qu’au sites NCRO-2 et NCRO-3. Cette différence vient de la fréquence d’échantillonnage du capteur situé au site NCRO-1, deux fois supérieure cette année-là (480 Hz) à celles des capteur de NCRO-2 et -3 (240Hz). Par défaut, lors de la détection automatique des vocalisations, la fréquence d’échantillonnage est réglée à 240 Hz. Les résultats de détection sont donc complètement faussés sur

l'enregistrement de NCRO-1. Ceci n'a pas d'effet sur la suite des travaux, le site NCRO-1 n'étant pas utilisé dans l'analyse des données.

Evaluer les performances du SRD a permis de démontrer que c'était un outil adapté pour la détection de vocalisations stéréotypées de baleines bleues. Cela a aussi permis de prendre conscience de ses limites et de l'adapter au mieux pour traiter les données acoustique OHASISBIO. Il reste néanmoins de nombreuses perspectives de travail pour rendre ce détecteur plus fiable et robuste, et permettre de standardiser son utilisation.

2.2 De la reproductibilité des analyses d'acoustique passive

La chaîne de traitement des données acoustiques est complexe. Le signal initial peut être modifié par de nombreux éléments durant sa propagation jusqu'au capteur, puis au cours des étapes d'enregistrement et de traitement des données. Tout au long de cette chaîne, de nombreux facteurs peuvent dégrader les signaux d'intérêt, et par conséquent altérer leur analyse et leur interprétation (Figure 2.7).

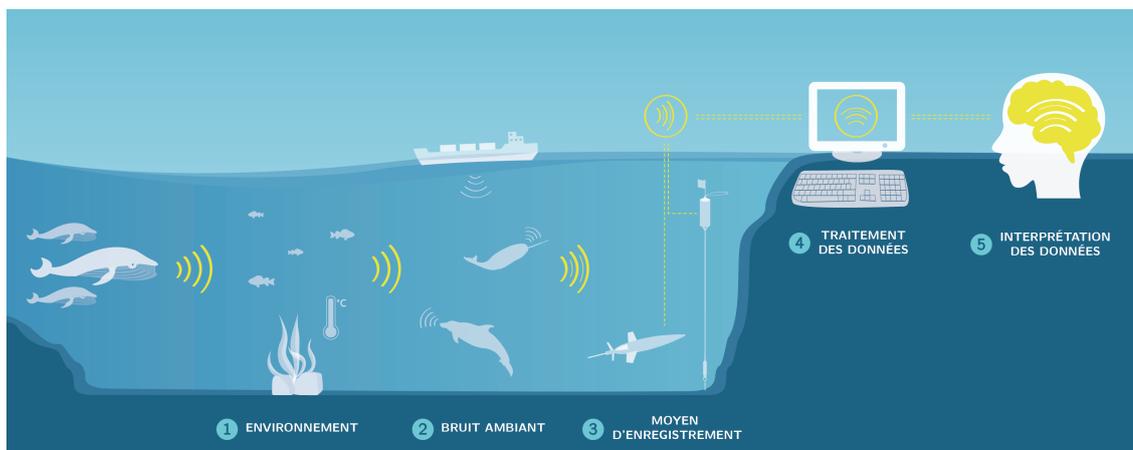


FIGURE 2.7 – Les différentes sources de variabilité dans la chaîne de traitement de données d'acoustique passive

1. Le **milieu de propagation**. La vitesse de propagation des ondes acoustiques dépend de la température et de la salinité de l'eau. De plus, la profondeur de la colonne d'eau et la composition des fonds marins jouent un grand rôle sur cette propagation et peuvent ainsi altérer les signaux sources.
2. Le **paysage acoustique** sous-marin, composé de diverses sources sonores, d'origine anthropique, géophysique ou biologique. Ces différents signaux peuvent se superposer au signal d'intérêt, parfois même le masquer totalement.

3. L'**instrument** de mesure. Il existe de nombreuses méthodes d'enregistrement acoustique, parmi lesquelles, les hydrophones tractés, les hydrophones sur mouillages, ou encore les sismomètres fond de mer. Selon l'instrument utilisé, les données peuvent être plus ou moins bruitées; c'est le cas avec les enregistrements provenant d'hydrophones tractés par exemple, dans lesquels le bruit du bateau et des bruits d'écoulement peuvent être important. De plus, il est courant pour des enregistrements long-terme de recourir à des *duty cycle*, c'est à dire de fractionner les périodes d'enregistrement (*e.g.* 20 minutes toutes les heures), qui altèrent l'information originale.
4. Le **traitement de la donnée**. De nombreux algorithmes de traitement du signal acoustique existent, dans tous les langages de programmation. Ils permettent de passer de la données acoustique brute à des métriques ou indicateurs mesurant divers paramètres acoustiques. La qualité de ces indicateurs sera tributaire des performances de l'algorithme.
5. La **validation experte**. Les résultats des algorithmes automatiques doivent toujours être validés par un expert, pour vérifier que tous les traitements sont corrects et fiables. Par exemple, lors de la détection automatique de signaux biologiques dans les données brutes, un opérateur devra vérifier si les détections sont bien les signaux biologiques d'intérêt ou de fausses détections, au moins sur une petite partie des données.

Certains facteurs sont intrinsèques à la propagation des ondes et aux propriétés du milieu océanique, sur lesquels un opérateur humain n'aura aucune prise. D'autres facteurs en revanche, peuvent faire l'objet d'efforts d'amélioration et de standardisation, notamment dans la chaîne d'acquisition et de traitement.

C'est de ce constat qu'est né le groupe d'intérêt scientifique OSmOSE (Open Science meets Ocean Sound Explorers) à l'ENSTA Bretagne en 2017. Ses objectifs visent à mieux caractériser la variabilité spécifique à chaque maillon de la chaîne de l'information présentée en Figure 2.7, pour obtenir des descripteurs acoustiques fiables et robustes. Des initiatives semblables sont à l'origine de la publication d'un guide des bonnes pratiques pour les mesures de bruit sous-marin ambiant (Robinson et al., 2014), plus focalisé sur la collecte des données que sur leur analyse. Merchant et al. (2015) soulignent justement l'absence de directives claires pour l'analyse de données d'acoustique passive qui permettraient de produire des mesures calibrées, indispensables pour des comparaisons significatives de paysages acoustiques à travers le temps et à différents endroits. A cette fin, ces auteurs partagent quelques codes MATLAB et R pour calculer des métriques simples.

Les valeurs de l'*open-source* font partie intégrante du projet OSmOSE en proposant des codes en langages de programmation 'libres' et des rapports de travail accessibles à

tous sur le Github du projet ODE (Ocean Data Explorer <https://github.com/Project-ODE>). Pour l'instant, le travail du groupe concerne principalement le traitement de l'information et la validation expert.

2.2.1 Standardiser le traitement des données

Les données acoustiques sous-marines, comme beaucoup d'autres à l'heure du *big data*, sont de plus en plus nombreuses et volumineuses. Par exemple, les hydrophones du réseau OHASISBIO enregistrent en continu depuis 2010, et ont déjà généré presque 2 To de données, l'observatoire *PerenniAL Acoustic Observatory in the Antarctic Ocean (PALAOA)* enregistre 140 Go de données par jours depuis 2005 (Kindermann et al., 2008) et la base de données de l'*Ocean Network Canada* contient plus de 300 To de données d'acoustique passive (Biffard et al., 2018). Le traitement de ces données peut alors devenir très couteux en temps. Le projet ODE traite conjointement les questions de standardisation et d'optimisation du traitement de la donnée. Pour cela, des méthodes de calcul distribué sont développées en Spark et en Hadoop et sont hébergées sur DATARMOR, infrastructure de calcul massif des institutions de la pointe Finistère installée sur le site Ifremer. Ces méthodes permettent de répartir les calculs sur différents ordinateurs (ou noeuds) en réseau, qui communiquent et coordonnent leurs actions. Les codes de calcul des descripteurs acoustiques sont disponibles en Python et les algorithmes sont décrits pour éviter toute 'boite noire' qui empêcherait la compréhension totale du code. A ce jour, le calcul des densités spectrales de puissance, des niveaux par bandes de tiers d'octave et des spectrogrammes long terme est disponible.

Un tel système, alliant des méthodes de post-traitement des données standardisées et des infrastructures de calculs sera très utile pour traiter les données OHASISBIO de façon robuste, fiable et rapide. Les perspectives de travail concernent l'agrandissement des descripteurs disponibles afin de pouvoir répondre au mieux aux questions d'analyse du bruit ambiant. Un autre objectif est de créer un banc d'essai de détecteurs automatiques de vocalisations de cétacés. Il permettrait d'évaluer les performances des détecteurs sur des jeux de données de référence. A terme, l'objectif est aussi de faciliter les études multi-modales entre acoustique et autres données océanographiques.

2.2.2 Standardiser les pratiques d'annotation

Importance de l'annotation manuelle

Les algorithmes de détection automatique de vocalisations de cétacés permettent de gagner énormément de temps de traitement et de réduire la subjectivité liée à la contribu-

tion d'un opérateur humain. Cependant, ils ne peuvent pas être utilisés sans supervision et l'évaluation de leurs performances *a priori* est nécessaire. Celle-ci se base généralement sur la comparaison entre les sorties du détecteur et des annotations de référence (cf. partie 2.1.3). De plus, à l'heure de l'intelligence artificielle, les algorithmes ont besoin de grandes bases de données pour apprendre les caractéristiques des signaux à reconnaître. L'annotation manuelle de données est donc la clef pour développer des algorithmes fiables de détections d'évènements sonores. L'annotation participative, ou collaborative, (*i.e.* faire annoter un même jeu de données par plusieurs personnes) est une méthode puissante pour créer de grands jeux de données de référence. Cette méthode est déjà couramment utilisée en reconnaissance d'image (Deng et al., 2014; Krishna et al., 2017; Lintott et al., 2008) et commence à rencontrer le même succès en reconnaissance sonore (Lee, 2010; Levy, 2011; Cartwright et al., 2017, 2019). En acoustique aérienne, Cartwright et al. (2017) expliquent que visualiser les spectrogrammes aboutit à des annotations de meilleure qualité que de visualiser uniquement la forme d'onde. Ils ont aussi montré que des scènes acoustiques complexes entraînaient un accord plus faible entre annotateurs.

Contrairement au domaine de l'acoustique aérienne, où l'origine des sons est en général connue et facilement identifiable par un expert, l'origine des sons sous-marins est plus complexe à définir. Pour cela, il faut disposer de mesures conjointes acoustiques et visuelles préalables, qui permettent d'associer un son avec sa source. Puis les propriétés du milieu de propagation et la présence de bruit ambiant, souvent élevé, peuvent altérer ce son (Figure 2.7). Ces facteurs empêchent de labéliser les sons avec certitude, ce qui entraîne une difficulté supplémentaire. Récemment, des études ont tenté de quantifier la subjectivité de l'annotation manuelle de vocalisations de cétacés dans des données d'acoustique passive (Širović, 2016; Leroy et al., 2018c; Torterotot et al., 2019). Elles montrent que même entre experts, l'accord sur les annotations n'atteint pas 100%. De même, une personne annotant 2 fois les mêmes données n'est pas 100% cohérente d'une fois à l'autre (Leroy et al., 2018c).

Pour étudier et diminuer les effets de cette subjectivité, nous proposons une plateforme d'annotation qui facilitera l'annotation collaborative de données peu portables en raison de leur volume. Pour une première preuve de concept, nous avons testé sur cette plateforme l'annotation des données basse-fréquence du challenge de DCLDE 2015 par 6 opérateurs. Les résultats font l'objet d'un article co-écrit avec Paul Nguyen Hong Duc, en révision dans la revue *Ecological Informatics*.

Présentation de la plateforme Apose

Raven Pro est actuellement le logiciel le plus employé par la communauté bioacoustique sous-marine. Il est utilisé dans la plupart de mes travaux pour évaluer le SRD, car

la plateforme d'annotation Aplose n'était pas encore opérationnelle au début de ma thèse. Il permet de visualiser des spectrogrammes de données acoustiques et de les annoter directement, de façon interactive et fluide. Il s'agit cependant d'un logiciel payant. De plus, chaque annotateur doit être en possession des données et définit lui-même les paramètres de visualisation des spectrogrammes, qui varieront d'un opérateur à l'autre et influenceront la qualité des annotations. A l'inverse, Aplose est une plateforme partagée, gratuite et accessible par internet. Comme l'outil décrit précédemment, cette interface permet une annotation interactive de spectrogrammes de données acoustiques. Tout en palliant certaines limitations d'outils existants, elle répond à plusieurs exigences :

- L'accessibilité. L'interface doit être accessible facilement par tout le monde.
- La performance. L'interface doit offrir à l'utilisateur une expérience de qualité. Cela implique de limiter son temps de réponse en dessous d'une seconde. Elle doit aussi avoir la capacité d'intégrer facilement un grand nombre d'annotateurs en simultané.
- La plasticité. L'interface doit pouvoir facilement être modifiée afin d'intégrer de nouvelles fonctionnalités.
- L'exhaustivité. L'interface doit offrir un large éventail de fonctionnalités dédiées à l'annotation.

Pour répondre à ces exigences, la plateforme d'annotation Aplose est accessible à quiconque dispose d'une connexion internet. Les données acoustiques à annoter sont hébergées à un seul endroit, facilitant leur accès et les calculs de spectrogrammes sont optimisés pour réduire les temps de chargement. De plus, le calcul distribué permet d'augmenter les capacités de l'interface en ajoutant simplement des coeurs de calcul. Enfin, sa programmation en langages de haut niveau tels que Java et Python facilite l'ajout de nouvelles fonctionnalités.

Une capture d'écran de l'interface d'annotation Aplose est présentée sur la Figure 2.8. Elle a été prise lors de la campagne d'annotation des données DCLDE 2015, décrite en partie 2.2.2. Le principe de la plateforme est de permettre à l'utilisateur de faire défiler des spectrogrammes de données acoustiques, de repérer et d'encadrer interactivement les signaux d'intérêt, et de les labelliser. Les paramètres des spectrogrammes sont prédéfinis, donc identiques pour tous les annotateurs. Dans une phase de test, le choix des labels a été limité. Les annotations sont automatiquement sauvegardées (annotateur, date, heure, label, limites fréquentielles, ...).

La principale limitation de cet outil est qu'à ce jour, les données à annoter ne peuvent pas être stockées sur DATARMOR. Par conséquent, elles doivent être envoyées à la personne qui gère l'infrastructure informatique d'Aplose, et cette étape peut s'avérer compliquée quand des volumes importants de données sont en jeu. L'interface est présentée plus en détail dans le (rapport de travail OSmOSE) et fera l'objet d'une publication quand l'outil sera plus abouti.

Assessing inter-annotator agreement from collaborative annotation campaign in marine bioacoustics

Une première campagne d'annotation collaborative a été lancée sur la plateforme Aplose afin d'étudier les questions d'accord inter-annotateurs en bioacoustique sous-marine. Après avoir quantifié cet accord, nous avons étudié quelques sources potentielles de variabilité de l'annotation. Les résultats pourront être utiles pour la construction de protocoles standardisés d'annotation. Cette étude sert aussi de preuve de concept de l'interface d'annotation Aplose. De plus, c'est un premier pas vers la création de jeux de données de référence collaboratifs dans la communauté d'acoustique passive. En effet, la campagne d'annotation peut être toujours être complétée par de nouveaux annotateurs et les résultats seront automatiquement actualisés. A terme, les annotations pourront être utilisées pour des études comparatives d'algorithmes de détection et de classification. Ces questions font l'objet de l'article suivant rédigé en collaboration avec Paul Nguyen Hong Duc et accepté dans le journal *Ecological Informatics* en juillet 2020.

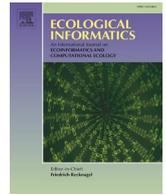
En résumé, cet article présente les résultats d'annotations manuelles des D-calls de baleines bleues et des vocalisations à 40 Hz (ou 40 Hz-calls) de rorquals communs dans les enregistrements de DCLDE 2015 basses-fréquences. Un groupe de 6 annotateurs aux profils divers (*i.e.* experts et amateurs) ont annoté les mêmes 50 heures de données à l'aide de l'interface Aplose. Bien qu'à grande échelle les annotateurs aient abouti à des nombres similaires d'annotations de D-calls et de 40 Hz-calls, à fine échelle, des différences significatives apparaissent. L'indicateur proposé pour mesurer le degré d'accord inter-annotateur est le Fleiss-Kappa (Fleiss, 1975). Il mesure l'accord inter-annotateur, corrigé par le hasard. L'accord inter-annotateur est bien meilleur pour les D-calls que pour les 40 Hz-calls. Sur 781 événements annotés comme 40 Hz-calls, seuls 9 ont fait l'unanimité et plus de 450 n'ont été annotés que par une seule personne alors que près de la moitié des D-calls détectés l'ont été par l'ensemble des opérateurs. L'accord inter-annotateur a ensuite été examiné en regard du RSB des événements annotés. L'accord est meilleur pour les D-calls avec un RSB plus élevé, en revanche, il n'y a aucun lien entre le RSB et l'accord inter-annotateur pour les 40 Hz-calls, ceux-ci étant vraiment annotés de façon très différente par tout le monde. Un autre résultat intéressant de cette étude est que l'accord inter-annotateur est plus élevé entre un annotateur expert et un novice

qu'entre deux experts. Cela confirme que cette tâche de reconnaissance d'image peut être effectuée efficacement par un non-expert, comme dans d'autres domaines de recherche telle l'étude du langage (Snow et al., 2008; Snel et al., 2012; Hantke et al., 2016). La différence d'annotation observée entre deux opérateurs expérimentés peut s'expliquer par leur personnalité. Par exemple, Rogers (2003) décrit deux personnalités d'annotateurs, affectant la classification des vocalisations : les *splitters* (ceux qui séparent) vont avoir tendance à trier les variantes d'un même type de vocalisation en autant de classes différentes tandis que les *lumpers* (ceux qui rassemblent) vont avoir tendance à regrouper ces variantes dans un même groupe.

Cette étude souligne l'importance de faire annoter un jeu de données d'acoustique passive par plusieurs personnes, pour s'assurer que les annotations représentent une base de données la plus "objective" possible pour des tâches d'apprentissage par des algorithmes d'intelligence artificielle ou pour l'évaluation des performances d'algorithmes de détection ou de classification automatique. Par exemple, le faible accord inter-annotateur pour la catégorie des 40 Hz-calls indique que les annotations ne sont pas très fiables et ne devraient donc pas être utilisées pour l'apprentissage ou l'évaluation des performances de méthodes de détections. Une suite logique de ces travaux serait de quantifier l'influence des différences d'annotations sur les performances de détection d'un ou plusieurs détecteurs automatiques

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Ecological Informatics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecolinf

Assessing inter-annotator agreement from collaborative annotation campaign in marine bioacoustics

Paul Nguyen Hong Duc^{a,*}, Maëlle Torterotot^{b,1}, Flore Samaran^{c,1}, Paul R. White^{d,1}, Odile Gérard^{e,1}, Olivier Adam^{a,f,1}, Dorian Cazau^{c,1}

^a Sorbonne Université, CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, UMR 7190, Paris, France

^b Université de Brest, CNRS, Laboratoire Géosciences Océan, Brest, France

^c ENSTA Bretagne, CNRS, Lab-STICC, UMR 6285, Brest, France

^d University of Southampton, ISVR, Southampton, United Kingdom

^e DGA-TN, Toulon, France

^f Université Paris-Saclay, CNRS, Institut des Neurosciences Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

ARTICLE INFO

Keywords:

DCLDE 2015 low frequency
Multi-annotator agreement
Marine bioacoustics
Reliability

ABSTRACT

It is currently widely recognized that automated methods are crucial to help processing long-term recordings of marine bioacoustics. To evaluate the efficiency of such methods, it is essential to develop large-scale annotated datasets. However, besides being laborious and resource intensive, recent studies have suggested that such a task could also be highly subjective with the generation of annotator specific errors.

In this work, we investigate the question of inter-annotator agreement from a multi-annotator annotation campaign performed on a marine bioacoustics dataset. After providing quantitative evidence of inter-annotator variability, we investigate potential sources on both the user annotation practice and the annotation data and task to better understand why and how such variability occurs. Our study reveals that the acoustic event type, the Signal-to-Noise Ratio of the acoustic event and the annotator profile are three examples of critical factors impacting the annotation results of a multi-annotator campaign.

1. Introduction

Passive acoustic monitoring (PAM) is an effective and harmless way to evaluate biodiversity across large spatio-temporal scales.

In PAM, detection and classification methods are necessary steps to perform accurate acoustic surveys and improve knowledge of both marine and terrestrial ecosystems. To evaluate the performance of such methods, they have to be developed and tested on reference annotated datasets. Moreover, in the 21st century, supervised artificial intelligence (AI) techniques have become an essential part of detection and classification methods. Most of them rely on the amount and quality of annotated training data. The process of collecting annotations is thus the main bottleneck in building such methods.

The traditional approach to collect annotations in PAM most often involve bioacousticians (with different levels of expertise) who

manually annotate the data. Such an approach is currently thought to be the most accurate one (e.g. in comparison to automatic labeling), and always serves as a reference (often referred to as ground truth) for further analysis. However, annotation in marine bioacoustics, besides being resource intensive, laborious and time consuming, is compounded by the intrinsic difficulty in discriminating underwater acoustic sources. Indeed, even experts recognize some inextricable ambiguities. For example, Baumgartner et al. (2019) observed that humpback whales sometimes produce an upsweep call that is hard to distinguish from a right whale upcall unless using a pitch track with a temporal context. Moreover, underwater soundscapes are composed of multiple sounds that can sometimes occur simultaneously, completely or partially masking each other (Clark et al., 2009; Erbe et al., 2016), which makes the identification of individual acoustic sources even more difficult. Overlaying killer whale harmonics and stationary boat noises at certain

* Corresponding author.

E-mail addresses: p.nguyenhongduc@gmail.com (P. Nguyen Hong Duc), maelle.torterotot@univ-brest.fr (M. Torterotot), flore.samaran@ensta-bretagne.fr (F. Samaran), prw@isvr.soton.ac.uk (P.R. White), odile.gerard@intradef.gouv.fr (O. Gérard), olivier.adam@sorbonne-universite.fr (O. Adam), dorian.cazau@ensta-bretagne.fr (D. Cazau).

¹ All the authors contributed equally to this work.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101185>

Received 1 August 2020; Received in revised form 25 September 2020; Accepted 25 September 2020

Available online 4 November 2020

1574-9541/© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

frequencies can also look very similar (Bergler et al., 2019). However, in spite of these constraints and uncertainties, some freely available annotated datasets do exist, such as the dataset from DCLDE workshop (Detection, Classification, Localization and Density Estimation of marine mammals using passive acoustics) workshop, which allow participants to directly compare algorithms and methodologies datasets.² But compared with the field of image recognition, daily visual objects (cats, dogs, chairs, etc.) are more familiar to human perception than marine mammal acoustic repertoires. Consequently, experts in this field can generally label such data with a higher level of confidence and shorter annotation task completion time than in marine bioacoustics, and even commonly resort to crowdsourcing annotations to quickly size up their machine learning datasets.

Whatever the scientific fields, one of the best practices to set up an annotation campaign is to involve several independent annotators, who share a certain amount of data to be annotated so their results can be compared in an objective way. In such a context, inter-annotator agreement (Gwet, 2014) (also referred to as inter-rater reliability in the literature) is the extent to which human decisions coincide, or in other words it allows to measure the amount of consensus between a group of annotators. A high agreement means that the raters can be used interchangeably. If interchangeability is guaranteed, then the ratings of one annotator can be used with confidence, without asking which annotator provided the annotation (Gwet, 2014). Although most PAM studies mention the use of several annotators in their annotation protocol, they do not focus on this question of inter-annotator variability (e.g. Kirsebom et al. (2020) recognized the need for “more systematic and controlled investigation of the inter-annotator variability”). To the best of our knowledge, only Leroy et al. (2018) addressed this problem by measuring the inter- and intra-annotator variability in manually annotated Antarctic blue whale stereotyped calls. They revealed both a strong inter-annotator variability between two annotators (with less than 50% agreement between annotators), but also a poor agreement obtained with an annotator annotating the same audio segment twice. Otherwise, a few studies have evaluated the influence of annotation results on automated detection performance. Sirovic (2016) evaluated the impact of annotation variability on the performance of a spectrogram correlation detector. They found that annotator variability did not affect long-term trends in detection, but that it had an impact on the total number of detections and therefore on the call rate estimation. Torterotot et al. (2019) also reported the variability in recall and precision of a blue whale call automated detector determined by comparing the detector outputs with three different ground truths labeled by three different annotators. Overall, these studies highlighted the need for a more standardized approach for manual annotation and automatic detection evaluation to globally improve the comparability of PAM studies. This question has also often been addressed in the different DCLDE workshop editions (e.g. the DCLDE 2013 discussion panel emphasized the need for more exhaustive and reliable annotation campaigns based on consistent annotation protocols.³). Our work has also been highly motivated by related current investigations done in urban soundscapes. Recent studies Cartwright et al. (2017, 2019) have quantified the reliability/redundancy trade-off in crowdsourced airborne soundscape annotation, as well as examined the effect of various annotation campaign parameters (e.g. the number of classes to annotate, acoustic characteristics of the classes, the method for sound visualization, the annotator profiles, the soundscape complexity) on inter-annotator agreement. One interesting outcome of their work has been to estimate a minimal number of annotators to get a reliable annotation as a function of campaign parameters, ending up with a series of concrete suggestions to set up a

campaign. Transposing such findings to marine bioacoustics would be highly valuable.

In this context, our work intends to pursue current efforts (Leroy et al., 2018; Sirovic, 2016; Torterotot et al., 2019) in better understanding inter-annotator agreement within collaborative annotation campaigns in marine bioacoustics. A new annotation campaign was performed on the DCLDE 2015 low frequency dataset, involving 6 annotators with different profiles, in addition to the two experts who originally annotated this dataset for the DCLDE 2015 challenge. Besides providing experimental evidence of inter-annotator variability, we also investigated potential sources explaining this variability, each source referring to either the dataset content (e.g. call type, Signal-to-Noise Ratio (SNR)) or to the annotator profile and behavior (e.g. average duration spent on annotating and annotator experience).

2. Material and methods

2.1. Annotation campaign

2.1.1. Dataset

The dataset used in this study is a subset of the DCLDE 2015 low frequency dataset. This dataset has been recorded with High-frequency Acoustic Recording Packages (HARP) deployed off the southern and central coast of California at different locations, spanning all four seasons, over 2009–2013. The data were decimated to a 2 kHz sampling frequency to provide a dataset for blue whale (*Balaenoptera musculus*) D-calls (Thompson, 1965) and fin whale (*Balaenoptera physalus*) 40-Hz calls (Watkins, 1981) identification (Fig. 1). On the occasion of the 2015 DCLDE challenge, a first annotation campaign with two annotators was performed, which consisted in annotating time intervals of D-calls and 40 Hz calls. The resulting annotation file made available⁴ consists in the fusion by majority voting of these two individual annotations. Here, we only use a subset of acoustic data composed of 50 consecutive hours of the CINMS18B file, recorded within the Channel Islands National Marine Sanctuary and starting on the 23th June 2012. Table 1 sums up the dataset parameters.

2.1.2. Annotation support and protocol

Annotation was performed through audio-visual inspection of spectrograms (i.e. FFT-based time-frequency representation of sounds). Table 2 sums up a set of parameters used to compute and display annotation spectrograms. They were chosen to fit at best the original annotation protocol except for a few differences. Indeed, our spectrogram contrast was empirically fixed based on the median of maximum values from filtered Power Spectral Density (PSD) in the [15–150] Hz frequency band. Furthermore, annotators could use a zoom up to 8× on the time axis (i.e. 40 s window) from the default duration of the spectrogram window set to 320 s (about 5 min). Listening to the recordings was allowed but not mandatory, with varying playing speeds from 0.25× to 4×.

Annotators were given instructions (see Supplementary materials) with visual and aural examples of the sounds to annotate. They were gathered in a guide document, made available at all times during the campaign. They could refer to it at any time during the annotation process. To annotate a specific sound, they had to draw a time and frequency box around it as close as possible to the sound. Naturally, the annotators had only access to their own annotations to avoid any influence from other annotations.

Annotators could choose among 3 labels, tagged as follow: D-call (for blue whale D-calls), 40-Hz call (for fin whale 40-Hz calls) and Unknown call. Annotators were instructed to use this latter label in case of doubt between the two call types, but not to annotate a call type from an unknown source.

⁴ See <http://cet.uscd.edu/dclde/datasetDocumentation.html>.

² <http://cet.uscd.edu/dclde/datasetDocumentation.html>.

³ See Summary/Concluding remarks in <http://cet.uscd.edu/dclde/docs/pdfs/Wednesday/14-Gillespie.pdf> and <https://www.onr.navy.mil/report/s/FY13/mbgilles.pdf>.

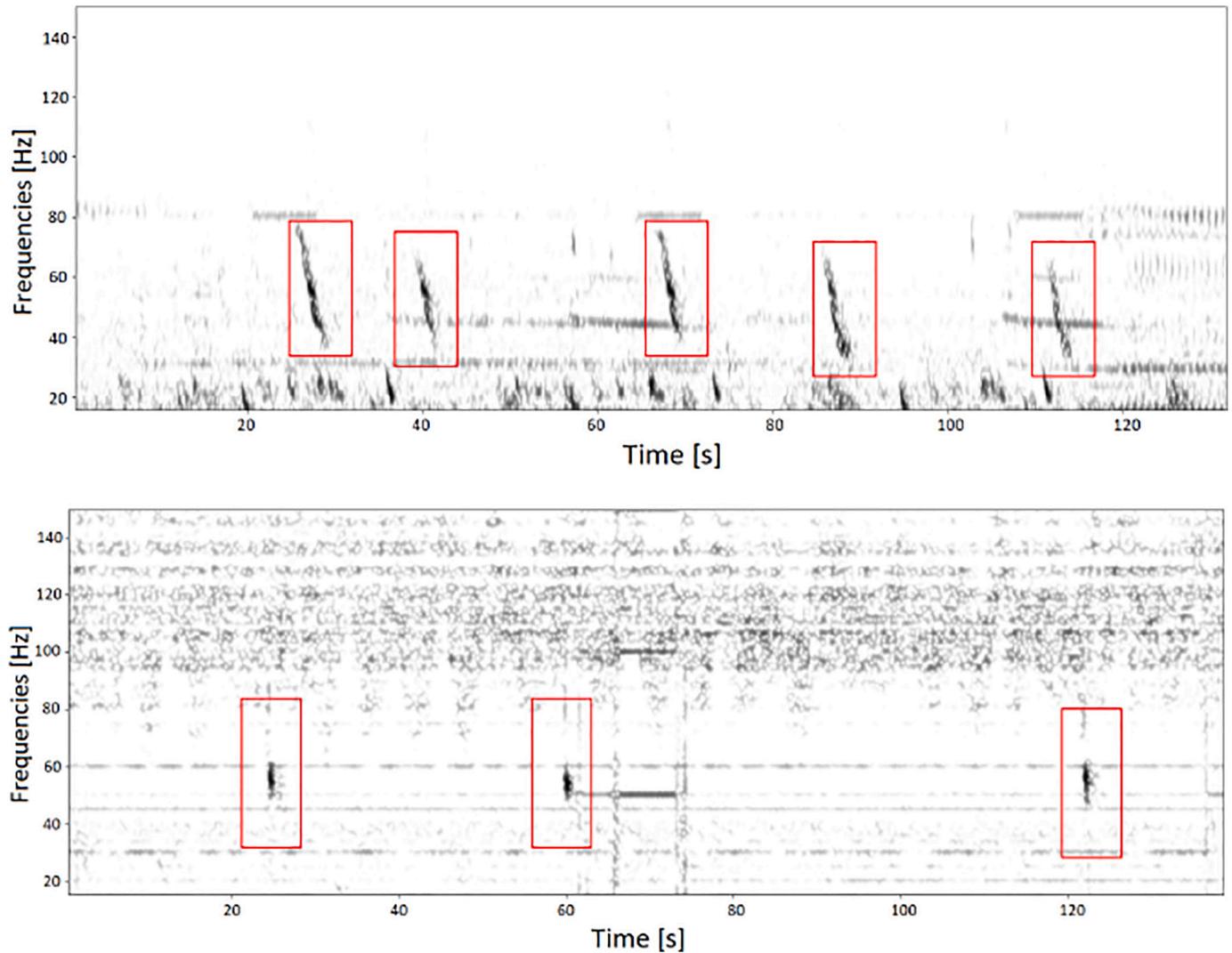


Fig. 1. Examples of the two annotated call types: five blue whale D-calls (upper spectrogram in red boxes) and 3 fin whale 40-Hz calls (lower spectrogram in red boxes). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Table 1

Dataset parameters.

DCLDE2015	LF
Sampling rate (kHz)	2
Annotated species	<i>Balaenoptera musculus</i> - blue whale D-calls Thompson (1965) <i>Balaenoptera physalus</i> - fin whale 40-Hz calls Watkins (1981)
Dataset size/Nb files	700 Mo/563 files
Site [Year/Month]	CINMS_18_B_d06_120622_055731.d100.x.wav (2012/06)
File durations	first 50 h split in 563 × 320 s long audio files
Dates	Start: 2012-06-23 05:57:31/End: 2012-06-25 07:56:51
Class count	'D-call': 719, '40-Hz': 156 from the DCLDE challenge annotations

Table 2

Parameter description of the different APLOSE seed datasets.

Sample frequency (kHz)	2
Max → min display duration (s)/Zoom level number	320 → 40/4
nfft (samples)	4096
winsize (samples)	2000
overlap (percent)	90
Gain (dB)	35
Filtering frequency band (Hz)	[15–150]

In the analysis, when not specified, 4 classes were used to compute the statistical metrics: “D-call”, “40-Hz”, “Unknown call” and “None”. This latter was used when an annotator identified a sound but no one else labeled it. For example, annotator A gives the D-call label to a sound, but the others do not label it. Annotator A label will thus be “D-call” and the other’s labels will be “None”.

Eventually, an annotated event was defined as an overlapping event by the following condition: if its midpoint fell within the time bounds of another annotation box [Leroy et al. \(2018\)](#). In the case where an annotator tagged two overlapping events, chronological order is kept in order to find corresponding labels for other annotators.

2.1.3. Annotation software

For this study we developed our own open source annotation software named APLOSE ([Nguyen Hong Duc et al., 2020](#)). As it is a web-based annotation interface, APLOSE highly facilitates the setting up of collaborative campaigns because no transfer data to each participant is made as the data are on a server and it does not request that they install the same annotation software. Besides that, APLOSE has been deployed on the long term on dedicated web servers, and it now offers the capacity to anybody of easily updating its annotation campaigns, including the one of this current study.

2.1.4. Annotator profiles

A total of 6 annotators were enrolled in the campaign. We assume that these raters were capable of identifying the two calls. They can be gathered into 3 groups (cf Table 3): low-frequency whale sounds experts (annotators who have already annotated several hours of low-frequency mysticete calls, especially D-calls), bioacousticians (annotators who have already annotated several hours of cetacean sounds but not D-calls) and neophytes (annotators with no experience in underwater sound annotations). The annotators were volunteers and not compensated financially for their work. No quality check of the individual annotations was performed for this campaign. In addition to these 6 annotators, the annotations from the two DCLDE experts were used. However, only one set of annotations is available, as they only kept the common annotations (DCLDE_exp).

2.2. Evaluation of inter-annotator agreement

Considering the difficulty of obtaining a “ground truth” for underwater soundscape events, evaluation metrics rather qualify the relative level of agreement between annotators than the absolute annotator performance. The inter-annotator assessment is performed using only pseudo-presence observations resulting from the annotation process. In other words, only events annotated at least by one annotator are taken into account in the agreement evaluation. The agreement on pseudo-absence is not evaluated here.

To evaluate the inter-annotator agreement with our nominal data, the Fleiss κ score was computed (Fleiss, 1975; Zapf et al., 2016) as we considered all annotators as equally important. This metric corresponds to the proportion of agreement corrected for chance, scaled from -1 to $+1$, with a negative value indicating poorer than chance agreement, zero indicating exactly chance and positive values indicating better than chance agreement. Chance agreement happens when multiple annotators assign a similar label that is not directly dictated by the data. It occurs when an annotator does not know which label to give, and chooses one randomly. Mathematically, the Fleiss κ score is defined as (Fleiss, 1975):

$$p_i = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^K R_{ij}(R_{ij}-1)p_j = \frac{1}{Nn} \sum_{i=1}^N R_{ij} \tag{1}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, \quad \bar{P}_e = \sum_{j=1}^K p_j^2 \tag{2}$$

$$\kappa_{Fleiss} = \frac{\bar{P} - \bar{P}_e}{1 - \bar{P}_e} \tag{3}$$

where n is the number of annotations per sample, p_j , the proportion of all assignments which were to the j -th category, p_i , the extent to which annotators agree for the i -th subject, \bar{P} the mean of the p_i . If the annotators are in complete agreement then $\kappa = 1$. If there is no agreement among the annotators (other than what would be expected by chance) then $\kappa \leq 0$.

In order to compute the Fleiss κ score for a specific call type, all annotations for the call type to analyze are retrieved. Then if an annotator did not annotate with the same label, or did not annotate the audio

segment at all, the label “None” is given for that annotator. As a consequence, for example, when computing the Fleiss κ score for D-calls, only two labels are possible: D-call or None.

2.3. Potential sources of inter-annotator agreement variability

To explain the agreement variability, we investigated the impact of several campaign factors on our inter-annotator agreement metrics.

2.3.1. Signal-to-Noise Ratio (SNR)

Signal-to-Noise Ratio (SNR) was computed as in Tarterot et al. (2019). Audio files were passband filtered between 15 Hz and 150 Hz using a third-order Butterworth filter. For each 5-min audio file, the noise power level was computed in the same frequency band, using the estimator presented in Socheleau et al. (2015). Each event’s power level was then compared to the matching noise power level of the file where it was identified. All values were then gathered in 4 categories of SNR: ≤ 0 , $(0, 5]$, $(5, 10]$, > 10 .

2.3.2. Annotation durations

All along the annotation campaign, the time that each annotator spent to annotate each file was stored in the campaign log files. All retrieved durations for a task were rounded and then divided in two categories of files: the ones that contained at least one identified event and the others without any identified event. When durations were higher than 20 min, we removed these values, assuming that they correspond to a misuse of the annotation task (typically an annotator going on a break while leaving apart an ongoing annotation task).

2.3.3. Annotation clustering

In order to better characterize annotator behaviors (Kairam and Heer, 2016), the annotators were gathered into clusters using the Hamming distance (Hamming, 1950) as a measure of the distance between their annotations. Hierarchical agglomerative clustering (HAC) method was used with the single linkage method. Clusters were then formed from the computed hierarchical clustering based on the cophetic distance between annotators. The threshold was set to 0.09 meaning that annotators within the same cluster have less than 127 different annotations. The threshold was set according to the minimum number of 40-Hz annotations (131). The multidimensional scaling was used to represent the annotators by preserving their Hamming distance. All computations were performed using Scikit-learn (Pedregosa et al., 2011).

3. Results

3.1. Quantitative evaluation of the inter-annotator agreement

3.1.1. Number of annotations

Fig. 2 shows the number of annotations per call type for each annotator. All of the annotators labeled more D-calls than fin whale 40-Hz calls. DCLDE_exp and A3 annotated about 700 D-calls, A2, A4 and A5 between 800 and 1000 and A1 and A6 more than 1000. For the 40-Hz call type, A4 identified more events (almost 400) than the other annotators (about 200). The label “Unknown call” was either used almost 200 times (by A2 and A6) or less than 50 times (A1, A3, A4, A5).

3.1.2. Agreement metric

Fleiss κ score reflects the reliability and agreement between annotators. For D-calls, the Fleiss κ score is around 0.4 showing a moderate agreement between annotators. For fin whale 40-Hz calls, this value is close to 0, meaning that annotators almost systematically disagreed on this label (see Fig. 3 left).

The average inter-annotator agreement slightly increases when the number of annotators increases until reaching a plateau. (see Fig. 3 right). Standard deviations of Fleiss κ are higher when comparing the

Table 3 Annotator profiles.

Annotator	Expertise level
DCLDE_exp	Expert
A1	Bioacoustician
A2	Bioacoustician
A3	Expert
A4	Neophyte
A5	Bioacoustician
A6	Expert

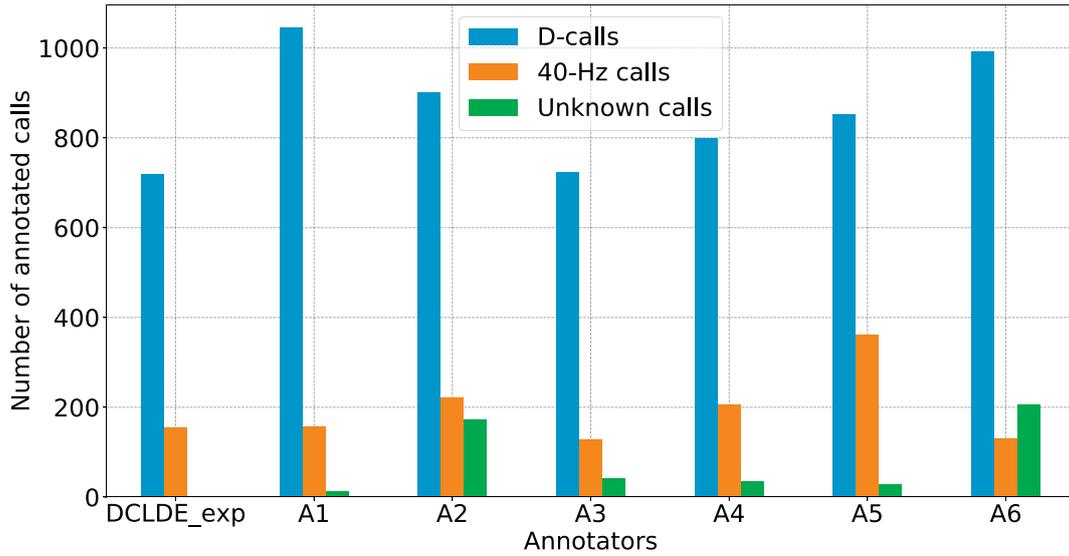


Fig. 2. Number of annotated calls per label for each annotator.

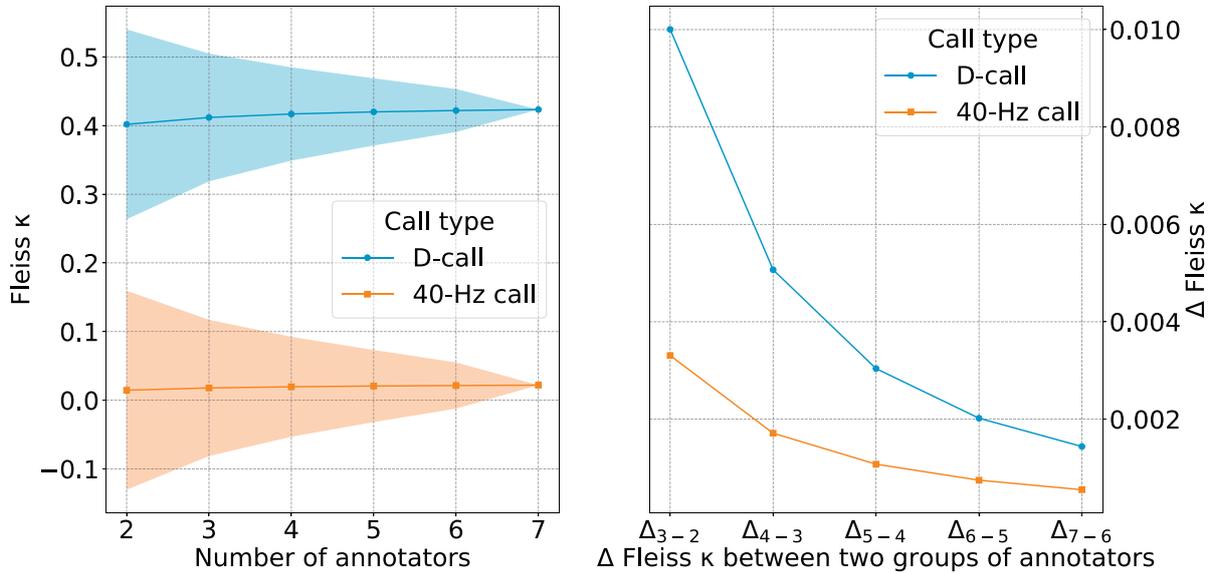


Fig. 3. (left) Fleiss κ measure for all call types; the standard deviations are computed by comparing different groups of annotators. (right) Difference of averaged Fleiss measure between each value computed for a different number of annotators.

agreement between groups of two people and decrease when the group size expands.

In the next section, we explore two categories of potential sources that can influence the inter-annotator agreement. The first one refers to the dataset itself (e.g. call type, SNR) and the second refers to the annotator profile and behavior.

3.2. Potential sources of inter-annotator agreement variability: from the dataset perspective

3.2.1. Call signatures and class labels

We first investigated how the call type impacts the inter-annotator variability. Fig. 4 shows that about 40% of the 1240 annotated D-calls were annotated by all annotators, while less than 20% were annotated by only one annotator. Most of the other D-calls were identified by at least two annotators (>80%). Over 782 annotated fin whale 40-Hz calls, only 1% were unanimously annotated and more than 60% were

annotated by only one annotator. The “Unknown” label was used sparingly, but the annotators never used it to identify the same event. 335 events were identified by at least one annotator as a D-call and by at least another one annotator as a fin whale 40-Hz call. Among those, 61 were identified by 6 annotators as a D-call and by only one as a fin whale 40-Hz call.

We propose a qualitative inspection of spectrograms that were marginally labeled. Fig. 5 represents some spectrograms annotated by all annotators (on the left) and by only one annotator (on the right). We chose to represent the spectrograms as they were visualized on the annotation interface. It is clear that events with salient acoustic features reached a more systematic consensus than those with less energy occurring in noisier time periods.

100 of the “Unknown call” labels were annotated by two annotators or less (Fig. 4). Some examples of labeled “Unknown calls” are represented in Fig. 6. These events exhibit a shape close to both D-calls or fin whale 40-Hz calls, and often occur in a noisy environment.

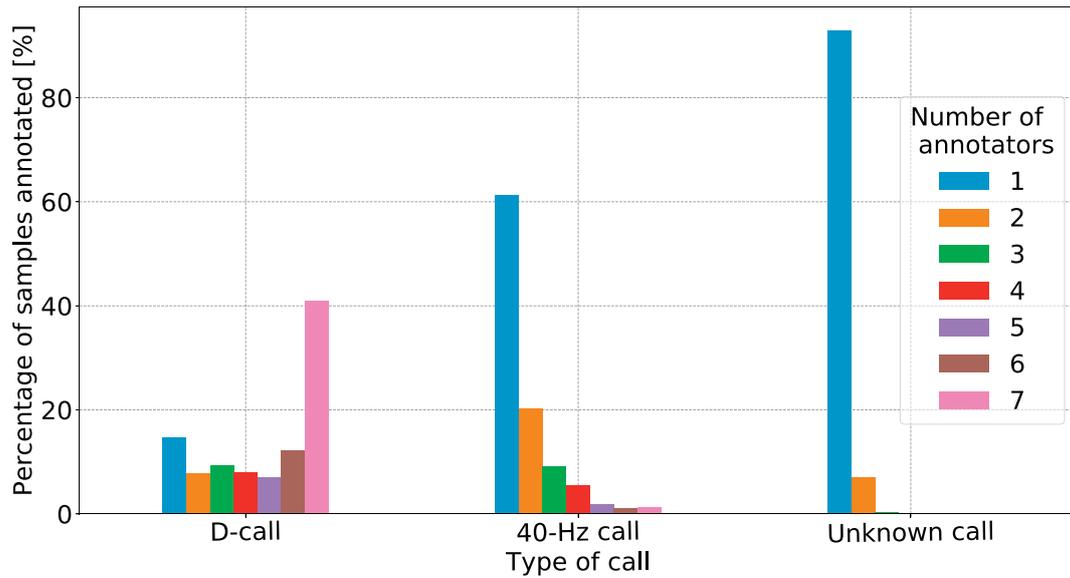


Fig. 4. Number of calls annotated by at least N annotators.

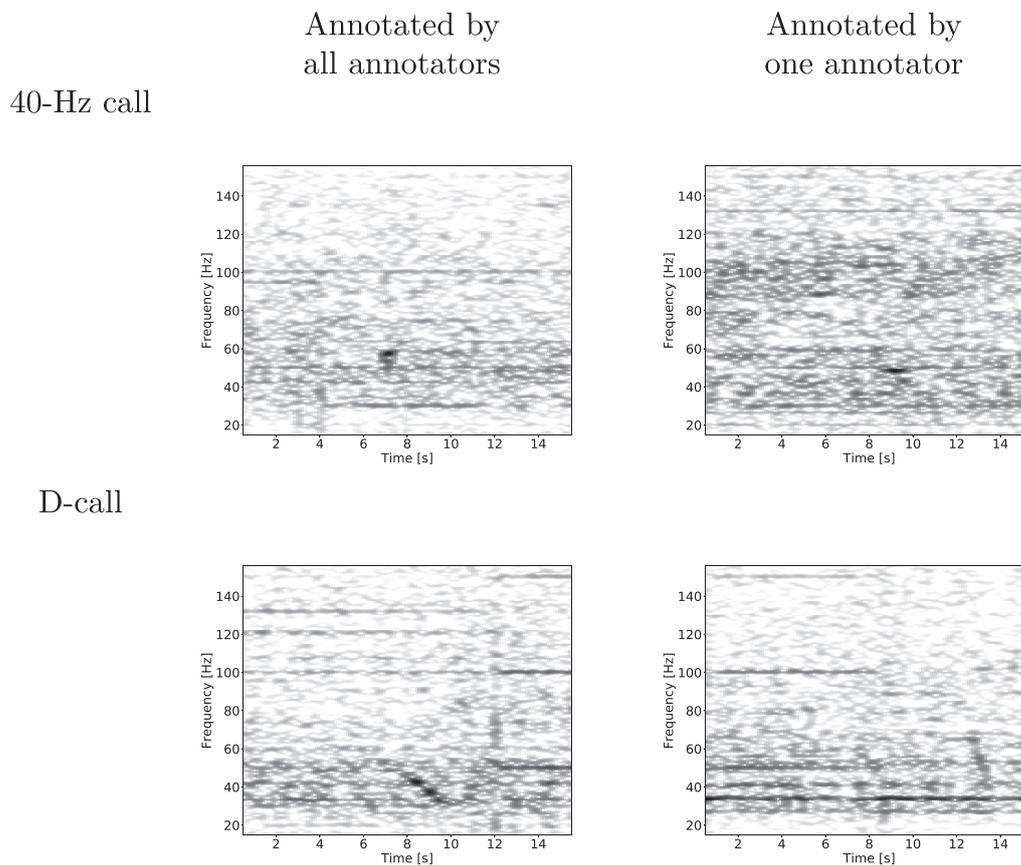


Fig. 5. Examples of labeled calls annotated by all annotators (left panel) and calls annotated by only one annotator (right panel) for 40 Hz fin whale calls (top row) and D-calls (bottom row). They are represented in this figure as they appear in the APLOSE interface.

Finally, two examples of events that were annotated both as D-calls and fin whale 40-Hz calls by different annotators are represented in Fig. 7. To attribute a label, they seem to focus either on the downsweep shape (similar to a D-call) or on the part of the event with higher and shorter energy (similar to a fin whale 40-Hz call).

3.2.2. SNR

The SNR distribution is similar for the two call types, with a predominance of low SNR calls (Fig. 8). More than 50% of the annotated D-calls and 48% of the fin whale 40-Hz calls have an SNR between 0 and 5 dB whereas more than 10% of D-calls and 40-Hz calls have a SNR > 10 dB.

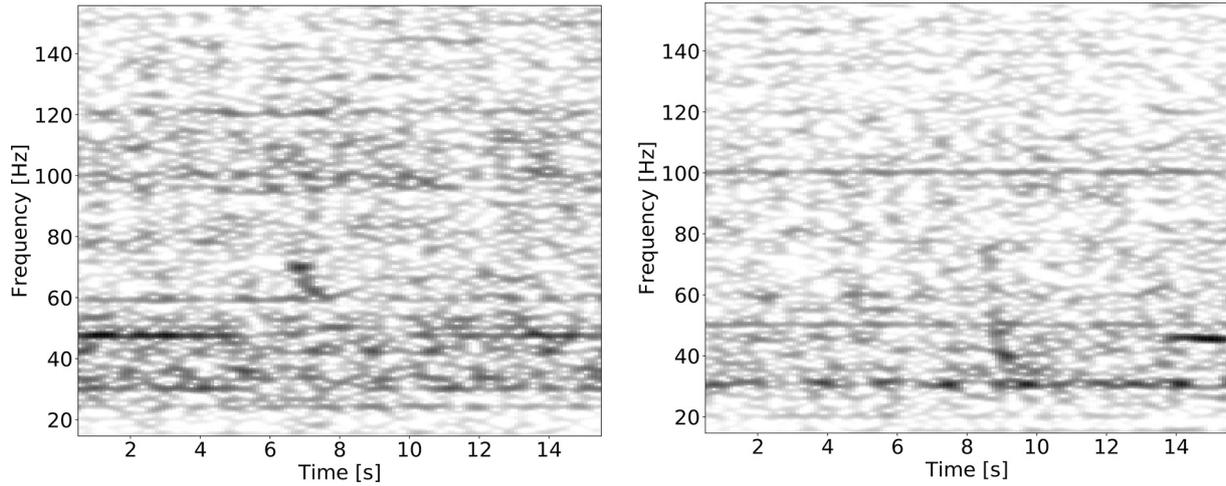


Fig. 6. Spectrograms of two “Unknown calls” identified by at least one annotator. They are represented in this figure as they appear in the APLOSE interface.

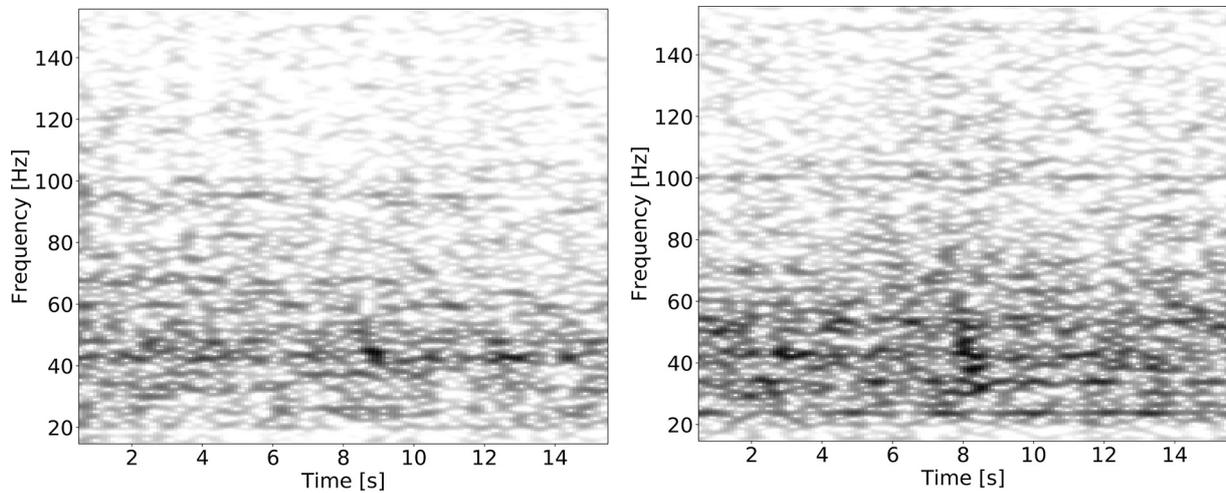


Fig. 7. Examples of (left) events labeled as a fin whale 40-Hz call by 2 annotators and D-call by 2 annotators and (right) event labeled as a fin whale 40-Hz call by 2 annotators, a D-call by 3 annotators and as Unknown call by 1 annotator. They are represented in this figure as they appear in the APLOSE interface.

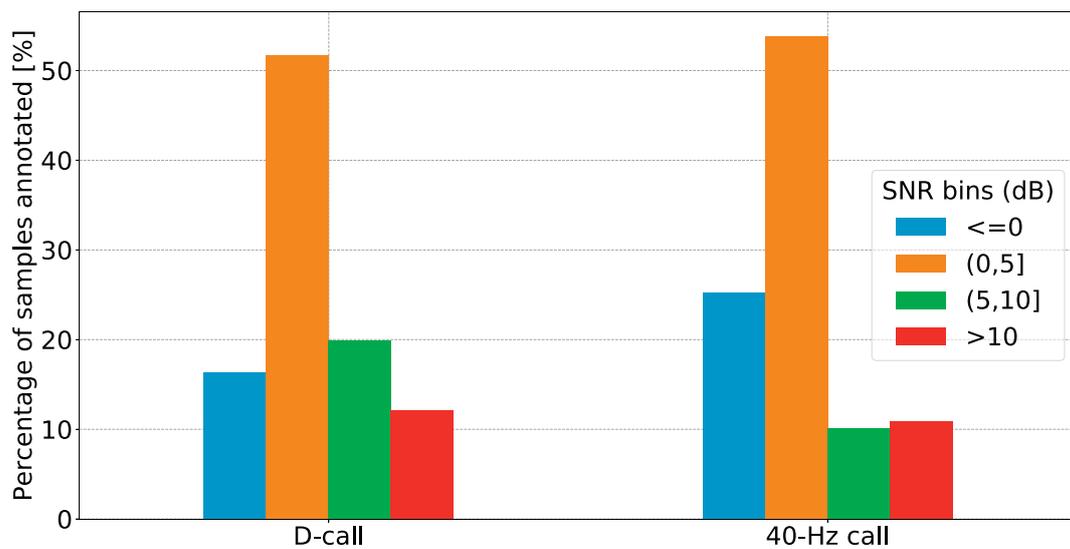


Fig. 8. SNR distribution of (left) labeled D-calls and (right) labeled fin whale 40-Hz calls (right).

Fig. 9 displays the number of events annotated by only one annotator and by all annotators as a function of SNR. The proportion of D-calls annotated by all annotators increases as the SNR increases. The proportion of D-calls annotated by one annotator is higher for negative SNR (up to 40%). For positive SNR, the proportion of calls annotated by only one annotator remains steady at around 20%. The proportion of fin whale 40-Hz calls annotated by all annotators is very scarce for all SNR bins.

Fig. 10 represent the Fleiss κ scores regarding the SNR distribution for D-calls. For D-calls, the Fleiss κ ranges from 0.36 for low SNR to 0.52 for high SNR. This means that agreement values are higher for high SNR D-calls. Moreover, the standard error of the agreement decreases with higher SNR calls.

For fin whale 40-Hz calls, the Fleiss κ ranges from about -0.05 for high SNR to 0.09 for low SNR. Consequently, the SNR does not seem to have an influence on the Fleiss κ for this call type.

Reliability did not appear to be significantly affected by the number of annotators rating each audio segment (Δ values $<10-2$), and these findings are consistent across independent samples of annotators. However, despite the small absolute range of Δ values, we can still describe the extent to which our different inter-annotator agreement measure converges on a plateau-like region above a certain number of annotators.

In our experiments, a fast convergence towards this plateau was observed for D-calls and high SNR values, in comparison to lower SNR values with the same call type or when looking at values for the fin whale 40-Hz call type. These lower convergences reveal more difficult annotation tasks where the inter-annotator agreement will need an higher number of annotators to get stable.

3.3. Potential sources of inter-annotator agreement variability: regarding the annotator profile and behavior

3.3.1. Annotation duration

Fig. 11 shows the average duration spent by each annotator to label each 5-min file. It compares average duration for files containing at least one annotation (in blue) *versus* files without any annotation (in orange) for each annotator. Also, because completion time was not available for the DCLDE experts we discarded them from this analysis. Overall, annotator A1 took longer to annotate the files than the other annotators, with respective median values of 100 s and 40s. Unlike the other

annotators, annotator A2 presents a few upper outliers with durations smaller than 150 s. In general, the annotators took less time to annotate files they believed, mainly based on visual inspection, to contain no calls. For files with identified events, the median duration was about 30s higher than for files with no event. Also, minimal values for event and noise file are close ranging from 2 s to 16 s. However, annotator A1 still spends more time than the other on these files.

3.3.2. Annotator profile

Fig. 12 represents the results of our cluster analysis, in which we did not include the "Unknown call" label as it was not used by the DCLDE annotators. No clusters can be observed even if DCLDE_exp, annotator A3 and annotator A4 are close (Hamming distance < 0.2). Between DCLDE_exp and A3, the Hamming distance was 0.15, meaning that they disagreed on about 212 annotations. The disagreement was slightly greater between DCLDE_exp and A4 (Hamming distance of 0.19 representing about 269 different annotations). However, the Fleiss κ scores were 0.7 and 0.63 revealing that a substantial inter-annotator agreement was found for the DCLDE_exp with A3 and DCLDE_exp with A4 pairs respectively. Two expert annotators (DCLDE and annotator A3) but also annotator A4 who is an amateur showed these substantial inter-annotator agreements. Annotator A6 who is also an expert in blue whale D-calls shows a divergent pattern from this group (DCLDE_exp, A3 and A4).

4. Discussion

Overall, our study brings further experimental evidence of inter-annotator variability in the annotation process of non-stereotyped blue and fin whale calls as already highlighted in previous works (Leroy et al., 2018). Although we observed similar behavior patterns between the annotators such as the number of annotated D-calls and 40 Hz calls (see Fig. 2), important discrepancies appeared when in-depth analysis of the annotation results was carried out.

Two quantitative metrics were first used to assess inter-annotator variability. The first one was the total number of annotated calls per annotator. This number was highly dependent on the annotator, with a maximal difference of 321 and 233 for D-calls and fin whale 40-Hz calls respectively (cf Fig. 2), while original DCLDE annotations reached a total of 719 and 156 calls respectively. Second, the inter-annotator agreement score Fleiss κ was computed, with values around 0.4 and

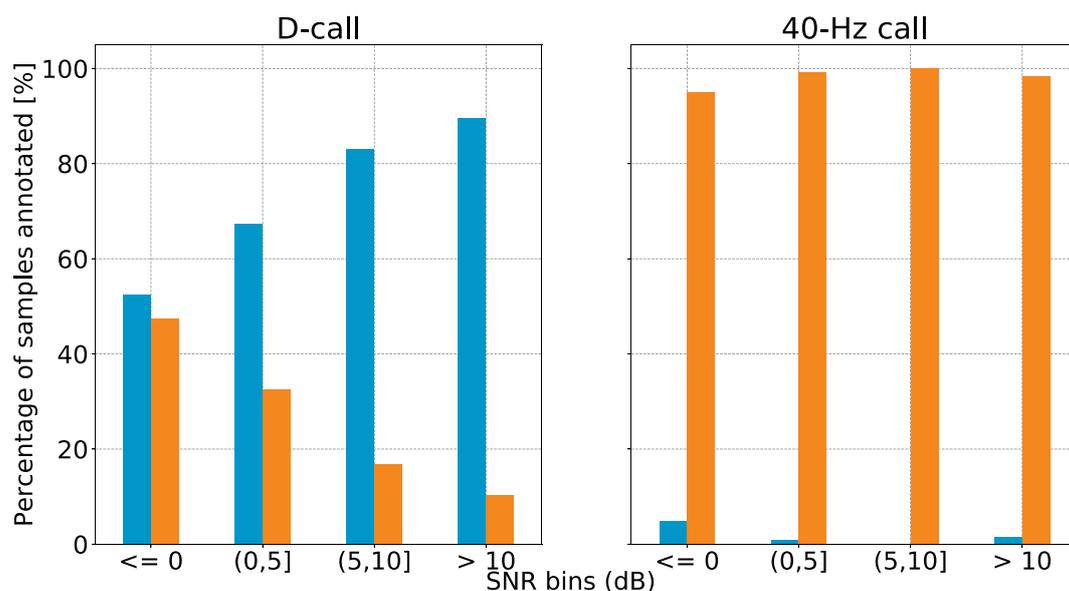


Fig. 9. Number of samples of D-call (left) and 40-Hz (right) events per SNR category annotated by all annotators (blue) or by only one (orange). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

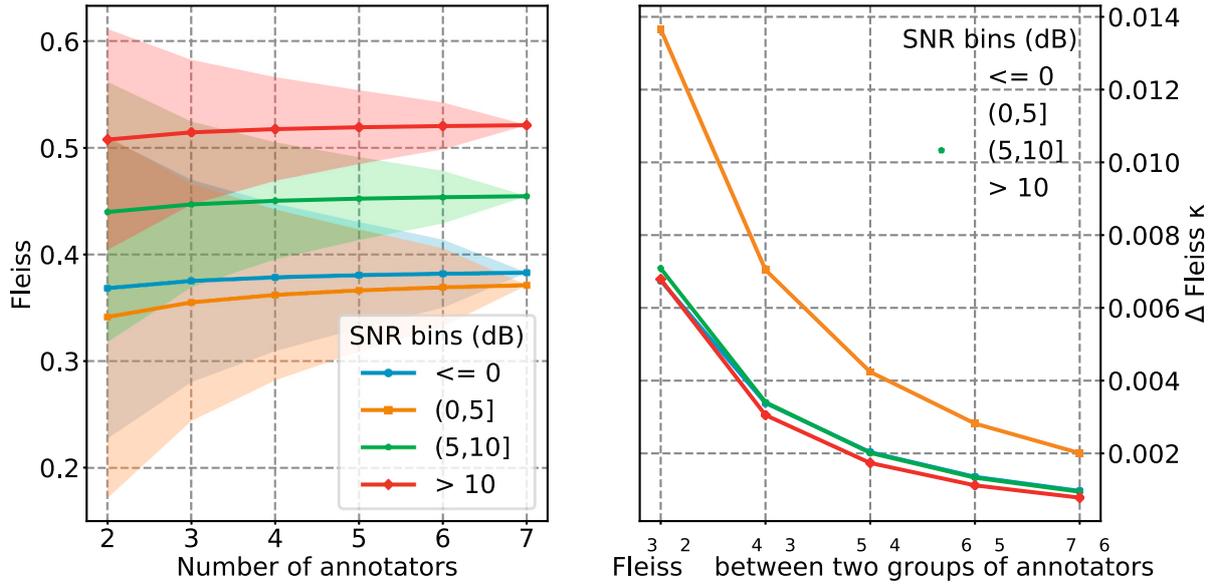


Fig. 10. (left) Fleiss κ measure per SNR category for annotators for D-call and (right) the Δ measure between the number of annotators.

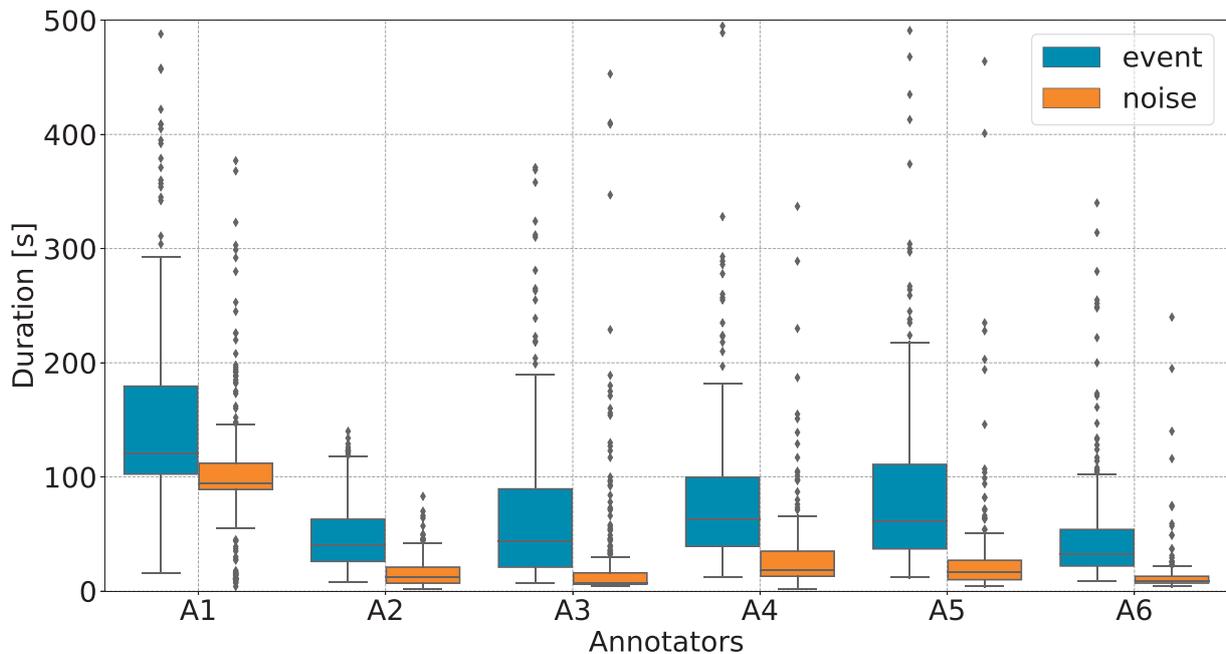


Fig. 11. Duration of an annotation task for files containing events or not. Durations higher than 500 s are not displayed.

0 for D-calls and fin whale 40-Hz calls respectively. Following classical interpretation of this score (Landis and Koch, 1977), such values significantly reveal a medium to poor inter-annotator agreement. Also, theoretically, after a certain number of annotators, values should converge to a plateau-like region on the maximal inter-annotator agreement score reachable for a specific collaborative annotation campaign (Fleiss, 1975). Although this law was only partially verified experimentally in our study through the Δ Fleiss κ score (variations lower than 0.04, see Fig. 4), it can conceptually be used to estimate the minimal number of annotators that guarantees a maximal inter-annotator agreement, *i.e.* the highest annotation reliability one can expect from a given collaborative annotation campaign.

As a consequence, we further investigated the potential causes of inter-annotator variability. We first observed that this variability heavily depends on the call type. Over 782 events labeled as fin whale 40-Hz

calls by at least one annotator, only 9 were labeled as fin whale 40-Hz calls by every annotator (1%). For the D-calls, this percentage reaches about 40% of the annotated D-calls annotated by all annotators (*cf* Fig. 9). Furthermore, the “Unknown call” category is the one that displays the highest differences between the annotators with a ratio of 17 between the minimum and the maximum number of annotated calls (*cf* Fig. 4). Such trends might be explained by the similarity between the D-calls and fin whale 40-Hz call signatures, as also 305 samples were labeled with both labels, which means that the annotator could not clearly distinguish them.

The second cause that could explain the annotation differences between annotators is the salience of the calls, as partially measured by the SNR of the annotated calls. As expected, the agreement increases with SNR for D-calls as measured by the Fleiss κ score (Fig. 10), confirming the highest ambiguity between low SNR D-calls and noise. This was also

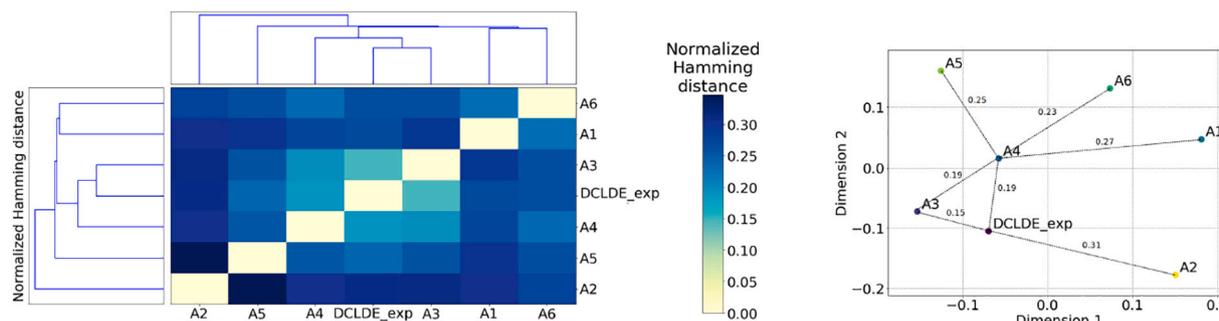


Fig. 12. Left: HAC with heatmap representing Hamming distance metric between each pair of annotators. Hierarchical trees are shown on the upper left of the heatmap. Right: Divergence between annotators plotted using multidimensional scaling. The Hamming distance between some annotators was displayed on the dotted lines. “Unknown call” label was not taken into account in both figures.

observed for the detection of Antarctic blue whale Z calls (Leroy et al., 2018) and right whale contact calls (Urazghildiiev and Clark, 2007). This tendency was not observed for fin whale 40-Hz calls, for which the overall agreement (*i.e.* all SNR combined) is already poor.

Eventually, we also monitored the annotation profile by measuring the duration spent by each annotator on the annotation task (Fig. 11). The minimum duration for someone to listen to each audio file is 80 s (duration of the audio file 320 s divided by the maximum speed up ratio of 4, which has been almost always used). Except for annotator A1 (> 100 s), the others took less than 80 s to annotate a file. Time spent on the annotation task reflects a certain behavior. For example, spending more time on the annotation task reflects probably that an annotator is more cautious. Overall, it is also interesting to note that the annotator profile does not correspond to annotation duration time, contradicting the intuition that less experienced annotators spend more time on each annotation display window.

The annotator profile is another source of inter-annotator variability investigated in this paper. Indeed, the results emphasized the subjectivity of the annotation task, which is mainly based on perception, and interpretation of the annotator. Especially, the “Unknown call” label may be more representative of the annotator “personality”, as it reflects its overall level of confidence on this task, while the two other call type labels are more directly to the concrete skill of the annotator to discriminate both class independently from each other and from the background. Leroy et al. (2018) highlighted the effect of the annotator personality on their annotation “behavior”. Indeed, one annotator annotated a lot of calls whereas the other tended to be more conservative and annotated less calls showing that the labeling behavior is related to subjectivity. Also, from our clustering analysis, we saw that an annotation pattern emerges with the annotators DCLDE/A3 and A4. Both DCLDE and annotator A3 were experts in the 40-Hz and D-call sounds. More surprisingly, annotator A4 presents a closer annotation pattern to the DCLDE/A3 while he is an amateur in underwater sounds. This confirms that even non-expert can provide high-quality annotation labels, which has already been observed in other research areas (Hantke et al., 2016; Snel et al., 2012; Snow et al., 2008). A similar result is reported in Rogers (2003), who describes two categories of expert bioacousticians. A “splitter” group tended to inventory each variant of a sound type as different sound types whereas a “lumper” group tended to regroup variants into single sound types.

Overall, these results have allowed us to identify a few guidelines on how to set up an annotation campaign in marine bioacoustics. First, an annotation campaign should involve more than one annotator, allowing for a minimal sanity check that informs us on the difficulty level of the

annotation task with respect to the different call types to be annotated. In a machine learning context, it has already been recognized that evaluating and comparing algorithm performance on a poorly annotated dataset can lead to misinterpretations of their performance⁵). The number of annotators required to obtain robust annotations may vary with the difficulty of the task, but we suggest using at least two annotators, as it was enough to figure that the agreement for the 40 Hz calls annotation task was poor. We realize that finding people willing to annotate acoustic data can be complicated and our study highlights that the participation of non-experts should not be excluded from underwater audio annotation. A second guideline we could formulate would be to employ inter-annotator agreement scores like Fleiss κ , envisioned as a standard, objective and absolute measure of the reliability of an annotation task, as well as of the minimal number of annotators required to maximize this reliability through the Δ Fleiss κ . This work focused on two similar calls that are hard to discriminate. We believe that increasing the number of sound types to identify might add confusion and ambiguity, especially if these sound types have similar time-frequency features. To keep the annotator focused on the task, we also recommend to set short duration annotation files. Having an open-ended question (identification of time and frequency of whale calls) makes it harder than having a closed task such as annotating a small audio sample (max 10s long) with predefined labels. At the end of each annotation campaign, a quality control Lee et al. (2018) could be set up with experts to review labels that divide annotators. In that way, both annotator quality and ground truth inference strategies for label aggregation such as weighted voting could be determined. From our observations, it seems that annotators agree more on high SNR calls. Depending on the type of bioacoustic study, detecting only high vocalizations may be sufficient (*i.e.* to assess local presence of marine mammals). It would therefore be interesting to test the performance of the algorithms when they are trained only with high SNR calls vs when they are trained with all SNR calls.

Based on our study we now stress the need to systematically perform inter-annotation variability study prior to machine learning method development and validation, all the more so due to the renewed interest for the DCLDE challenge datasets (Guilment et al., 2018; Shiu et al., 2020; Socheleau and Samaran, 2017) that should now act as reference datasets for our community. Going further in this direction, we also champion the idea that such needs will require a new generation of more collaborative open tools. Our web-based annotation tool APLOSE (Nguyen Hong Duc et al., 2020), distributed freely to the community, is a first step in this direction from our part.

To the best of our knowledge, our study is the first effort in better

⁵ See Summary / Concluding remarks in url <http://cetuc.ucsd.edu/dclde/doc/s/pdfs/Wednesday/14-Gillespie.pdf> and <https://www.onr.navy.mil/report/s/FY13/mbgilles.pdf>.

understanding variability sources in collaborative annotation campaigns in marine bioacoustics, following preliminary works by Leroy et al. (2018). However, many other sources of variability remain to be investigated. For example, Cartwright et al. (2017) found that the complexity of a soundscape, in terms of number and overlapping level of sound sources, might affect the agreement. The annotation subjectivity can also arise from the annotator's previous annotation experience. For example, an expert and someone who sees a spectrogram for the first time probability will not annotate the same way.

5. Conclusion

In this study, we presented a new annotator subjectivity dataset of two cetacean call types. We have shown that the annotators in this dataset each have a distinct labeling behavior such as the time spent to identify acoustic events and their annotator profile. This last annotator characteristic showed that even beginners in labeling audio datasets could have a similar labeling behavior to experts. Furthermore, disagreements between annotators depend on the call type to annotate and their SNR. The large differences among annotator behaviors show that subjectivity plays a key role in annotating underwater sounds, which should be included into automatic classification systems of underwater sounds.

As a perspective for future works, note that our annotation campaign can still be joined by anybody, and the annotation results will be automatically updated. New annotation contributions from the community would allow to provide even stronger experimental evidence of our findings.

Declaration of Competing Interest

None.

Acknowledgments

The authors acknowledge the Pôle de Calcul et de Données Marines⁶ (PCDM) for providing DATARMOR (storage, data access, computational resources, visualization, web-services, consultation, support services). The authors also would like to acknowledge Julie Beesau, Florent Boutonnet, Fabio Cassiano for their manual analyses of the dataset, the assistance of the review panel, and the many people who volunteered valuable comments on the draft at the consultation phase as well as Ana Širović, Simone Baumann-Pickering and the Scripps Institution of Oceanography for providing the DCLDE 2015 dataset.

Funding

This work was supported by the CominLabs⁷ through the innovation action Tech4Whales, DREC Agence Française de la Biodiversité⁸ and ISblue.⁹ Paul Nguyen Hong Duc was supported by the French Defence Procurement Agency (Direction Générale des Armements) and Maëlle Torterotot was supported by a PhD fellowship from the University of Brest.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101185>.

References

- Nguyen Hong Duc, P., Torterotot, M., Vovard, R., Keribin, E., Cazau, D., 2020. APLOSE: a scalable web-based annotation tool for marine bioacoustics. *Tech. Rep.*
- Baumgartner, M.F., Bonnell, J., Van Parijs, S.M., Corkeron, P.J., Hotchkiss, C., Ball, K., Pelletier, L.P., Partan, J., Peters, D., Kemp, J., Pietro, J., Newhall, K., Stokes, A., Cole, T.V.N., Quintana, E., Kraus, S.D., 2019. Persistent near real-time passive acoustic monitoring for baleen whales from a moored buoy: system description and evaluation. *Methods Ecol. Evol.* 10 (9), 1476–1489. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13244>.
- Bergler, C., Schröter, H., Cheng, R.X., Barth, V., Weber, M., Noeth, E., Hofer, H., Maier, A. Orca-spot, 2019. An automatic killer whale sound detection toolkit using deep learning. *Sci. Rep.* 9 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47335-w>.
- Cartwright, M., Seals, A., Salamon, J., Williams, A., Mikloska, S., MacConnell, D., Law, E., Bello, J.P., Nov, O., 2017. Seeing sound: investigating the effects of visualizations and complexity on crowdsourced audio annotations. *Proc. ACM Hum. Comput. Interact.* 29, 21.
- Cartwright, M., Dove, G., Méndez Méndez, A.E., Bello, J.P., Nov, O. Crowdsourcing multi-label audio annotation tasks with citizen scientists. In: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; CHI '19; 2019. p. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1145/3290605.3300522>. doi:<https://doi.org/10.1145/3290605.3300522>.
- Clark, C., Ellison, W., Southall, B., Hatch, L., Van Parijs, S., Frankel, A., Poniakis, D., 2009. Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 395 (4), 201–222.
- Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., Dooling, R., 2016. Communication masking in marine mammals: a review and research strategy. *Mar. Pollut. Bull.* 103 (1), 15–38. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X15302125>. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.007>.
- Fleiss, J.L., 1975. Measuring agreement between two judges on the presence or absence of a trait. *Biometrics* 31 (3), 651–659. <http://www.jstor.org/stable/2529549>.
- Guilment, T., Socheleau, F.X., Pastor, D., Vallez, S., 2018. Sparse representation-based classification of mysticete calls. *J. Acoust. Soc. Am.* 144 (3), 1550–1563. <http://asa.scitation.org>. <https://doi.org/10.1121/1.5055209>.
- Gwet, K.L., 2014. *Handbook of inter-rater reliability: The definitive guide to measuring the extent of agreement among raters*. Adv. Anal. (LLC).
- Hamming, R.W., 1950. Error detecting and error correcting codes. *Bell Syst. Tech. J.* 29 (2), 147–160. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>.
- Hantke, S., Marchi, E., Schuller, B., 2016. Introducing the weighted trustability evaluator for crowdsourcing exemplified by speaker likability classification. In: *Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'16)*. European Language Resources Association (ELRA), Portorož, Slovenia, pp. 2156–2161. <https://www.aclweb.org/anthology/L16-1342>.
- Kairam, S., Heer, J. Parting crowds: Characterizing divergent interpretations in crowdsourced annotation tasks. In: *Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; CSCW '16; 2016. p. 1637–1648. URL: <https://doi.org/10.1145/2818048.2820016>. doi:<https://doi.org/10.1145/2818048.2820016>.
- Kirsebom, O.S., Frazao, F., Simard, Y., Roy, N., Matwin, S., Giard, S., 2020. Performance of a deep neural network at detecting North Atlantic right whale upcalls. *J. Acoust. Soc. Am.* 147 (4), 2636–2646. <https://doi.org/10.1121/10.0001132>. [10.1121/10.0001132](https://doi.org/10.1121/10.0001132).
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33 (1), 159–174.
- Lee, W., Huang, C., Chang, C., Wu, M., Chuang, K., Yang, P., Hsieh, C., 2018. Effective quality assurance for data labels through crowdsourcing and domain expert collaboration. In: Bohnen, M., Pichler, R., May, N., Rahm, E., Wu, S.H., Hosi, K. (Eds.), *Advances in Database Technology - EDBT 2018*. OpenProceedings.org; *Advances in Database Technology - EDBT*, pp. 646–649. <https://doi.org/10.5441/002/edbt.2018.75>; 21st International Conference on Extending Database Technology, EDBT 2018; Conference date: 26-03-2018 Through 29-03-2018.
- Leroy, E., Thomisch, K., Royer, J.Y., Boebel, O., Van Opzeeland, I., 2018. On the reliability of acoustic annotations and automatic detections of antarctic blue whale calls under different acoustic conditions. *J. Acoust. Soc. Am.* 144, 740–754. <https://doi.org/10.1121/1.5049803>.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E. Scikit-learn, 2011. *Machine learning in python*. *J. Mach. Learn. Res.* 12, 2825–2830.
- Rogers, T.L., 2003. Factors influencing the acoustic behaviour of male phocid seals. *Aquat. Mamm.* 29 (2), 247–260.
- Shiu, Y., Palmer, K., Roch, M.A., Fleishman, E., Liu, X., Nosal, E.M., Helble, T., Cholewiak, D., Gillespie, D., Klinck, H., 2020. Deep neural networks for automated detection of marine mammal species. *Sci. Rep.* 10 (1), 1–12.
- Sirovic, A., 2016. Variability in the performance of the spectrogram correlation detector for northeast pacific blue whale calls. *Bioacoustics* 25 (2), 145–160.
- Snel, J., Tarasov, A., Cullen, C., Delany, S.J., 2012. A crowdsourcing approach to labeling a mood induced speech corpora. In: 4th International Workshop on Corpora for Research on Emotion Sentiment & Social Signals (ES).
- Snow, R., O'Connor, B., Jurafsky, D., Ng, A.Y., 2008. Cheap and fast—But is it good? Evaluating non-expert annotations for natural language tasks. In: *Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Association for Computational Linguistics, USA, pp. 254–263. EMNLP '08.
- Socheleau, F.X., Samaran, F., 2017. Detection of mysticete calls: A sparse representation-based approach. *IMT Atlantique research report RR-2017-04-SC*.

⁶ <http://www.ifremer.fr/pcdm>.

⁷ <https://www.cominlabs.u-bretagne.fr/>.

⁸ <https://www.afbiodiversite.fr/>.

⁹ <https://www.isblue.fr/about-us/>.

2.2 De la reproductibilité des analyses d'acoustique passive

P. Nguyen Hong Duc et al.

Ecological Informatics 61 (2021) 101185

- Socheleau, F.X., Leroy, E.C., Pecci, A.C., Samaran, F., Bonnel, J., Royer, J.Y., Carvallo Pecci, A., 2015. Automated detection of Antarctic blue whale calls. *J. Acoust. Soc. Am.* 138 (5), 3105–3117. <https://doi.org/10.1121/1.4934271>.
- Thompson, P.O., 1965. Marine biological sound, west of San Clemente Island : diurnal distributions and effects on ambient noise level during July 1963. U.S. Navy Electron. Lab. Rep. 1–42.
- Torterotot, M., Royer, J.Y., Samaran, F., 2019. Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the Southern Indian Ocean. In: *IEEE OCEANS*. IEEE, pp. 1–10.
- Urazghildiiev, IR., Clark, CW., 2007. Detection performances of experienced human operators compared to a likelihood ratio based detector. *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (1), 200–204. <http://asa.scitation.org>. <https://doi.org/10.1121/1.2735114>.
- Watkins, W.A., 1981. Activities and underwater sounds of fin whales [*Balaenoptera physalus*]. In: *Sci. Rep. Whales Res. Inst.*, vol. 33, pp. 83–117.
- Zapf, A., Castell, S., Morawietz, L., Karch, A., 2016. Measuring inter-rater reliability for nominal data - which coefficients and confidence intervals are appropriate? *BMC Med. Res. Methodol.* 16 <https://doi.org/10.1186/s12874-016-0200-9>.

2.3 Discussion et perspectives

2.3.1 Perspectives pour un meilleur détecteur automatique

L'évaluation des performances du SRD ont montré qu'il est bien adapté à la détection des vocalisations de baleines bleues étudiées dans cette thèse. Il présente néanmoins de nombreuses limites qui compliquent son utilisation systématique. Différentes pistes de travail sont envisageables. Utiliser des modèles paramétriques dans les dictionnaires permettrait de diminuer la tâche d'annotation et donc la subjectivité de l'annotateur. Ensuite, créer un algorithme de post-traitement unique de classification servirait à différencier les D-calls des nombreuses interférences détectées. Il remplacerait les 2 algorithmes de post-traitement mis en place, qui permettent seulement de discriminer les tirs sismiques et les vocalisations de rorqual commun. De plus, il permettrait peut-être de mettre fin à la laborieuse tâche de vérification manuelle de toutes les détections de D-calls. Enfin, il serait intéressant de mieux comprendre et traiter le problème concernant les différences de résultats observées sur les enregistrements des triplets d'hydrophone (cf. Figure 2.6 partie 2.1.5).

Lors de mon séjour de 3 mois à l'*Applied Physics Laboratory* de l'université de Washington à Seattle, j'ai participé aux prémices d'une collaboration entre les chercheurs Kate Stafford et Trevor Branch et les équipes de Microsoft AI for Earth. Leurs ingénieurs ont déjà collaboré avec des équipes de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sur le développement d'un "classifieur" de sifflements de belugas (Zhong et al., 2020). L'objectif de ce projet est de créer un détecteur de vocalisations de baleines bleues basé sur des méthodes d'intelligence artificielle. L'une des attentes principales est que ce détecteur puisse être utilisé sur de nombreux jeux de données sans nécessité de lourdes adaptations/modifications. Pour l'instant, il est testé sur les données annotées utilisées pour évaluer les performances du SRD (Torterotot et al., 2019). Les prochaines étapes seront de le tester sur un jeu de données plus conséquent pour voir comment il se comporte face aux interférences. Une fois le projet abouti, le code sera mis en ligne gratuitement et accessible par tous.

2.3.2 Perspectives concernant la standardisation du traitement des données d'acoustique passive

A l'instar du groupe de travail OSmOSE, de plus en plus d'initiatives internationales se consacrent à la question de la standardisation du traitement des données d'acoustique passives. Le workshop 'Standards for Annotating and Storing Marine Passive Acoustic Data and Metadata', qui s'est tenu à Victoria en novembre 2019 a réuni plus de 30 cher-

cheurs sur le sujet (Kanes, 2019). L'un des objectifs principaux de ce workshop était d'identifier les informations à inclure dans les métadonnées accompagnant les données. Les métadonnées sont des informations annexes qui permettent de décrire les données et de faciliter leur traitement. Il en est ressorti que si un tel guide de recommandation devait exister, il devrait être assez 'permissif' pour pouvoir être appliqué à divers types de données d'acoustique passive (de différents types de capteurs par exemple). MERIDIAN (Marine Environmental Research Infrastructure for Data Integration and Application Network), un consortium de recherche canadien, a d'ores et déjà créé une plateforme sur laquelle les métadonnées des données d'acoustique passive peuvent être téléchargées et partagées (<https://discovery.meridian.cs.dal.ca/index.js>). Cette initiative offre une meilleure visibilité des données déjà disponibles dans la communauté.

Un deuxième objectif était d'initier la rédaction de recommandations pour une meilleure pratique d'annotation des données. Il en est ressorti qu'un vocabulaire commun devrait être utilisé. Par exemple, les vocalisations modulées en fréquence des baleines bleues sont aujourd'hui généralement appelées D-calls, on trouve aussi l'appellation 'FM calls' ou 'S-calls'. Une dénomination commune aiderait à mieux structurer la nomenclature des vocalisations de mammifères marins. Une idée évoquée pour mettre en place cette nomenclature standardisée serait la création d'une base de données de vocalisations types accessible par tous. Elle permettrait en outre de faciliter la reconnaissance de vocalisations dans de nouvelles données. L'interface d'annotation Aplose s'inscrit tout à fait dans ce mouvement de standardisation des pratiques d'annotation. Par exemple, des chercheurs de l'OrcaSound Lab souhaitent l'utiliser pour faire annoter des vocalisations d'orques (*Orcinus orca*) à plusieurs experts géographiquement éloignés.

Enfin, les pratiques d'utilisation et d'évaluation des détecteurs et "classifieurs" automatiques ont été abordées. Les premières pistes de réflexion concernent l'établissement de bonnes pratiques, *e.g.* décrire les algorithmes utilisés et les paramètres correspondant, toujours tester les algorithmes sur une portion des données avant de les utiliser systématiquement et bien définir les performances. L'idée de pouvoir tester les algorithmes de détection sur des jeux de données de référence a aussi été suggérée. Il en existe déjà quelques-uns (*e.g.* DCLDE, SORP), mais ils sont en général annotés par peu de personnes. L'interface Aplose pourrait alors être utilisée pour créer des bases de données de références validées par de nombreux experts, géographiquement éloignés.

Il serait intéressant de compléter l'étude présentée au paragraphe 2.2.2 par une analyse de l'influence de l'accord inter-annotateur sur les performances d'algorithmes de détection automatique. Elle viendrait compléter les analyses menées sur ce sujet, en général par trois annotateurs ou moins seulement (Širović, 2016; Leroy et al., 2018c; Torterotot et al., 2019). Comprendre l'influence de l'annotation sur les performances de détection automatique est nécessaire pour mettre en place des protocoles d'évaluation des performances

plus standardisés.

2.4 Conclusion

Ce chapitre méthodologique a décrit l'outil de détection automatique des vocalisations de baleines bleues, basé sur l'utilisation de dictionnaires et la représentation parcimonieuse. L'évaluation des performances a fait l'objet d'un article publié dans les comptes rendus de la conférence IEEE OCEANS 2019. La stratégie de détection a été adaptée pour limiter le nombre de fausses alarmes tout en gardant un taux de détection élevé. Pour cela, le développement d'algorithmes de post-traitement a été nécessaire. L'un d'entre eux permettra aussi d'étudier la présence des tirs de canons à air dans les données (cf. Chapitre 6). Les limites du détecteur sont bien identifiées et des travaux sont en cours, pour y remédier. La deuxième partie du chapitre présente les travaux effectués sur la standardisation du traitement des données d'acoustique passive dans le cadre du groupe de travail OSmOSE. L'interface d'annotation Aplose participe pleinement à ces efforts, que ce soit pour créer de jeux de données de référence communs, pour étudier les sources de variabilité dans l'annotation ou encore pour faciliter la standardisation des pratiques d'annotation.

Chapitre 3

Distribution acoustique de trois populations de baleines bleues dans l'océan Indien austral

3.1 Introduction

L'outil de détection automatique présenté au chapitre 2 a été utilisé pour détecter systématiquement les vocalisations de baleines bleues Antarctique et de baleines bleues pygmées d'Australie et de Madagascar dans les enregistrements du réseau OHASISBIO. A partir de ces détections, ce chapitre présente une analyse détaillée de la présence acoustique géographique et saisonnière de ces trois populations de baleines bleues de 2010 à 2018 dans l'océan Indien austral. Nos résultats viennent compléter les connaissances acquises par plusieurs autres études de suivis des baleines bleues par acoustique passive dans cette région. Les enregistrements réalisés en 2003-2004 par les hydrophones du CTBTO situé à proximité de l'archipel de Crozet ont été les premiers à révéler que cette région est importante pour les sous-espèces de baleines bleues pygmées et Antarctique (Samaran et al., 2010a). En 2007, le réseau d'hydrophones DEFLOHYFRO, composé de trois capteurs aux sites actuels de MAD, SWAMS et NEAMS, a permis d'élargir la zone d'étude. Les vocalisations des différentes populations de baleines bleues apparaissent de façon saisonnière sur les 3 sites, parfois de façon simultanée. Les résultats indiquent aussi que les populations de baleines bleues pygmées d'Australie et de Madagascar ont des aires de répartition géographiquement distinctes (Samaran et al., 2013). En 2016, une analyse des 6 premières années d'enregistrements des hydrophones du réseau OHASISBIO a montré que les vocalisations de baleines bleues Antarctique étaient enregistrées tous les ans sur tous les hydrophones. Les patrons saisonniers renforcent l'idée que les eaux sub-antarctiques et sub-tropicales de l'océan Indien sont des aires d'hivernage pour cette

sous-espèce (Leroy et al., 2016). Enfin, une analyse de la puissance du chorus des vocalisations des baleines bleues pygmées d'Australie et de Madagascar, a confirmé la présence très saisonnière de ces populations dans l'océan Indien austral (Leroy et al., 2018b).

L'article reproduit ci-après, publié dans le journal *Deep Sea Research Part II* présente une analyse détaillée des 9 ans d'enregistrements disponibles du réseau OHASISBIO (2010-2018), en termes de présence acoustique géographique et saisonnière des baleines bleues Antarctique et pygmées d'Australie et de Madagascar. Il comprend trois années de données supplémentaires par rapport aux observations précédentes de Leroy et al. (2016, 2018b). De plus, la géométrie du réseau, repensée en 2017 avec de nouveaux sites dans la région sub-tropicale (MADW, MADE, RTJ) et au sud (ELAN), élargit encore la zone d'observation. Enfin, l'indicateur de présence acoustique des baleines bleues pygmées est plus précis que la puissance de leur chorus analysée par Leroy et al. (2018b) et offre une vision plus fine de leur présence géographique et saisonnière.

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

Les résultats confirment les distributions spatiales et temporelles décrites précédemment et affinent les aires de répartitions des différentes populations, avec une séparation très claire entre les baleines bleues pygmées d'Australie à l'est et de Madagascar à l'ouest. Les sites nouvellement instrumentés en 2017 précisent la limite de distribution des baleines bleues Antarctique au nord (RTJ). Ils révèlent aussi la très forte présence acoustique des baleines bleues Antarctique et pygmées de Madagascar à MADW ainsi que la présence saisonnière de ces mêmes populations à ELAN (de juin à décembre pour les premières et d'avril à juin, puis de novembre à décembre pour les secondes). Ces résultats suggèrent que les baleines bleues Antarctique et les baleines bleues pygmées utilisent l'océan Indien de façons très différentes. En effet, les premières sont acoustiquement présentes presque toute l'année dans l'océan Indien austral alors que les deuxièmes ne sont détectées que périodiquement. De plus, les mouvements migratoires des baleines bleues Antarctique sont très variables d'une année à l'autre, alors que ceux des baleines bleues pygmées sont stables. De telles différences dans l'occupation du sud de l'océan Indien par les baleines bleues Antarctique et les baleines bleues pygmées pourraient refléter des préférences pour certaines proies, et une utilisation différentes de l'habitat (*i.e.* reproduction vs alimentation), mais aussi des mode de vie très différentes entre une sous-espèce très mobile (baleines bleues de l'Antarctique) et une sous-espèce résidant exclusivement dans l'océan Indien (baleines bleues pygmées). Les deux sous-espèces sont toutefois

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

parfois enregistrées simultanément, particulièrement au nord du réseau (MAD, MADW, NEAMS, SWAMS), dans une région propice à la reproduction et donc potentiellement au brassage génétique des populations (Attard et al., 2012).

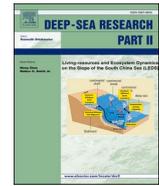


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Deep-Sea Research Part II

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/dsr2>



Distribution of blue whale populations in the Southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

Maëlle Torterotot^{a,*}, Flore Samaran^b, Kathleen M. Stafford^c, Jean-Yves Royer^a

^a Laboratoire Géosciences Océan, Université de Brest, Brest, France

^b Lab-STICC, ENSTA Bretagne, Brest, France

^c Applied Physics Laboratory, University of Washington, Seattle, USA

ARTICLE INFO

Keywords:

Antarctic blue whale
Pygmy blue whale
Passive acoustics
Population distribution

ABSTRACT

Globally, the Indian Ocean appears to have the greatest blue whale (*Balaenoptera musculus* ssp) acoustic diversity, with at least four acoustic populations from three defined sub-species. To understand how these different populations use this region as habitat, we first need to characterize their spatial and seasonal distributions. Here, we build on previous passive acoustic monitoring studies and analyze a passive acoustic dataset spanning large temporal (9 years) and spatial (3–9 sites covering more than 12 million km² of potential acoustic habitat in the southwest Indian Ocean) scales. A novel detection algorithm was employed to investigate the long-term presence of Antarctic blue whale and SEIO and SWIO pygmy blue whale calls. We found that Antarctic and pygmy blue whales have completely different spatial and seasonal distribution in the southern Indian Ocean. Antarctic blue whales are heard almost year-round on the whole array, with great inter-annual variability. The two pygmy blue whales share a highly stable seasonal acoustic presence, but their geographical distributions overlap at only a few central Indian Ocean sites. However, Antarctic and pygmy blue whale acoustic co-occurrence is common, especially in sub-tropical waters. These temporal and spatial distributions strengthen our understanding of seasonal occurrence and habitat use of distinct populations of blue whales in the southern Indian Ocean. A better comprehension of the ecology of Indian Ocean blue whales will require interdisciplinary studies to examine the drivers of the variability seen from passive acoustic studies.

1. Introduction

The Indian Ocean, particularly its southern extent, is one of the oceans with the greatest blue whale acoustic diversity (McDonald et al., 2006). As a response to extensive commercial whaling in both the Southern and Indian Oceans which greatly depleted numbers of blue whales, in 1979 the International Whaling Commission (IWC) created the Indian Ocean Whale Sanctuary (IOWS), the first ever region where commercial whaling was banned for all species (IWC, 1980). Three blue whale subspecies are seasonally present in the Indian Ocean: the Antarctic blue whale (*Balaenoptera musculus intermedia*) and the pygmy blue whales (*B. m. breviceauda* and *B. m. indica*). Antarctic and pygmy blue whales are genetically distinct and differ in body size and acoustic signatures (Ichihara, 1966; LeDuc et al., 2007; Ljungblad et al., 1998). Furthermore, at least three distinct populations of pygmy blue whales have been identified: the Northwestern (NWIO), Southwestern (SWIO) and Southeastern (SEIO) pygmy blue whale populations (Stafford et al.,

2011). Whereas the Antarctic blue whale has been declared as an endangered species by the IUCN (International Union for the Conservation of Nature), the status of the pygmy blue whale is unknown and therefore considered 'data deficient' by the IUCN (Cooke, 2019). Monitoring blue whales remains a challenge due to the scarcity of individuals and to the extent and location of their habitat, largely encompassing remote and inaccessible regions of the ocean. Moreover, identifying pygmy from Antarctic blue whales by visual observation is very difficult, as they look almost identical, despite the smaller length of pygmy blue whales (Ichihara, 1966). Thus, most of the knowledge about blue whales in the Indian Ocean comes from whaling data (Branch et al., 2007, 2009), and from passive acoustic monitoring (Samaran et al., 2010a, 2013; Stafford et al., 2011; Leroy et al., 2016; Dréo et al., 2018). Blue whales are particularly good candidates for this type of observation, because of their repetitive, long (more than 15 s), loud (more than 180 dB ref 1 μPa at 1 m) and low frequency (20–100 Hz) calls (Cummings and Thompson, 1971). Blue whale calls vary from one region to another and have been

* Corresponding author.

E-mail address: maelle.torterotot@ensta-bretagne.fr (M. Torterotot).

<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104874>

Received 17 March 2020; Received in revised form 11 August 2020; Accepted 6 September 2020

Available online 12 September 2020

0967-0645/© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

used to tell apart different blue whale sub-species and acoustic populations (McDonald et al., 2006). In the southeastern Indian Ocean (Fig. 1 a) and Southwestern Indian Ocean (Fig. 1 b) pygmy blue whale populations as well as Antarctic blue whale calls (Fig. 1 c) have clear distinct characteristics that are readily observed in the spectrogram (McCauley et al., 2000; Samaran et al., 2010a; Stafford et al., 2011).

Whaling data depicted baleen whale migration as being a consistent movement between productive feeding grounds at high latitudes in summer, and breeding grounds at lower latitudes in winter (Kellogg, 1929; Mackintosh, 1942, 1966). However, year-round captures and sightings of Antarctic blue whales in whaling grounds at high or low latitudes suggest more complex migratory behaviors (Harmer, 1931; Branch et al., 2007). In agreement with these findings, evidence of year-round acoustic presence of Antarctic blue whales off Antarctica (Širović et al., 2014; Thomisch et al., 2016) and Namibia (Thomisch et al., 2019), and observations of foraging behavior en route towards summer feeding grounds (Visser et al., 2011) supports the idea of a more complex migratory pattern. For instance, skipping migration to remain at feeding grounds may benefit individuals to maximize their growth and body mass (Shaw and Levin, 2011). In the southern Indian Ocean, Antarctic blue whale calls are detected year-round, with a lesser presence during austral summer and a shift from subantarctic locations in austral autumn to subtropical locations in the austral winter and back to subantarctic locations in spring (September to November) (Stafford et al., 2004; Samaran et al., 2010a, 2013; Leroy et al., 2016). This seasonal pattern is generally stable over the years, but some variations suggest that the migration routes are flexible (Samaran et al., 2010a, 2013; Leroy et al., 2016). In contrast, pygmy blue whales present a totally different migration pattern. Short-term (Stafford et al., 2011; Samaran et al., 2013) and broad-scale acoustic studies based on the chorus intensity (intensity within the call frequency band) depict a longitudinal differentiation of the SEIO and SWIO pygmy blue whale populations. The former are mainly present in the eastern Indian Ocean and the latter in the western Indian Ocean. Yet, they seem to share a common seasonality with an acoustic presence during all seasons except spring (Stafford et al., 2011; Samaran et al., 2013; Leroy et al., 2018b).

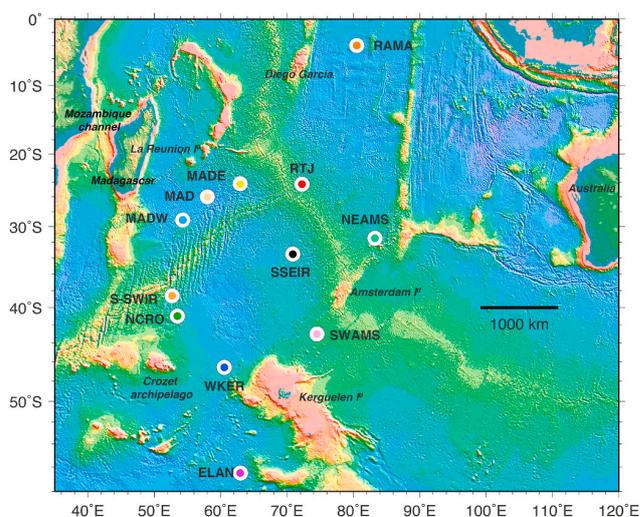


Fig. 2. The OHASISIBIO hydrophone network in the Southern Indian ocean. Colored dots represent mooring sites.

Despite their different distribution, SEIO and SWIO pygmy blue whales have both been recorded near the Crozet archipelago (46°24'41" S, 51°45'22" E) (Samaran et al., 2010a) and southwest of Amsterdam Island (37°50'00" S, 77°31'00" E) (Samaran et al., 2013), at the fringes of their respective habitat (see map in Fig. 2). Similar co-occurrence of pygmy blue whales (SEIO and southwestern Pacific populations) has been reported in the Bass Strait, between mainland Australia and Tasmania (McCauley et al., 2018), which marks the geographical barrier between these two populations Balcazar et al. (2015). Sympatric acoustic presence of Antarctic and pygmy blue whales has also been observed off southern Australia (Tripovich et al., 2015), near the Crozet archipelago (Samaran et al., 2010a), in the Madagascar Basin, north and

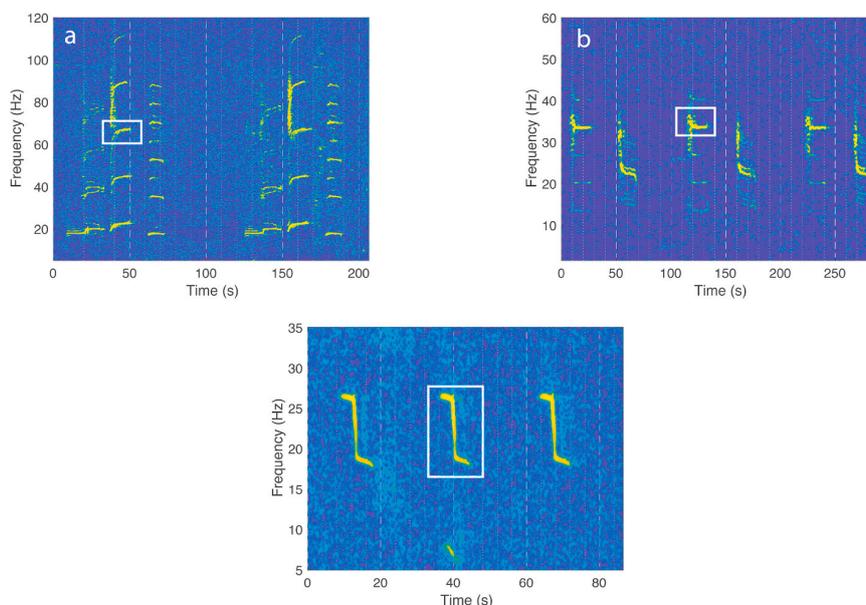


Fig. 1. Typical spectrograms of (a) Southeastern Indian Ocean pygmy blue whale calls (b) Southwestern Indian Ocean pygmy blue whale calls, and (c) Antarctic blue whale calls from the Southern Indian Ocean. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

south of Amsterdam Island (Samaran et al., 2013) and in the north of the Mozambique Channel (Cerchio et al., 2018).

The function of songs for blue whales is not unanimously agreed upon. The fact that only males are thought to sing (Oleson et al., 2007; Lewis et al., 2018) as well as the seasonal repetition, high source levels (McDonald et al., 2001; Širović et al., 2007; Samaran et al., 2010b) and the long durations of the calls, point to a reproductive purpose (McDonald et al., 2001; Oleson et al., 2007). Acoustic co-occurrence of different sub-species may therefore indicate potential inter-subspecies breeding areas or the use of song to isolate different populations from interbreeding (Stafford and Moore, 2005). However, the year-round detection of songs at high-latitude feeding areas (Stafford et al., 2001; Širović et al., 2004, 2009; Thomisch et al., 2016) suggests that the calls may play additional roles, such as assisting in navigation and prey detection (Clark and Ellison, 2004), or promoting the formation of pairs (Lewis et al., 2018; Oleson et al., 2007). Acoustic co-occurrence of multiple sub-species may also simply reflect differing ecological strategies and/or habitat use by each subspecies, such as off Southern Australia, which would be a migratory corridor for Antarctic blue whales and a feeding ground for the SEIO pygmy blue whales (Tripovich et al., 2015).

To progress in our understanding of these concepts, this work presents a detailed analysis of the seasonal and spatial presence of Antarctic and pygmy blue whales, based on 9 years of continuous acoustic recordings (2010–2018) at multiple sites across the southern Indian Ocean. Relative to previous analyses, we provide a longer time series and new recording locations. We also base our analysis on the systematic detection of pygmy blue whale calls, when former studies only looked at the chorus power to describe their acoustic presence. The comparison between these two passive acoustic monitoring metrics is then discussed. These data yield a clearer picture on the seasonal acoustic presence of pygmy and Antarctic blue whales and spatially how they share the IWC IOWS. This information is essential for improving the management and conservation of the world’s largest animal.

2. Material and methods

2.1. Data acquisition

The acoustic data used in this study were recorded by the OHASISBIO (Observatoire Hydro-Acoustique de la SISmicité et de la Biodiversité; Royer (2009)) hydrophone network, located in the southwest Indian Ocean (see Fig. 2). The network was deployed in December 2009 and is still recording as of the date of publication. Between 2009 and 2016, it comprised 5 permanent mooring sites, located south of La Réunion Island (MAD), north of Crozet archipelago (NCRO), west of Kerguelen Island (WKER) and southwest and northeast of St Paul and Amsterdam islands (SWAMS and NEAMS). In 2012–2013, a mooring was temporarily deployed near the Equator, in the Central Indian Basin, east of Diego Garcia archipelago (RAMA) and since 2014, a new site was instrumented, south of the southeast Indian Ridge (SSEIR). In 2017, the network geometry was slightly modified to improve the coverage of the northern areas and refine the location of blue-whale wintering grounds, with three new sites RTJ, MAD-W and MAD-E, the latter two on either side of the initial MAD site. The new site S-SWIR, south of the southwest Indian ridge, replaced the NCRO site and an additional mooring (ELAN) was installed at 56°S, south of Kerguelen plateau, to complete the spatial coverage southward. The MAD and NCRO moorings are no longer deployed.

Each mooring is composed of an anchor, an acoustic release, an

adjustable length of line and a submerged buoy containing the recording system. The instruments are moored between 1000 m and 1300 m depth, corresponding to the local sound fixing and ranging (SOFAR) channel axis. The SOFAR works like a waveguide, where low frequency sounds can propagate over very long distances (Lurton, 2002). The instruments record continuously at a sampling rate of 240 Hz using a 24-bit analog-to-digital conversion and the recorded data are archived on the instrument (d’Eu et al., 2012).

The moorings are turned around annually and the data are collected every January/February during the annual scientific cruise of R/V Marion Dufresne to the French Southern and Antarctic Territories in the southern Indian Ocean. The current database comprises almost continuous acoustic records over 9 years (from 2010 to 2018), with some gaps mostly due to unexpected battery exhaustion. Table 1 summarizes the site coordinates and the recording periods of the data used in this study. The first six lines correspond to the long-term monitoring sites, and the last six lines to the short-term monitoring sites.

2.2. Acoustic data processing

The metrics used here to assess blue whale acoustic presence are the number of calls detected per week, month or year. For pygmy blue whale calls with multiple units, a single unit was detected, either because it was the loudest unit of the call or because its frequency did not overlap with that of other blue whale calls (selected units are outlined by white rectangles in Fig. 1). For Antarctic blue whales, the whole call was used for detection (Fig. 1 c). For the SEIO pygmy blue whales, we selected the most powerful harmonic at 70 Hz (Fig. 1 a). For the SWIO pygmy blue whales, we selected the 35 Hz unit (Fig. 1 b), to avoid overlap with the Antarctic blue whale chorus. The chorus is the elevation of the noise in specific frequency bands produced by the accumulation of numerous distant calls overlapping (Širović et al., 2009; Thomisch et al., 2016).

2.2.1. Automated call detection

To facilitate the time-consuming and tedious task of manually detecting calls, an automated detection algorithm based on dictionary learning and sparse representation of blue whale vocalizations was used (Socheleau and Samaran, 2018). The principal asset of this method lies in the alliance of large dictionaries, which take call variability into account, with linear combinations of several elements of those dictionaries, to reflect call complexity. The detector does not require an *a priori* fixed template, but works with dictionaries built from temporal call signals directly extracted from the data. It then tries to reconstitute the observed signal with sparse combinations of the waveforms contained in the dictionary. The better the signal is reconstructed, the higher the resemblance metric (Socheleau and Samaran, 2018; Guilment et al., 2018).

In such an endeavor, the difficulty is to avoid the detection of interfering signals and therefore to avoid a time-consuming double check of each detection - while keeping a reasonable recall, at least for high Signal to Noise Ratio (SNR) calls which are more likely to come from whales close to the hydrophone. To achieve this goal, the algorithm was tested on a large manually annotated data subset containing recordings from different seasons and locations of the OHASISBIO array. A threshold corresponding to one false positive detection per hour was set and the corresponding recall reached 90% for positive SNR calls (Torterotot et al., 2019). The detector was then tested on an entire year of data (2015) at WKER site and every detection was manually double checked, to characterize any interferences that could fool the algorithm and to re-evaluate the false alarm rate in case of call absence. Most

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

Table 1
 Details of the OHASISBIO deployments with: mooring name; latitude and longitude; starting and ending recording date. A “.” indicates continuous recording without data recovery, an “x” sign indicates absence of data.

Site	Geo. Coord.	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018			
		Start	Stop																		
MAD	26°05'S, 058°08'E	20/12/09	19/02/11	19/02/11	09/03/12	10/03/12	10/03/12	09/03/13	09/03/13	16/02/14	16/02/14	18/01/15	18/02/15	28/01/16	29/01/16	09/01/17	x	x	x	x	
NEAMS	31°35'S, 083°14'E	13/02/10	-	-	25/11/11	04/03/12	04/03/12	04/03/13	04/03/13	x	x	x	4/02/15	25/08/15	x	x	31/01/17	05/02/18	05/02/18	29/01/19	
SSEIR	33°30'S, 70°30'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
NCRO	41°00'S, 52°49'E	x	x	20/01/11	30/01/12	29/01/12	10/02/13	x	x	11/01/14	11/01/14	11/01/15	05/02/15	18/01/16	25/01/16	04/02/17	04/02/17	08/02/18	08/02/18	23/12/18	
SWAMS	42°59'S, 74°35'E	x	x	x	x	29/02/12	27/02/13	28/02/13	28/02/13	07/02/14	07/02/14	27/01/15	27/01/15	20/01/16	21/01/16	01/08/16	x	x	31/01/18	30/01/19	
WKER	46°38'S, 60°07'E	28/12/09	24/01/11	03/02/12	04/02/12	04/02/12	14/02/13	15/02/13	15/02/13	15/01/14	15/01/14	01/01/15	16/01/15	01/08/16	12/01/16	20/01/17	20/01/17	19/01/18	19/01/18	28/07/18	
RAMA	03°50'S, 80°30'E	x	x	x	x	05/05/12	-	-	-	11/12/13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
RTJ	24°15'S, 72°15'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11/02/18	
MAD-E	24°11'S, 63°01'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	13/02/18	
MAD-W	29°03'S, 54°16'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	07/02/17	
S-SWIR	38°33'S, 52°53'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	13/02/18	
ELAN	56°28'S, 62°59'E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	06/01/18	
																				08/01/17	
																					22/12/17
																					09/01/18
																					14/01/19
																					16/01/18
																					23/01/19

interferences are due to chorus, especially for SWIO pygmy blue whale calls. Other interference categories include ship noise and unknown continuous noise within the call frequency band. The number of false positive detections was stable across different abundance scenarios (i.e. periods of high and low call presence) and was far below the theoretical one-false-positive-detection-per-hour rate initially defined. The different annotation procedures (i.e. manual annotation then automated detection versus automated detection then manual double-check) might explain these variabilities. To account for the annual linear pitch decrease of blue whale calls (Gavrilov et al., 2011, 2012; Leroy et al., 2018a), a new dictionary was built for every year from the detector outputs based on a dictionary from a contiguous year. The performance evaluation of the algorithm on the same data used in this paper is thoroughly discussed in Torterotot et al. (2019).

2.3. Detection results analysis

Recordings with a small number of annual detections were manually double checked to assess whether or not these few detections accurately illustrated a blue whale acoustic presence. For SEIO pygmy blue whale calls, ELAN, MAD, SSEIR, MAD-E, MAD-W, NCRO, RTJ, S-SWIR and RAMA sites were double-checked; for SWIO pygmy blue whale calls, ELAN, SSEIR, RTJ and RAMA sites were double-checked; for Antarctic blue whale calls only RAMA site was double checked. If most of the detections were false alarms, the annual number of detections was set to 0, otherwise, all the detections were left as is.

Seasonal occurrence is presented as the absolute number of detections per week, for every week with more than 6 days of recording. Weeks with fewer than 6 days are considered as incomplete and the results are not presented. To study the inter-annual variability of the acoustic seasonal pattern, we used the Pearson correlation coefficient, a non-parametric test that is used to measure whether or not a correlation (i.e. linear relationship) exists between call distribution from two consecutive years. To assess quantitatively how the different sub-species share a recording site, we compared their seasonal pattern using Spearman’s correlation coefficients. This statistic tests whether or not a correlation (i.e. monotonic relationship) exists between the seasonal presence of two blue whale acoustic populations. For both correlation tests (Pearson’s and Spearman’s), only the results with a p value < 0.05 , meaning that the null hypothesis cannot be rejected, will be reported.

Sympatry is defined as the number of hours per month with multiple acoustic blue whale populations detected normalized by the total number of recorded hours that same month over the whole recording period (2010–2018). To avoid taking too many false detections into account, a call type is considered detected when there was more than one detection within an hour.

Austral seasons are defined as follows: summer (December, January, February), autumn (March, April, May), winter (June, July, August), and spring (September, October, November).

Results at sites NCRO and S-SWIR are combined in the same figure for the sake of space: from 2011 until 2016 they refer to NCRO data and for 2017 and 2018 to S-SWIR data. Results for the long-term sites are illustrated in Figs. 3 and 4, whereas results for the short-term sites are given in Table 2 or in the appendices.

3. Results

3.1. Spatial distribution and long term trends

Fig. 3 displays the number of detected calls per year for the long-term

recording sites (rows) and the three blue whale calls (columns). Since blue whale acoustic presence is highly seasonal, normalizing the number of detections per year by the number of days of recording could lead to some misinterpretation, especially regarding pygmy blue whales. For example, at site WKER the number of SWIO pygmy blue whale calls is similar in 2017 and in 2018. However the hydrophone only lasted 6 months in 2018, from January to mid-July. Usually SWIO pygmy blue whale calls are detected during the first 6 months of the year, so the number of calls at WKER in 2017 and 2018 is similar. If the number of detections had been normalized, it would have appeared that more calls were detected in 2018 than in 2017. Instead of normalizing the number of calls per year by the recording duration, we show the actual detection number (color bars) and the number of days of recording per year (black dots). For the short-term recording sites, the results are given in Table 2 and in Appendix 1, except for RAMA which did not contained any detections.

Antarctic blue whale calls were detected at all the OHASISBIO recording sites except at RAMA (Fig. 3, Table 2). Overall, higher numbers of detections per year occurred at MAD-W and NEAMS sites, with the highest number of detections at NEAMS in 2013 ($n = 47\ 097$). The annual number of detections was also very high at SWAMS and WKER, whereas fewer detections were reported at SSEIR, NCRO and MAD ($n < 21\ 000$), except in 2014 when the number of detections at MAD doubled ($n = 43\ 110$). Number of detections were reduced at RTJ, MAD-E and ELAN ($n < 12\ 000$), although only one or two years of data were available. At NEAMS, the annual number of detections increased from 2010 to 2013, and then appeared to have reached a plateau of about 40 000 calls per year. At WKER, the annual number of detections per year was steady, with two small peaks in 2012 and 2014. At SWAMS and NCRO, the number of detections does not follow any obvious trend. At MAD, the annual number of detections was steady, except for peak in 2014 with almost twice as many detections as for any of the other years. There were no peaks in detections at the other sites. Globally, the annual number of Antarctic blue whale call detections did not follow any clear systematic trend or pattern.

SEIO pygmy blue whales were present at all sites of the hydrophone array, except at RAMA and MAD-W (Fig. 3, Table 2). However, for some sites, detections were scarce and limited to specific years; for instance calls were only detected in 2014 for MAD and in 2014, 2015, and 2016 for NCRO. The site with the highest number of detections was SWAMS, followed by NEAMS and then WKER. The SSEIR site had detections of SEIO pygmy blue whale calls every year, but in very small numbers (from 258 in 2017 to 627 in 2018). Similarly, only a few calls were detected at RTJ, MAD-W and ELAN. Over the years, for NEAMS, WKER and SSEIR, the number of calls detected per year does not follow any particular trend. However, at SWAMS, the number of detections significantly increased from 2012 to 2016 (5226 up to 17 453, resp.) and diminished in 2018 (9188), although the number of recording days was less in 2016 (Fig. 3).

SWIO pygmy blue whale calls were recorded at all the OHASISBIO sites except at RTJ, with only a few barely detectable calls (i.e. with very low SNR) in the chorus, and RAMA (Fig. 3, Table 2). At MAD-W, even though only two years of data are available, the number of detections per year ($n > 28\ 000$) was almost double that of any other site. The long-term sites where SWIO pygmy blue whale calls were most commonly detected were MAD and NCRO, at the western side of the OHASISBIO hydrophone array. Conversely, NEAMS and SSEIR displayed fewest detections per year ($n < 6000$). At MAD site, the annual number of detections steadily increased from 2010 to 2015, from fewer than 3000 calls per year to more than 15 000. At SWAMS, the annual number of

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

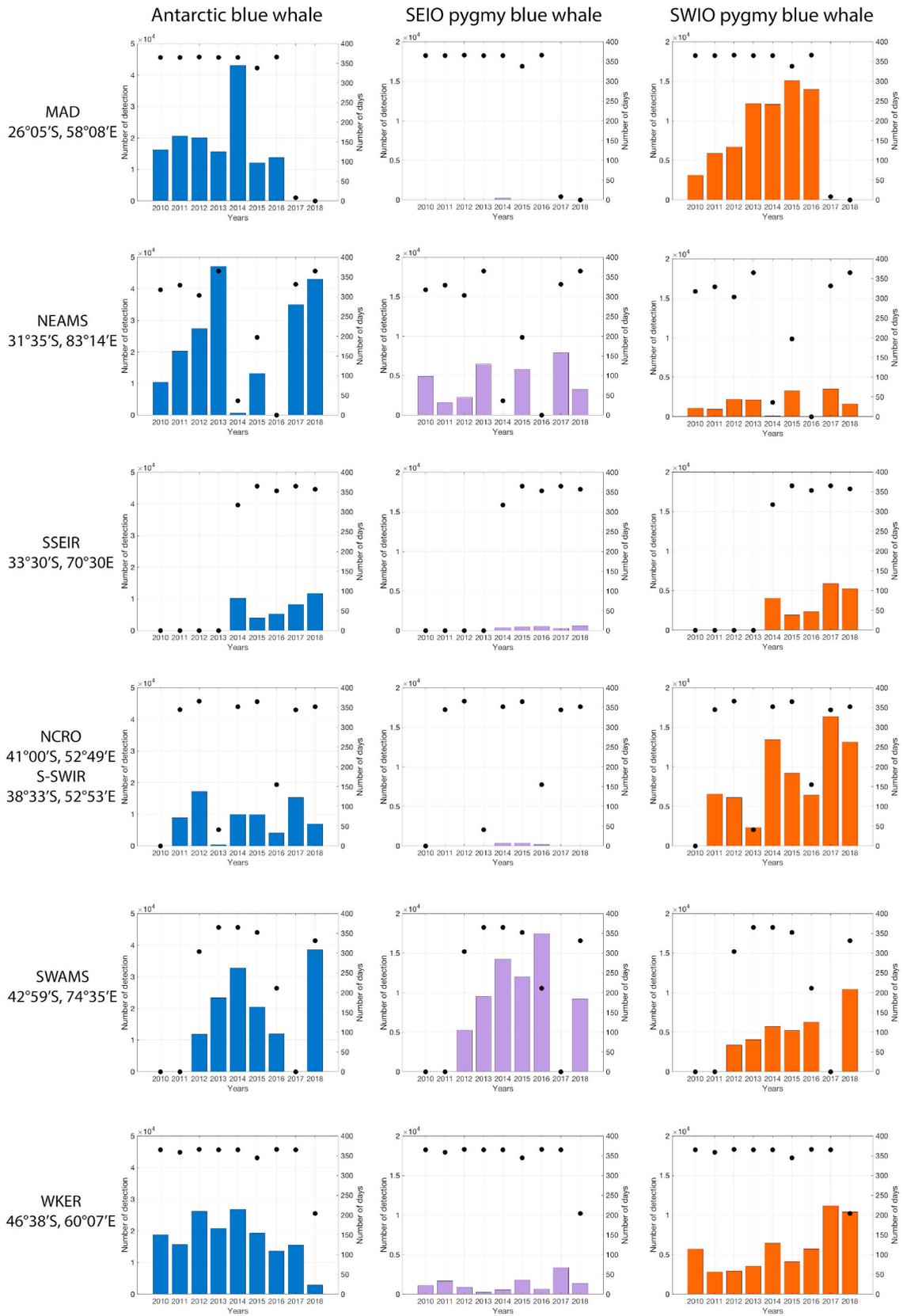


Fig. 3. Number of detected calls per year (left y-axis). Each row corresponds to a different site and each column to a different call type. The sites are displayed from north to south. Black dots represent the number of days of recording for each year (right y-axis).

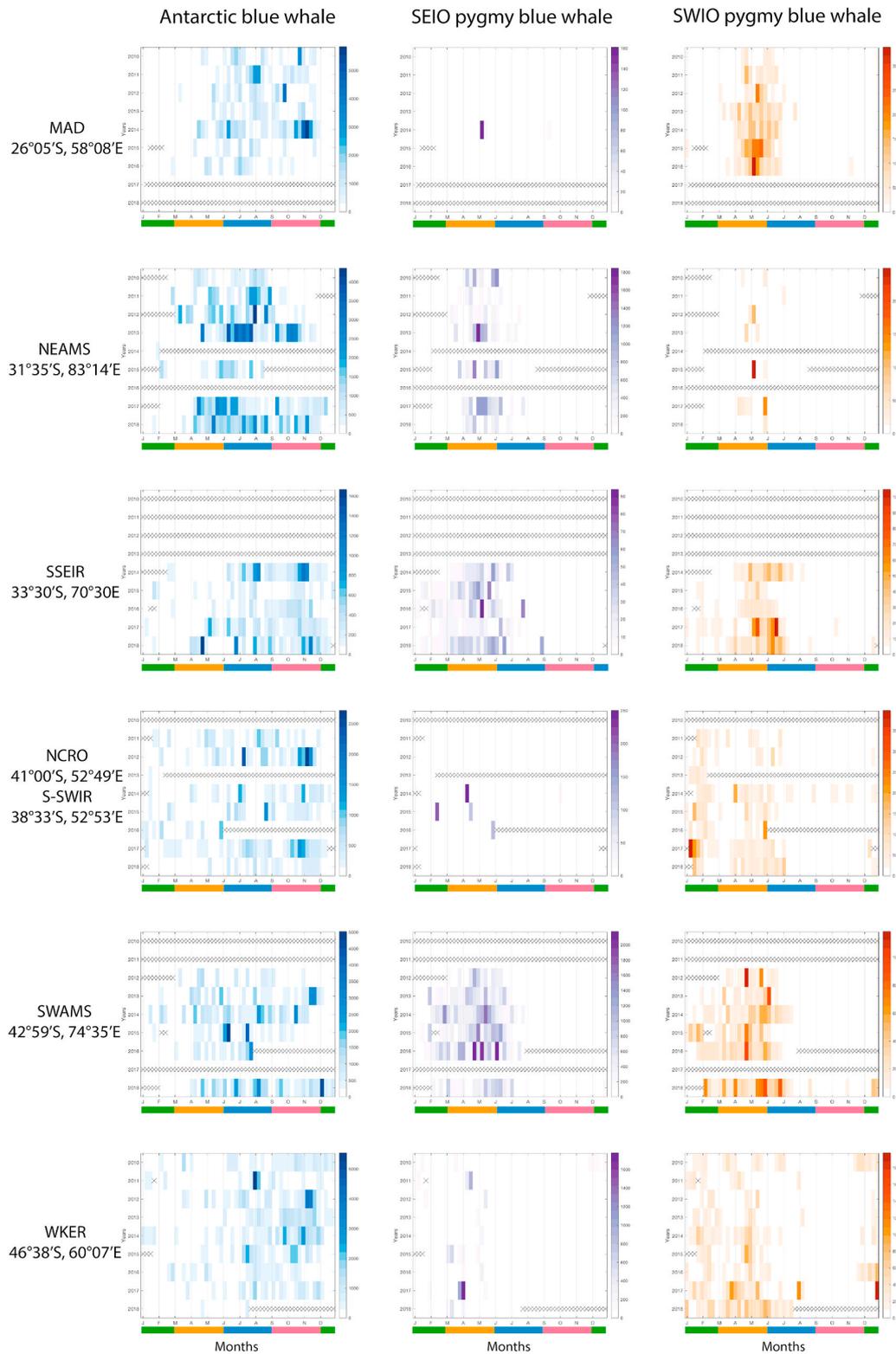


Fig. 4. Blue whale weekly acoustic presence. Each row corresponds to a recording site and each column to a blue whale call type. Each graph shows the density of calls per week (color intensity) for every month (x-axis) of the year in the y-axis. Note that the color scale is different for every graph). Weeks with fewer than 6 days of recordings are shown by X. Seasons are shown below the x-axis in different colors (summer: green, autumn: orange, winter: blue, spring: pink). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

Table 2

Number of detected calls per year for each blue whale acoustic population at the short term OHASISBIO sites. The effort is in days per year with recordings.

	RTJ				MAD-E				MAD-W				ELAN			
	Antarctic	SEIO	SWIO	Effort	Antarctic	SEIO	SWIO	Effort	Antarctic	SEIO	SWIO	Effort	Antarctic	SEIO	SWIO	Effort
2017	0	0	0	0	11 707	507	8292	324	44 551	0	28 130	359	0	0	0	0
2018	11 567	198	0	324	3008	460	9394	197	36 569	0	34 888	302	11 352	124	7481	345

calls was more modest but also increased, doubling from 3387 calls in 2012–6279 in 2018. At the other sites, NCRO, NEAMS, SSEIR and WKER, there was no clear trend in the annual number of SWIO pygmy blue whale detections.

3.2. Seasonal distribution and inter-annual variability

The seasonal acoustic presence of Antarctic and both pygmy blue whales is shown in Fig. 4 for the six long-term monitoring sites. The observations for the short-term monitoring sites are presented in Appendix 2.

Antarctic blue whale calls were detected year-round in the monitored area. Nonetheless, they were mostly detected from April to November at the northernmost sites (MAD-W, MAD, MAD-E, RTJ, NEAMS, SSEIR, SWAMS). At WKER and ELAN, the peak acoustic presence was shifted and occurred from July until December/January. The seasonality was less clear at S-SWIR and NCRO where the calls were detected almost all year long.

Detection of SEIO pygmy blue whale calls was highly seasonal, from February until June and peaking in autumn (March and April). They were detected a bit later at NEAMS (from March/April). At WKER, SEIO pygmy blue whale calls were recorded every year, during a few weeks between January and May. At MAD and NCRO, SEIO pygmy blue whale call detections only occurred rarely, during one week in March 2014 at MAD and during a few weeks in April 2014, in February and April 2015 and in May 2016 at NCRO. At the short term sites (RTJ, MAD-E and ELAN), SEIO pygmy blue whale calls were briefly detected, with a few calls spread on a small number of weeks, mostly during May and June.

The presence of SWIO pygmy blue whale calls was also highly seasonal, especially north of the array, where they were mostly detected

from March until July (MAD-W). At MAD-E and MAD, the seasonality was even more restrained, occurring only between April and June. At NEAMS, they were only detected during a few weeks per year in April or May. At SSEIR, calls were mostly detected between May and July, with sometimes a few detections from February until April. At NCRO and S-SWIR, the detection pattern seemed bimodal, with calls detected from January to February and then from April until June. At SWAMS, calls could be detected from January to June although occasionally they were detected as early as December. South of the array, SWIO pygmy blue whale calls were sometimes detected as early as mid-November until July at WKER, and from mid-October until January and then from April to July at ELAN.

The inter-annual correlations (Pearson’s coefficients) are higher for pygmy blue whale presence than for that of Antarctic blue whales (Table 3). The seasonality of the latter was quite variable, with only a few pairs of years with a high correlation coefficient. Most of the time, the null hypothesis could not be rejected for Antarctic blue whale presence, especially at NCRO where only one pair of years was correlated and SWAMS where no correlation was found. The greatest correlation coefficient (57%) occurred at WKER, between 2013 and 2014.

Pygmy blue whales followed a more stable presence pattern over the years, particularly at sites with a large number of detections (e.g. SWAMS for SEIO pygmy blue whales and MAD for SWIO pygmy blue whales). The correlation was smaller or non-significant at less frequented sites (e.g. WKER and NCRO for SEIO pygmy blue whales and NEAMS for SWIO pygmy blue whales). The only exceptions were at NEAMS, a site with consistent SEIO pygmy blue whale detections, and at NCRO, a site with consistent SWIO pygmy blue whale detections.

Table 3

Pearson correlation coefficients for each pair of years. X means that no data were available and * means that the correlation was not significant and therefore that the null hypothesis could not be rejected ($p > 0.05$).

		MAD	NEAMS	SSEIR	NCRO/S-SWIR	SWAMS	WKER
Antarctic blue whale	2010–2011	*	0.38	X	X	X	*
	2011–2012	0.37	0.43	X	*	X	*
	2012–2013	*	*	X	*	*	0.50
	2013–2014	0.28	*	X	*	*	0.57
	2014–2015	*	X	0.43	*	*	*
	2015–2016	0.29	X	0.40	*	*	*
	2016–2017	X	X	*	*	X	*
	2017–2018	X	*	*	0.31	X	*
SEIO pygmy blue whale	2010–2011	X	*	X	X	X	*
	2011–2012	X	*	X	X	X	*
	2012–2013	X	0.53	X	X	0.65	*
	2013–2014	X	*	X	X	0.50	*
	2014–2015	X	X	0.40	*	0.52	*
	2015–2016	X	X	0.41	*	*	*
	2016–2017	X	X	0.35	X	X	0.43
	2017–2018	X	0.33	*	*	X	*
SWIO pygmy blue whale	2010–2011	0.78	*	X	X	X	*
	2011–2012	0.49	*	X	*	X	*
	2012–2013	0.49	*	X	X	X	*
	2013–2014	0.81	*	X	X	0.56	0.56
	2014–2015	0.76	X	*	*	0.31	0.68
	2015–2016	0.83	X	0.69	*	0.59	0.31
	2016–2017	X	X	0.57	*	X	0.40
	2017–2018	X	0.90	0.71	0.66	X	*

Table 4

Spearman correlation coefficient by pair of populations. For a given site, a positive value means the two considered populations are jointly present, a negative value means that they are not present at the same times, an X means a lack of calls for one or both populations, and an asterisk (*) means that the correlation was not significant (i.e. the null hypothesis could not be rejected ($p > 0.05$)).

	ELAN	MAD	MAD-E	MAD-W	NEAMS	SSEIR	NCRO/S-SWIR	SWAMS	WKER
SEIO - SWIO populations	*	X	0.49	X	0.30	0.65	X	0.77	0.51
Antarctic - SWIO populations	*	0.11	-0.34	*	0.17	-0.24	-0.21	*	-0.33
Antarctic - SEIO populations	*	X	-0.37	X	0.40	-0.40	X	*	-0.23

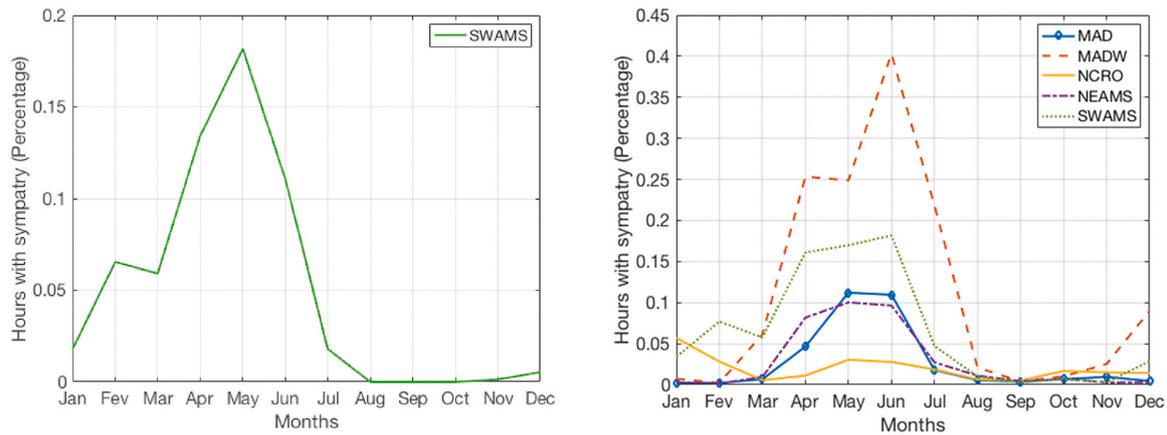


Fig. 5. Number of hours per month with sympatric detections of blue whale calls a) SEIO and SWIO pygmy blue whales b) Antarctic blue whales and SEIO or SWIO pygmy blue whales. The number of detections is normalized by the number of hours of recording available for each month, over the total duration of the recordings (from 2010 to 2018). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

3.3. Sympatry

Both pygmy and Antarctic blue whale calls occur at most of the OHASISBIO array sites. The western sites are mostly frequented by Antarctic and SWIO pygmy blue whales and the eastern sites by Antarctic blue whales and SEIO pygmy blue whales. The three acoustic populations are commonly recorded at NEAMS, SWAMS and WKER (Fig. 3). Fig. 4 shows that blue whales acoustic populations sometimes acoustically co-occurred. The results of the Spearman’s correlation tests are shown in Table 4. For the sites where both pygmy blue whales were recorded (MAD-E, NEAMS, SSEIR, SWAMS and WKER), Spearman’s correlations are positive. In other words, when the number of SWIO pygmy blue whale calls increases, the number of SEIO pygmy blue whale calls increases as well. The only exception is at ELAN, where the correlation is not significant. On the contrary, Antarctic blue whale seasonal presence is generally negatively correlated with the pygmy blue whale presence. Therefore, except at MAD and NEAMS, their acoustic presence does not match that of the pygmy blue whales.

For the sites where both pygmy blue whales were recorded (MAD-E, NEAMS, SSEIR, SWAMS and WKER), there was a positive monotonical correlation. In other words, when the number of SWIO pygmy blue whale calls increase, the number of SEIO pygmy blue whale calls tend to increase as well. The only exception is at ELAN, where the correlation is not significant. On the contrary, Antarctic blue whale seasonal presence often negatively correlated with the pygmy blue whale presence. Therefore, their acoustic presence is offset from that of the pygmy blue whale call types.

Fig. 5 shows the number of hours with acoustic co-occurrence either from both pygmy blue whales or from Antarctic blue whales and one pygmy blue whale population. We only show sites with at least 5% of hours with sympatry within any month of the year. For pygmy blue whales (Fig. 5 a), the only site that meets this condition is SWAMS, with

peak co-occurrence from March to June. For Antarctic and pygmy blue co-occurrence (Fig. 5), MAD-W is the site with the greatest co-occurrence, with 40% of hours in June. Other sites with acoustic sympatry include MAD, NCRO, NEAMS and SWAMS. The main period of co-occurrence is between April and June except at NCRO, where greatest co-occurrence happens in January.

4. Discussion

4.1. Using passive acoustics to monitor blue whale populations

Passive acoustic monitoring with a wide network of hydrophones is a very effective approach to detect the presence of blue whales, as in this study. However it cannot be used to determine the abundance of whales in the vicinity of a hydrophone based on the number of detected calls. Indeed, several factors can influence the number of blue whale calls present in the data. Some of them are dependent on blue whale behavior (e.g. when, where and why they sing and how song structure changes) and others are dependent on sound propagation dynamics that affect the detection ranges of calls.

For instance, a recent study found that the structure of SEIO pygmy blue whale songs shows variations (Joliffe et al., 2019). The usual 3-unit song was sometimes shortened by whales omitting one of the units. If the omitted unit is the one targeted by a detector, then the relationship between the number of call detections and the density of whales in the vicinity of the hydrophone may change. This phenomenon has not been studied in other blue whale populations. In the OHASISBIO data, it is rare to observe the full 3-unit SEIO pygmy blue whale vocalisation (due to loud background noise and only the loudest unit is used for the automated detection (see Fig. 1)). Variations in song structure are therefore less straightforward to observe, but they may explain some of the inter-annual variations in the number of detections.

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

Acoustic detection ranges of blue whales are way larger than visual observation ranges. The estimated detection range for Antarctic blue whale calls is about 200 km (Širović et al., 2007; Samaran et al., 2010b; Thomisch et al., 2016). Pygmy blue whale call detection range is not well known. There is a tradeoff in that the lower background noise in the higher frequencies used by pygmy blue whales suggests that their vocalisations could propagate further than Antarctic blue whale ones. However, higher pitched sounds tend to propagate less far and it seems that pygmy blue whale calls have lower source levels than Antarctic blue whale calls (Samaran et al., 2010b). Therefore, their detection range is probably smaller than 200 km (Samaran et al., 2010a). Moreover, variability in the annual or seasonal number of calls can arise from seasonal changes in the sound propagation range. This range relies on many environmental parameters (e.g. the sound speed, the bathymetry and the background noise) that can evolve over time. For example, Thomisch et al. (2019) found that depending on the season, the propagation range of blue whale calls can vary from 200 km to 500 km. A greater propagation range increases the hydrophone detection area. This may result in an increase in the number of call detections that is not reflective of a true increase in blue whale numbers in the vicinity of the hydrophone. Computing seasonal detection range variations for our many sites is beyond the scope of this paper. However we assume that our detection patterns are representative of a regional blue whale presence around the hydrophones rather than a very local one.

4.2. Spatial distribution of blue whale populations in the southwest Indian Ocean

Ovarian data collected from 1934 to 1972 suggested that 60°S was the northern limit of Antarctic blue whale distribution (Branch et al., 2009). However, since 2010, acoustic surveys have demonstrated that Antarctic blue whales regularly occur in subantarctic and subtropical latitudes of the Indian Ocean (Stafford et al., 2004; Samaran et al., 2010a, 2013; Leroy et al., 2016), the Pacific Ocean (Stafford et al., 1999, 2004; Buchan et al., 2018) and even in the equatorial Atlantic Ocean (Samaran et al., 2019). Overall, the Antarctic blue whale acoustic presence results presented here match those reported in Leroy et al. (2016) for MAD, SSEIR, NEAMS, SWAMS, NCRO and WKER sites from 2010 to 2015. A large number of calls detected annually at the additional sites included here confirms the importance of the subtropical and southern Indian Ocean for this sub-species. The most consistently visited site by Antarctic blue whales seems to be MAD-W, suggesting either that this region concentrates many individuals or that their calling rate is higher in this vicinity. Sites MAD-E and RTJ seem less occupied, implying that they may define the northern limits of their distribution in the Indian Ocean. No Antarctic blue whale calls were recorded at RAMA, but only two years of data were available for this site, so it may occasionally be frequented by Antarctic blue whales. For now, the northern limit of their distribution in the Indian Ocean is thus thought to be located around the Diego Garcia archipelago, 7.6°S (Stafford et al., 2004). The longer time series confirms the observation of Leroy et al. (2016) that SSEIR, NCRO and its neighboring S-SWIR site are less used by vocal Antarctic blue whales than the other sites. These regions could be suboptimal for Antarctic blue whales or their call rate is lower there for an unknown reason. This is the first time that Antarctic blue whale acoustic presence is reported at ELAN, the southernmost hydrophone site. It provides additional evidence of Antarctic blue whale presence around the entire Southern Ocean (Širović et al., 2004, 2009; Gedamke and Robinson, 2010; Miller et al., 2015; Thomisch et al., 2016).

SEIO pygmy blue whale calls have been previously recorded off

southern (Gill, 2002; Gavrilov et al., 2011) and western Australia (McCauley et al., 2000, 2018; Stafford et al., 2011; Balcazar et al., 2015). The eastern limit of their distribution is the Bass strait (Balcazar et al., 2015; McCauley et al., 2018) with the exception of a few extralimital detections near the Juan Fernandez Islands in the SE Pacific Ocean (Buchan et al., 2020). Satellite telemetry has revealed SEIO pygmy blue whale distribution along the western Australian coast as far north as Indonesian waters (Double et al., 2014). In the eastern part of the Indian Ocean, SEIO pygmy blue whale calls were recorded as far west as the Crozet archipelago (Samaran et al., 2010a). Our results support the broad scale study in Leroy et al. (2018b) where a strong chorus is observed at 70 Hz at the easternmost sites, SWAMS, SSEIR and to a lesser extent at NEAMS. SEIO pygmy blue whale calls are consistently recorded at SWAMS, NEAMS and less so at WKER. Even fewer calls are detected at SSEIR, suggesting that SEIO pygmy blue whales are uncommon at SSEIR. Therefore, the western limit of their general distribution could be located between the sites ELAN/WKER/SSEIR and NEAMS/SWAMS. SEIO pygmy blue whales clearly range far from the west coast of Australia based on the data presented here and in previous studies (Samaran et al., 2010a, 2013; Stafford et al., 2011; Leroy et al., 2018b). Like for most pygmy blue whale populations globally, breeding grounds are largely unknown. However, SEIO pygmy blue whale calls were neither detected at Diego Garcia (Stafford et al., 2011), nor at RAMA. If the calls are only a mating display it would be unlikely that the northern Indian Ocean is a breeding ground for this population.

Recent analysis using the Chorus to Noise Ratio (CNR) metric revealed that SWIO pygmy blue whale population is distributed at least from 26°S (Leroy et al., 2018b; Dréo et al., 2018) to 46°S and 52°E to 74°E. Overall, it is clear that SWIO pygmy blue whale acoustic presence is stronger in the western Indian Ocean (sites MAD, MAD-W, NCRO) and diminishes when going to the east towards SSEIR and SWAMS sites. The eastern boundary of their distribution may be located at the eastern limit of our hydrophone array, as suggested by Leroy et al. (2016). To the north, a few SWIO pygmy blue whale calls were detected at NEAMS and Diego Garcia (Stafford et al., 2011), which could be the northern limit of SWIO pygmy blue whale distribution. Only chorus was detected at RTJ. Longer time series at RTJ and Diego Garcia could refine the northern limit of this pygmy blue whale population distribution. Consistent detection of SWIO pygmy blue whale calls at WKER and also on the single year of data at ELAN, confirms that they also occupy the subantarctic Indian Ocean as previously observed by (Gedamke and Robinson, 2010).

4.3. Seasonal distribution of blue whale populations in the southwest Indian Ocean

The analysis of the first years of the OHASISBIO recordings demonstrated that Antarctic blue whale acoustic distribution is seasonal in the southwest Indian Ocean (Samaran et al., 2010a, 2013; Leroy et al., 2016, 2018b). The monthly seasonal pattern is stable over the years but differs among sites, with more detections during autumn and spring (March to May and September to November) at the subantarctic locations and more detections during winter (June to August) at subtropical locations, suggesting the presence of migration routes and of a wintering, possibly breeding, area at northern latitudes (Leroy et al., 2016). Our observations confirm these findings at a finer and longer temporal scale (Fig. 4 and Table 3). Generally, the peak of detections occurs during the second part of the year (from March to December) at most of the sites, including the southernmost subantarctic site ELAN. This is complementary to the seasonal acoustic presence recorded in Antarctica (Širović et al., 2004,

2009; Thomisch et al., 2016), where the peak occurs during the first trimester of the year (January until March/April). This suggests a migration pattern from southern latitudes where they are heard from December to April to lower latitudes from April to November. However, acoustic presence nearly all year round at some subantarctic and subtropical locations (WKER, NCRO and SWAMS) is indicative of some animals not migrating every year (Thomisch et al., 2019).

This year-round acoustic presence is not observed for pygmy blue whales in the array and more broadly, in the Indian Ocean basin. To the west, SEIO pygmy blue whale calls are recorded as far east as the Crozet Archipelago in May and June. In the southwest Indian Ocean, their calls are recorded consistently, with a clear seasonal pattern from February until June, and no detections from July to January. Our results confirm that SEIO pygmy blue whale acoustic presence is highly seasonal in the Indian Ocean, between February and June at SSEIR and SWAMS and from April to June at NEAMS. SEIO pygmy blue whale calls were absent from our recordings from August through December. It is not clear yet whether they stop singing or dwell in a different area during this period, perhaps Indonesian waters, where their presence was revealed by satellite telemetry from July to September (Double et al., 2014).

Our results support the previous findings that SWIO pygmy blue whale acoustic presence is highly seasonal (April and/or May) in the northwest of the hydrophone array. They also provide more accurate information on the acoustic presence of SWIO pygmy blue whales further south. SWIO pygmy blue whale calls were detected from November until June or July at WKER and mostly from October until December at ELAN. Their presence at NCRO is bimodal with two peaks, the first from December to February and second from April to June. Similar detection patterns are reported north of the Mozambique channel (from May to July and from November to January) (Cerchio et al., 2018) and implies a possible double migration pattern. A first migration would occur from high latitudes (ELAN, WKER) in summer (December to February) to low latitudes in autumn or winter (MAD-W, MAD) then back again to higher latitudes in the middle of winter (June to August). The absence of call detections during austral spring (from August to October) might indicate a change in SWIO pygmy blue whale vocal behavior or a migratory corridor different from the one they use in autumn to go from south to north, for example along the eastern coast of South Africa (Branch et al., 2007). The second migration pattern would involve a migratory corridor located north of the Mozambique channel and frequented twice a year (from May to July and from November to January) (Cerchio et al., 2018). The absence of call from August until October both in the Mozambique channel (Cerchio et al., 2018), and in the OHASISBIO array suggest a migration in the northern Indian Ocean. However, there is no evidence of their presence in the north of the Indian Ocean during this period.

4.4. Long term and seasonal variability

Long-term monitoring of Antarctic blue whale acoustic presence did not reveal global trends in the number of calls recorded annually over time despite clear seasonal variations in number of detections. It is possible that some areas are more appealing to whales in certain years and attract more individuals than the previous years at the expense of other areas. However, Antarctic blue whale calls were detected every year at all sites, suggesting that they do not all abandon their wintering ground, even if the environmental conditions may not be optimal. Baleen whales were long thought to fast during migrations and at breeding grounds, nevertheless, the choice of wintering ground for blue whales appears driven by the presence of krill (Branch et al., 2007). Low,

or absence of, significant correlation between the weekly presence on two consecutive years emphasizes that Antarctic and pygmy blue whale movements likely rely primarily on environmental conditions. The obvious next step is to examine environmental variability during the same decade (via satellite derived data for sea surface temperature, chlorophyll A, upwelling index) to determine how the physical environment might drive changes in blue whale site frequentation in the array.

Like Antarctic blue whales, the annual numbers of SEIO pygmy blue whale call detections do not display a global trend in the array, but show inter-annual variations. However, the high correlation between weekly presence over two consecutive years at SWAMS suggests a stable seasonal presence. In the Bass Strait, the annual difference of blue whale call detections was hypothesized to be due to fluctuations in the seasonal occurrence of krill (Tripovich et al., 2015). McCauley et al. (2018) report a 4.3% growth rate for the population visiting the Bass Strait, computed from acoustic analysis of call rates. However, they emphasize that this value applies only to the proportion of the SEIO pygmy blue whale population that occupies this region and can not be generalized to the entire population.

SWIO pygmy blue whale calls are the only ones to show an increasing trend throughout the extent of their distribution in the array. This trend is also visible in the chorus (Leroy et al., 2018b), which could suggest a global population growth (McCauley et al., 2018). However, it is impossible to quantify the extent of this growth solely from acoustic data. The NCRO and SSEIR sites do not display similar tendencies. SWIO pygmy blue whale presence here might be more reliant on environmental drivers than elsewhere as suggested for SEIO pygmy blue whales (Tripovich et al., 2015; Garcia-Rojas et al., 2018). SWIO pygmy blue whale seasonal acoustic presence is very stable at MAD, suggesting that they might come here every year, no matter the changing environmental conditions. These observations might indicate that NCRO and SSEIR regions are feeding areas en route to the Madagascar basin, around the site MAD.

4.5. Use of the southern Indian Ocean by multiple blue whale populations

Antarctic blue whale calls are present year-round in the southern Indian Ocean, but with peaks during winter and spring (from June to November) whereas SWIO and SEIO pygmy blue whales are heard seasonally mostly during summer, autumn and early winter (from January to June). The negative correlation between Antarctic and pygmy blue whale seasonal presence confirms the complementary use of the Indian Ocean by the two subspecies. Moreover, each seems to have different migratory strategies. Antarctic blue whales may not all migrate south annually as indicated by their year-round presence at subantarctic locations (Leroy et al., 2016; Thomisch et al., 2019). In contrast, highly seasonal acoustic presence and absence indicates a clear migration pattern for pygmy blue whales. Such differences in geographic and seasonal occupancy of the southern Indian Ocean by Antarctic and pygmy blue whales could reflect prey preference, different habitat use (i.e. breeding or feeding), but also very different life history strategies between a highly mobile sub-species (Antarctic blue whales) and a sub-species that is largely resident to the Indian Ocean (pygmy blue whales).

Productive Antarctic waters are the main Antarctic blue whale feeding grounds. This sub-species feeds mainly on large Antarctic krill (*Euphausia superba*) (Kawamura, 1980; Miller et al., 2019). Antarctic blue whale migration is guided by the seasonal presence of krill in summer in high latitudes. Presumably, a part of the population remains

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

year-round at lower latitudes (Thomisch et al., 2019).

Such a partial migration to the Antarctic feeding ground may be driven by the year-round availability of prey in the subantarctic and subtropical Indian Ocean. The SEIO pygmy blue whale population has been observed feeding on *Nyctiphanes australis* south of Australia during autumn (Gill, 2002). SWIO pygmy blue whale feeding grounds are not precisely known, but stomach contents showed that around Crozet and Kerguelen islands they ate mainly *Euphausia frigida* and *E. vallentini* (Nemoto, 1962). Their diet seems to shift in South African waters to *E. recurva* or *E. diomedea* (Kawamura, 1980). These differences in diet might be due to geographic availability of prey.

SWAMS is the site with the greatest number of calls from the three acoustic populations studied here. Co-occurrence of Antarctic and SWIO pygmy blue whales happens mostly at the western sites (MAD, MAD-E, MAD-W, NCRO) whereas co-occurrence of Antarctic blue whales and SEIO pygmy blue whales mostly occurs to the east (SWAMS, NEAMS) (Fig. 5). Hourly acoustic co-occurrence does not necessarily mean that the vocalizing whales could hear each other, as one could be located at one limit of the hydrophone detection range and another one at the opposite limit, for instance. However, it indicates that a relatively small area was occupied by two different blue whale acoustic populations. It is therefore an indicator of a region of high interest for blue whales. Assuming that SEIO and SWIO pygmy blue whales both breed during winter, they might all use the northern Indian Ocean as a common breeding ground with Antarctic blue whales. Attard et al. (2012) reported a case of hybridization between an Antarctic blue whale and a pygmy blue whale from a whale biopsied off Antarctica. The acoustic co-occurrence during late autumn and beginning of winter (April to June) in the northern Indian Ocean could indicate potential co-breeding grounds. MAD-W could be a candidate breeding ground for both Antarctic blue whales and SWIO pygmy blue whales, and NEAMS for both Antarctic blue whales and SEIO pygmy blue whales. Neither pygmy blue whale population appears to co-occur at any northern site of the array (MAD, NEAMS), suggesting that they might have separate breeding grounds. However, sympatry of feeding SEIO pygmy blue whales and migrating or breeding Antarctic blue whales during autumn (March to May) south of Australia (Tripovich et al., 2015) suggest that acoustic co-occurrence might also indicate regions used for two different purposes by different acoustic populations of blue whales. Clearly, while passive acoustic monitoring has provided unprecedented information about the seasonal and geographic occurrence of multiple acoustic populations of blue whales in the southern Indian Ocean, it is only through interdisciplinary studies that include visual observations, that we will fully understand the ecology of Indian Ocean blue whales.

5. Conclusion

This study documents the presence of three blue whale acoustic populations for nearly a decade in the southern Indian Ocean. Its results are based on a long and continuous time series and on the application of a single algorithm for the detection of the different calls. These results support the spatial and seasonal distribution previously depicted in this region and the additional years and recording locations refine these previous findings, both temporally and geographically. What is immediately clear from the data is that Antarctic and pygmy blue whales use

the southern Indian Ocean very differently. The former is acoustically recorded almost year-round whereas the latter are recorded only seasonally. Moreover, Antarctic blue whale migration is highly variable from one year to the next while pygmy blue whale seasonality appears relatively stable. Antarctic and pygmy blue whales co-occur, especially in the north of the OHASISBIO array. SEIO and SWIO pygmy blue whales have a similar seasonality in the southern Indian Ocean, but their distribution only overlaps slightly around SWAMS, where they mostly co-occur mostly from April to June.

The next steps to better understand how blue whales use the southern Indian Ocean are multiple. First, additional recording locations could be established, especially along the eastern African coast for SWIO pygmy blue whales and between the OHASISBIO hydrophone array and Australia for SEIO pygmy blue whales. This would refine the limit of distribution and perhaps complete our knowledge about pygmy blue whale migration routes. Second, for all subspecies, additional behavioral information is needed to better understand in which context they produce calls. Finally, comparing seasonal presence, behavior and environmental data would be useful to define preferential Antarctic and pygmy blue whale habitats in the southern Indian Ocean.

CRedit authorship contribution statement

Maëlle Torterotot: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Visualization, Funding acquisition. **Flore Samaran:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing - review & editing, Funding acquisition. **Kathleen M. Stafford:** Conceptualization, Investigation, Writing - review & editing. **Jean-Yves Royer:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing - review & editing, Project administration, Funding acquisition.

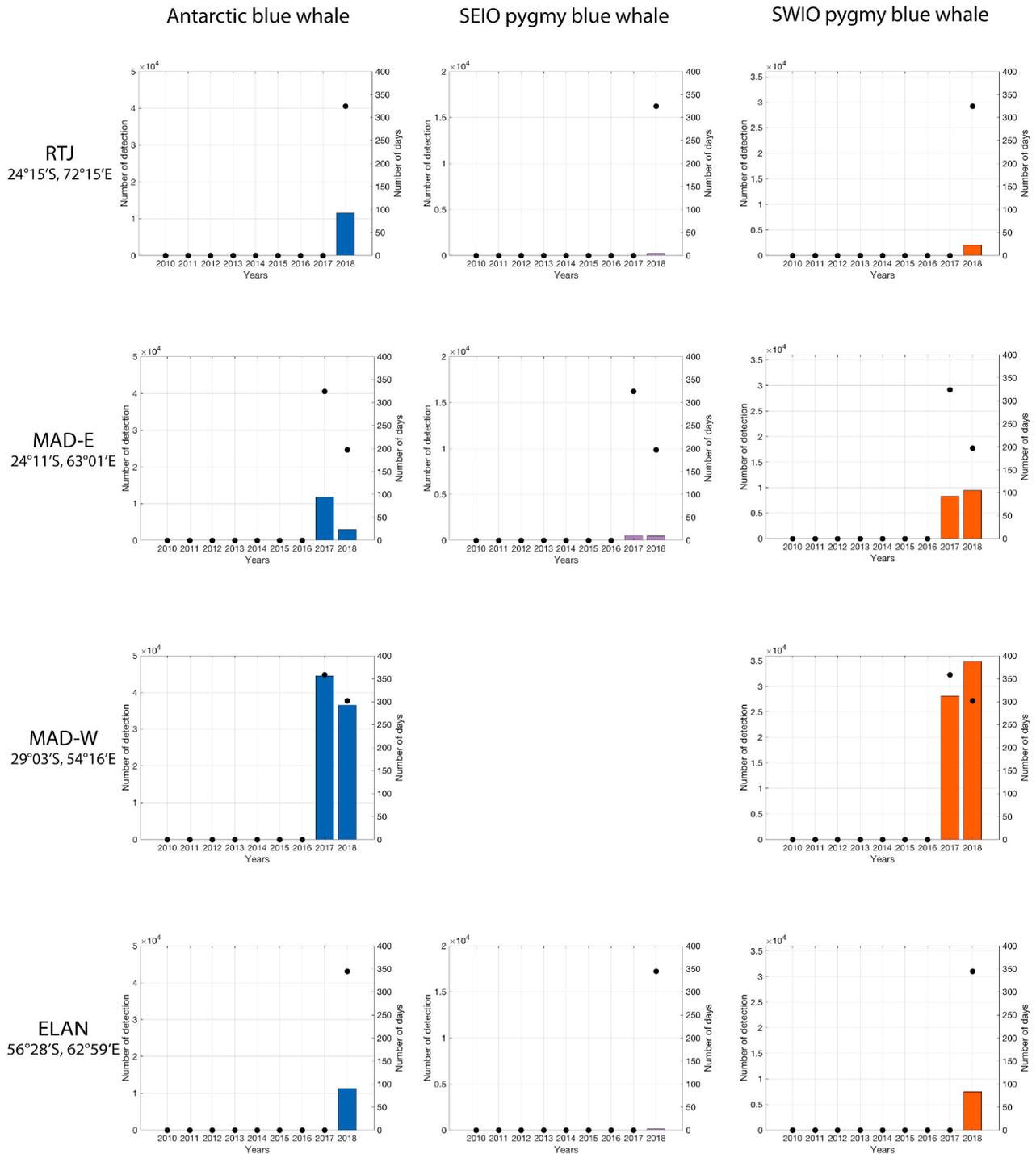
Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

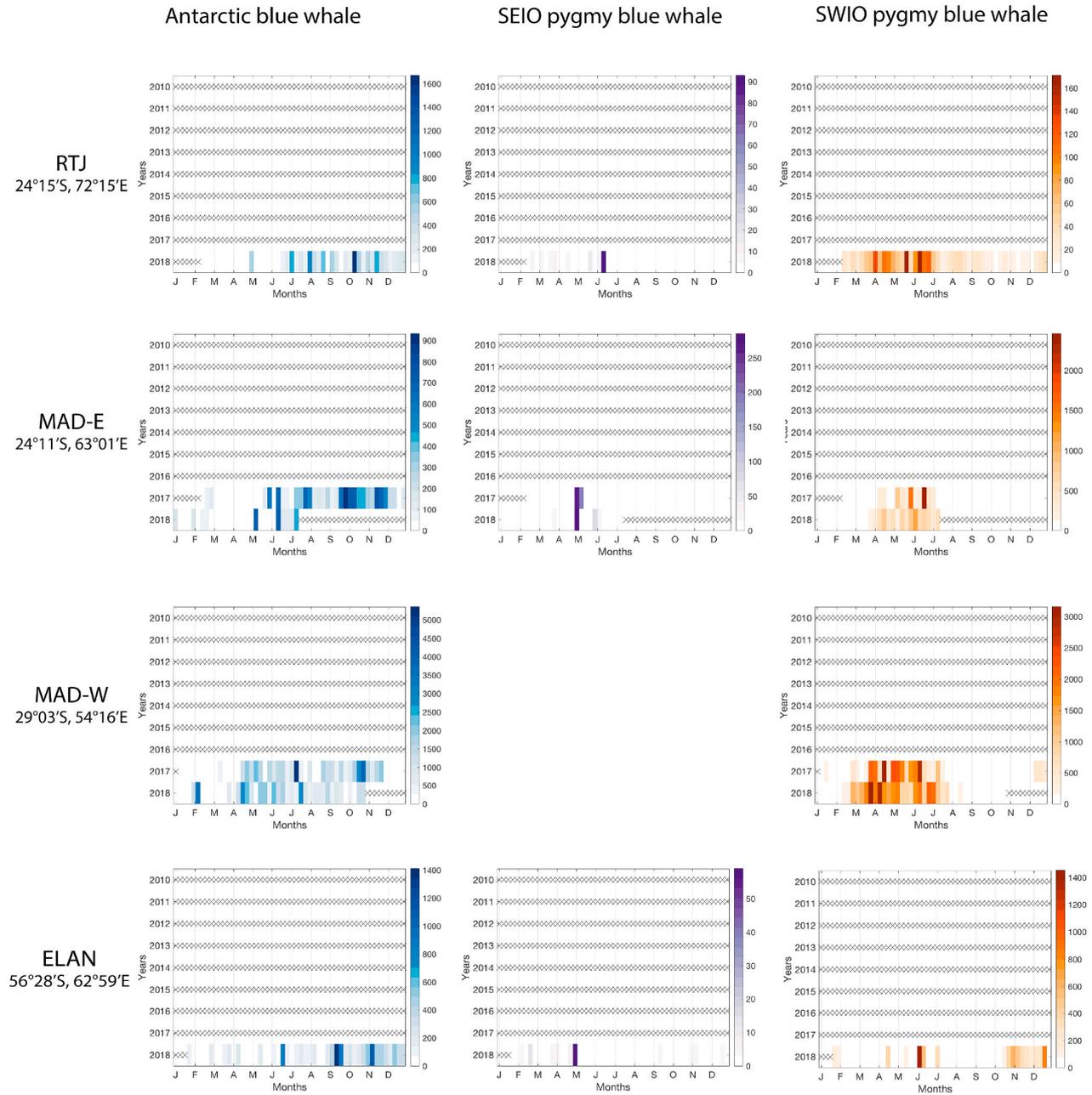
The authors wish to thank the captains and crews of RV Marion Dufresne for the successful deployments and recoveries of the instruments of the OHASISBIO array. Cruises were funded by the French Polar Institute and the French Oceanographic Fleet, with additional support from INSU-CNRS. M.T. was supported by a Ph.D. fellowship from the University of Brest. Her visit to K.M.S. was supported by a grant from the ISblue project, Interdisciplinary graduate school for a blue planet (ANR-17-EURE-0015), a project of the French Government program "Investissements d'Avenir". The authors thank Angélique Drémeau for her precious advice on statistical analysis. The contribution of Mickaël Beauverger at LGO in the preparation and realization of the cruise is greatly appreciated. Finally, the authors would like to acknowledge the two anonymous reviewers for their precious comments that greatly helped to improve this paper.

Appendix 1. Number of detected calls per year. Each row corresponds to a different site and each column to a different call type. Black dots represent the number of days of recording for each year. No SEIO pygmy blue whale calls were recorded at MAD-W, hence the absence of figure



3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

Appendix 2. Blue whale weekly acoustic presence. Each row corresponds to a recording site and each column to a blue whale call type. Each graph shows the density of calls per week (color intensity) for every month (x-axis) of the year in the y-axis. Note that the color scale is different for every graph. Weeks with fewer than 6 days of recordings are shown by X. Seasons are shown below the x-axis in different colors (summer: green, fall: orange, winter: blue, spring: pink). No SEIO pygmy blue whale calls were recorded at MAD-W, hence the absence of figure



References

Attard, C.R.M., Beheregaray, L.B., Jenner, K.C.S., Gill, P.C., Jenner, M.-n., Morrice, M.G., 2012. Hybridization of southern Hemisphere blue whale subspecies and a sympatric area off Antarctica : impacts of whaling or climate change ? *Mol. Ecol.* 21, 5715–5727.

Balcazar, N.E., Tripovich, J.S., Klinck, H., Nieuirk, 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. *J. Mammal.* 96 (6), 1184–1193.

Branch, T.A., Mikhalev, Y.A., Kato, H., 2009. Separating pygmy and Antarctic blue whales using long-forgotten ovarian data. *Mar. Mamm. Sci.* 25 (October), 833–854.

Branch, T.A., Stafford, K.M., Palacios, D.M., Allison, C., Bannister, J.L., Burton, C., Cabrera, E., Carlson, C.A., Galletti Vernazzani, B., Gill, P.C., Hucke-Gaete, R.,

- Jenner, K.C.S., Jenner, M.N., Matsuoka, K., Mikhalev, Y.A., Miyashita, T., Morrice, M.G., Nishiwaki, S., Sturrock, V.J., Tormosov, D., Anderson, R.C., Baker, A. N., Best, P.B., Borsa, P., Brownell, R.L., Childerhouse, S., Findlay, K.P., Gerrodette, T., Ilangakoon, A.D., Joergensen, M., Kahn, B., Ljungblad, D.K., Maughan, B., McCauley, R.D., McKay, S., Norris, T.F., Rankin, S., Samaran, F., Thiele, D., Van Waerebeek, K., Warneke, R.M., 2007. Past and present distribution, densities and movements of blue whales (*Balaenoptera musculus*) in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean. *Mamm Rev.* 37 (2), 116–175.
- Buchan, S.J., Balcazar-Cabrera, N., Stafford, K.M., 2020. Seasonal acoustic presence of blue, fin, and minke whales off the Juan Fernández archipelago, Chile (2007–2016). *Mar. Biodivers.* 50 (5), 1–10.
- Buchan, S.J., Huckle-Gaete, R., Stafford, K.M., Clark, C.W., 2018. Occasional acoustic presence of Antarctic blue whales on a feeding ground in southern Chile. *Mar. Mamm. Sci.* 34 (January), 220–228.
- Cerchio, S., Rasoloarijao, T., Cholewiak, D.M., 2018. Acoustic monitoring of blue whales (*Balaenoptera musculus*) and other baleen whales in the Mozambique Channel off the northwest coast of Madagascar (SC/67B/SH/14). Technical report. Int. Whaling Comm. Scientific Committee 1–13.
- Clark, C.W., Ellison, W.T., 2004. Potential use of low-frequency sounds by baleen whales for probing the environment: evidence from models and empirical measurements. *Echolocation Bats Dolphins* 564–582.
- Cooke, J., 2019. *Balaenoptera Musculus*, (Errata Version Published in 2019). Technical Report. The IUCN Red List of Threatened Species, 2018.
- Cummings, W.C., Thompson, P.O., 1971. Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*. *J. Acoust. Soc. Am.* 50 (4B), 1193.
- d'Eu, J.-F., Royer, J.-Y., Perrot, J., 2012. Long-term autonomous hydrophones for large-scale hydroacoustic monitoring of the oceans. In: 2012 Oceans-Yeosu. IEEE, pp. 1–6.
- Double, M.C., Andrews-Goff, V., Jenner, K.C.S., Jenner, M.N., Laverick, S.M., Branch, T. A., Gales, N.J., 2014. Migratory movements of pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) between Australia and Indonesia as revealed by satellite telemetry. *PLoS One* 9 (4), 1–11.
- Dréo, R., Bouffaut, L., Leroy, E.C., Barroul, G., Samaran, F., 2018. Baleen whale distribution and seasonal occurrence revealed by an ocean bottom seismometer network in the Western Indian Ocean. In: *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*.
- García-Rojas, M.I., Jenner, K.C.S., Gill, P.C., Jenner, M.N.M., Sutton, A.L., McCauley, R. D., 2018. Environmental evidence for a pygmy blue whale aggregation area in the Subtropical Convergence Zone south of Australia. *Mar. Mamm. Sci.* 1–23.
- Gavrilov, A.N., McCauley, R.D., Gedamke, J., 2012. Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of Antarctic blue whales. *J. Acoust. Soc. Am.* 131 (6), 4476–4480.
- Gavrilov, A.N., McCauley, R.D., Salgado-Kent, C., Tripovich, J.S., Burton, C., 2011. Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time. *J. Acoust. Soc. Am.* 130 (6), 3651–3660.
- Gedamke, J., Robinson, S.M., 2010. Acoustic survey for marine mammal occurrence and distribution off East Antarctica (30–80°E) in January–February 2006. *Deep-Sea Res. Part II* 57 (9–10), 968–981.
- Gill, P.C., 2002. A blue whale (*Balaenoptera musculus*) feeding ground in a southern Australian coastal upwelling zone. *J. Cetacean Res. Manag.* 4 (2), 179–184.
- Guilment, T., Socheleau, F.-X., Pastor, D., Vallez, S., 2018. Sparse representation-based classification of mysticete calls. *J. Acoust. Soc. Am.* 144 (3), 1550–1563.
- Harmer, S.F., 1931. Southern whaling. *Proc. Linn. Soc. Lond.* 142, 85–163.
- Ichihara, T., 1966. The pygmy blue whale, *Balaenoptera musculus brevicauda*, a new subspecies from the antarctic. *Whales Dolphins Porpoises* 79–111.
- IWC, 1980. Chairman's report of the thirty-first annual meeting. *Rep. Int. Whal. Comm.* 30, 25–41.
- Jolliffe, C.D., McCauley, R.D., Gavrilov, A.N., Jenner, K.C.S., Jenner, M.-N.M., Duncan, A. J., 2019. Song variation of the south eastern Indian Ocean pygmy blue whale population in the perth canyon , western Australia. *PLoS One* 1–26.
- Kawamura, A., 1980. A review of food of balaenopterid whales. *Sci. Rep. Whales Res. Inst* 32, 155–197.
- Kellogg, R., 1929. *What Is Known of the Migrations of Some of the Whalebone Whales*. US Government Printing Office.
- LeDuc, R., Dizon, a.G., Goto, M., Pastene, L., Kato, H., Nishiwaki, C., LeDuc, C., Brownell, R., 2007. Patterns of genetic variation in Southern Hemisphere blue whales and the use of assignment test to detect mixing on the feeding grounds. *J. Cetacean Res. Manag.* 9, 73–80.
- Leroy, E.C., Royer, J.-Y., Bonnel, J., Samaran, F., 2018a. Long-term and seasonal changes of large whale call frequency in the Southern Indian Ocean. *J. Geophys. Res.: Oceans* 123, 1–13.
- 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., Stafford, K.M., Bonnel, J., Royer, J.-y., 2018b. Broad-scale study of the seasonal and geographic occurrence of blue and fin whales in the Southern Indian Ocean. *Endanger. Species Res.* 37, 289–300.
- Lewis, L.A., Calambokidis, J., Stimpert, A.K., Fahlbusch, J., Friedlaender, A.S., McKenna, M.F., Mesnick, S.L., Oleson, E.M., Southall, B.L., Szesciorcka, A.R., Širović, A., 2018. Context-dependent variability in blue whale acoustic behaviour. *Royal Soc. Open Sci.* 5 (8), 180241.
- Ljungblad, D., 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. *Rep. Int. Whal. Comm.* 48, 439–442.
- Lurton, X., 2002. *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Springer Science & Business Media.
- Mackintosh, N., 1966. The distribution of southern blue and fin whales. *Whales Dolphins Porpoises* 125–144.
- Mackintosh, N.A., 1942. The southern stocks of whalebone whales. *Discov. Rep.* 22, 197–300.
- McCauley, R.D., Gavrilov, A.N., Jolli, C.D., Ward, R., Gill, P.C., 2018. Pygmy blue and Antarctic blue whale presence, distribution and population parameters in southern Australia based on passive acoustics. *Deep-Sea Res. Part II* 158, 154–168. October 2017.
- 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. *Austral. Acoust. Soc. Conf.* 1–6, 1993(November).
- McDonald, M.A., Calambokidis, J., Teranishi, A.M., Hildebrand, J.A., 2001. The acoustic calls of blue whales off California with gender data. *J. Acoust. Soc. Am.* 109 (4), 1728–1735.
- McDonald, M.A., Mesnick, S.L., Hildebrand, J.A., 2006. Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: using song to identify populations. *J. Cetacean Res. Manag.* 8 (1), 55–65.
- 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. *Endanger. Species Res.* 26 (3), 257–269.
- Miller, E.J., Potts, J.M., Cox, M.J., Miller, B.S., Calderan, S., Leaper, R., Olson, P.A., 2019. The characteristics of krill swarms in relation to aggregating Antarctic blue whales. *Sci. Rep.* 1–13.
- Nemoto, T., 1962. Food of baleen whales collected in recent Japanese antarctic whaling expeditions. *Sci. Rep. Whales Res. Inst* 16, 89–103.
- Oleson, E.M., Calambokidis, J., Burgess, W.C., McDonald, M.A., Leduc, C.A., Hildebrand, J.A., 2007. Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 330 (January), 269–284.
- Royer, J.-Y., 2009. OHASISBIO - Hydroacoustic Observatory for the Seismicity and Biodiversity in the Indian Ocean. Technical report. Université de Bretagne Occidentale.
- Samaran, F., Adam, O., Guinet, C., 2010a. Discovery of a mid-latitude sympatric area for two Southern Hemisphere blue whale subspecies. *Endanger. Species Res.* 12 (2), 157–165.
- Samaran, F., Berne, A., Leroy, E.C., Moreira, S., Stafford, K.M., Maia, M., Royer, J.-Y., 2019. Antarctic blue whales (*Balaenoptera musculus intermedia*) recorded at the Equator in the Atlantic Ocean. *Mar. Mamm. Sci.* 35 (2), 641–648.
- Samaran, F., Guinet, C., Adam, O., Motsch, J.-F., Cansi, Y., 2010b. Source level estimation of two blue whale subspecies in southwestern Indian Ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* 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).
- Shaw, A.K., Levin, S.A., 2011. To breed or not to breed: a model of partial migration. *Oikos* 120 (12), 1871–1879.
- Širović, A., Bassett, H.R., Johnson, S.C., Wiggins, S.M., Hildebrand, J.A., 2014. Bryde's whale calls recorded in the Gulf of Mexico. *Mar. Mamm. Sci.* 30 (1), 399–409.
- Širović, A., Hildebrand, J.A., Wiggins, S.M., 2007. Blue and fin whale call source levels and propagation range in the Southern Ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* 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 Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 51 (17–19), 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. *Mar. Mamm. Sci.* 25, 125–136. January.
- Socheleau, F.-X., Samaran, F., 2018. Detection of Mysticete Calls: a Sparse Representation-Based Approach. Technical report. Institut Mines Télécom Atlantique.
- Stafford, K.M., Bohnenstiel, 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 Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 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. *Mar. Mamm. Sci.* 27 (4), 828–840.
- Stafford, K.M., Moore, S.E., 2005. Atypical calling by a blue whale in the Gulf of Alaska (L). *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (5), 2724–2727.
- Stafford, K.M., Nieuwkerk, S.L., Fox, C.G., 1999. Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical Pacific. *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (6), 3687–3698.
- Stafford, K.M., Nieuwkerk, S.L., Fox, C.G., 2001. Geographic and seasonal variation of blue whale calls in the North Pacific. *J. Cetacean Res. Manag.* 3 (1), 65–76.
- Thomisch, K., Boebel, O., Bachmann, J., Filun, D., Neumann, S., Spiesecke, S., Opzeeland, I.V., 2019. Temporal patterns in the acoustic presence of baleen whale species in a presumed breeding area off Namibia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 620 (June), 201–214.
- 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. *Endanger. Species Res.* 30 (1), 239–253.

3.2 Distribution of blue whale populations in the southern Indian Ocean based on a decade of acoustic monitoring

M. Torterotot et al.

Deep-Sea Research Part II 179 (2020) 104874

Torterotot, M., Royer, J.-Y., Samaran, F., 2019. Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the Southern Indian Ocean. In: IEEE OCEANS. IEEE, pp. 1–10.

Tripovich, J.S., Klinck, H., Nieukirk, S.L., Adams, T., Mellinger, D.K., Balcazar, N.E., Klinck, K., Hall, E.J.S., Rogers, T.L., 2015. Temporal segregation of the Australian

and antarctic blue whale call types (*balaenoptera musculus* spp.). J. Mammal. 96 (3), 603–610.

Visser, F., Hartman, K.L., Pierce, G.J., Valavanis, V.D., Huisman, J., 2011. Timing of migratory baleen whales at the Azores in relation to the North Atlantic spring bloom. Mar. Ecol. Prog. Ser. 440, 267–279. October.

3.3 Discussion

L'utilisation de l'acoustique passive dans le sud-ouest de l'océan Indien a précisé les distributions géographiques et saisonnières de trois populations de baleines bleues. Les deux populations de baleines bleues pygmées sont géographiquement séparées, l'une détectées à l'est du réseau et l'autre à l'ouest. Les distributions de ces deux populations durant le printemps austral (de septembre à novembre) restent cependant méconnues. Des enregistrements hydro-acoustiques complémentaires dans la zone d'étude et au-delà pourraient encore améliorer notre compréhension sur la répartition de ces baleines, notamment aux périodes où elles sont absentes des enregistrements existants. Par exemple, des mouillages supplémentaires au sud de l'Afrique, dans le canal du Mozambique permettraient d'affiner les aires de distribution des baleines bleues pygmées de Madagascar, qui sont totalement absentes de l'océan Indien austral durant le printemps austral (septembre à novembre). Des mouillages déployés à l'est des îles Amsterdam et Saint-Paul et le long des côtes d'Asie du sud-est et de l'Australie, permettraient d'affiner les aires de distribution des baleines bleues pygmées d'Australie, qui sont également totalement absente de l'océan Indien austral durant le printemps austral (septembre à novembre). En outre, analyser les deux dernières décennies d'enregistrements collectés à la station du CTBTO à Diego Garcia, située au nord du réseau OHASISBIO permettrait de compléter les observations faites en 2002 et 2003 (Stafford et al., 2010) et de mieux définir les limites de répartition au nord de l'océan Indien.

Les baleines bleues Antarctique occupent tout l'océan Indien austral durant la majorité de l'année. Contrairement aux populations de pygmées, leur patron de présence change d'une année sur l'autre, mais dans une aire de répartition stable au cours du temps. Sans observatoire acoustique long-terme, ce genre d'observation nous échapperait. De même, dans l'Atlantique nord, 10 ans d'observations acoustiques (2004-2014) ont permis de documenter le changement de distribution des baleines franches, une espèce très menacée (Davis et al., 2017). Ces études soulignent la nécessité de maintenir des observatoire de surveillance acoustique long terme, surtout dans des régions isolées et difficiles d'accès comme l'océan Indien austral. De telles études long-terme ont aussi permis de comparer les aires de distributions des baleines bleues avec certaines données environnementales telles que le taux de chlorophyll A ou la température de surface, et de définir les facteurs qui influencent la présence des baleines bleues (Szesciorka et al., 2020). Dans l'océan Indien austral, comparer des données environnementales mesurées par satellites ou *in situ*, notamment lors des missions océanographiques du R/V Marion Dufresne qui longent les sites d'écoute, avec les distributions des populations de baleines bleues permettrait de caractériser les environnements favorables à leur présence. En outre, examiner les variations saisonnières et spatiales d'une année à l'autre de ces paramètres environnementaux pourrait expliquer les patrons de présence instables des baleines bleues Antarctique.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons à la présence des vocalisations non-stéréotypées de baleines bleues dans les enregistrements (D-calls). Ce nouvel indicateur de présence des baleines bleues apporte aussi des informations complémentaires sur leur comportement acoustique dans l’océan Indien et donc sur leur usage de cet habitat.

Chapitre 4

Présence saisonnière et spatiale des vocalisations non-stéréotypées de baleines bleues dans l’océan Indien austral

4.1 Introduction

Les chants des baleines bleues ont souvent été utilisés comme indicateurs de présence des différentes sous-espèces et populations. Les D-calls, vocalisations communes à tous les individus (mâles et femelles) et à toutes les populations, ont en revanche rarement été étudiés, et encore moins sur le long terme. L’une des raisons réside probablement dans leur forme temps/fréquence assez variable et similaire aux vocalisations d’autres mysticètes, qui les rend compliqués à détecter par des algorithmes automatiques. Des études, principalement menées dans le golfe de Californie, à l’aide de balises acoustiques fixées sur le dos des animaux, ont tout de même observé que ces vocalisations étaient émises dans des contextes sociaux d’alimentation (Oleson et al., 2007b; Akamatsu et al., 2015), mais aussi parfois de comportements agressifs (Schall et al., 2019). Analyser la présence de ces vocalisations dans les enregistrements long-terme OHASISBIO apportera donc un indicateur supplémentaire à la fois sur la présence des baleines bleues, mais aussi sur leur comportement.

Dans l’ouest de l’océan Indien, la présence de D-calls n’a été décrite qu’une seule fois, dans des données du CTBTO enregistrées à proximité de l’archipel de Crozet en 2003-2004 (Samaran et al., 2010a). Ces vocalisations ont été détectées toute l’année, et associées avec des chants de baleines bleues Antarctique de juin à décembre (hiver et prin-

temps austral) et avec des chants de baleines bleues pygmées de Madagascar de janvier à avril (automne austral).

Ce chapitre présente le premier suivi acoustique à long terme de la présence du D-call dans cette région. L'analyse est basée sur 9 ans d'enregistrements acoustiques continus à basse fréquence (2010-2018) sur tous les sites du réseau OHASISBIO. La technique de détection semi-automatique utilisée pour trouver les D-calls parmi ce vaste ensemble de données est présentée au chapitre 2. Les résultats de présence acoustique sont ensuite présentés et comparés aux patrons de présence des vocalisations stéréotypées. Cette étude complète le tableau de l'occupation des baleines bleues dans l'océan Indien et permet de mieux comprendre leur utilisation globale de cet habitat.

L'ensemble de ces résultats est présenté sous forme d'un article en cours de finalisation qui sera prochainement soumis à une revue scientifique.

4.2 Article en préparation

En résumé, les D-calls ont été détectés sur tous les sites du réseau, mais de façon plus importante dans les hautes latitudes, aux sites WKER et ELAN (46 °et 56 °S), proches des aires d'alimentation en Antarctique. Un changement dans la présence saisonnière en fonction de la latitude a aussi été observé, avec davantage de D-calls détectés pendant l'automne et l'hiver austral dans le nord et durant le printemps austral dans le sud, une saison productive due aux blooms phyto-planctoniques induits par la fonte de la calotte glaciaire. Ces observations soutiennent l'hypothèse que les D-calls sont produits pendant ou entre des comportements de recherche de nourriture comme observé au large de la Californie (Oleson et al., 2007b). La détection de D-calls en hiver dans des zones subtropicales (MAD, NEAMS, NCRO, SWAMS), indiquerait alors que les baleines bleues se nourrissent de façon opportuniste dans leurs zones d'hivernage, mais aussi lors de leur migration, un comportement déjà observé chez les baleines à bosse (Pinto de sa Alves et al., 2009; Gendron, 1993; Baraff et al., 1991). Cependant, les D-calls enregistrés dans des contextes sociaux autres que celui d'alimentation (Schall et al., 2019) indiqueraient que cette vocalisation est multi-fonction. La présence plus importante de D-calls dans le sud de l'océan Indien suggère alors simplement que plus d'interactions sociales de tous genres ont lieu dans cette région.

Sur la base de cette étude et de celle présentée au chapitre 3, il semble que le comportement acoustique des baleines bleues passe d'une émission de chants intensive et faible émission de D-calls dans le nord à une émission modérée de chants et une forte émission de D-calls dans le sud de l'océan Indien. Ce changement de comportement acoustique laisse penser que les régions sub-tropicales et sub-antarctiques sont utilisées à des fins

différentes, la première comme aire de reproduction et la seconde comme aire d'alimentation.

Long-term acoustic monitoring of non-stereotyped blue whale calls in the southern Indian Ocean

December 11, 2020

Corresponding author

Maëlle Torterotot, Laboratoire Géosciences Océan, Université de Brest, Brest, France,
maelle.torterotot@univ-brest.fr

Co-authors

Flore Samaran, Lab-STICC, ENSTA Bretagne, Brest, France

Jean-Yves Royer, Laboratoire Géosciences Océan, Université de Brest et CNRS, Brest, France

Keywords: Antarctic blue whale, pygmy blue whale, passive acoustic monitoring, D-calls, southern Indian Ocean

1 Abstract

Monitoring the presence of blue whale (*Balaenoptera musculus ssp*) stereotyped calls has been a widely used method to assess the different populations' distribution and movements over all the oceans. Blue whales also produce non-stereotyped vocalisations, or D-calls, emitted by all blue whale populations. This call type has been studied mainly in coastal waters, where it appears to be associated with feeding or social behaviors. Here, we monitored the presence of D-calls in long-term records from a widespread hydrophone array located in the southern Indian Ocean. Calls were detected using an automated method which required post-processing to eliminate false alarms, such as air-gun sounds. The remaining detections were manually checked to ensure that only D-calls were used in further analysis. D-calls were detected at all sites of the array, which extends from 24° S and 56° S, but the majority of the calls were detected at the two southernmost sites at 46 ° S and 56 ° S. We observed a latitudinal shift in their seasonal occurrence, with more D-calls detected in the north during austral autumn and winter and in the south during austral spring. The geographical occurrence of D-calls compared to that of songs indicates that blue whale acoustic behavior switches from a song-intensive and sparse-D-call emission in the north to song-moderate and more intensive D-call emissions in the south. These observations on the acoustic behavior of blue whales provide new insights about their use of the southern Indian ocean as habitat.

2 Intro

Extensive commercial whaling greatly depleted blue whale (*Balaenoptera musculus ssp*) populations, especially in the Southern Hemisphere, including the southern Indian Ocean (Rocha et al., 1982; Branch et al., 2007). Two blue whale sub-species occur in this region (Rice, 1998): the Antarctic blue whale (*B. m. intermedia*) and the pygmy blue whale (*B.m. breviceauda* (Ichihara, 1966)). They differ morphologically (Ichihara, 1966), genetically (LeDuc et al., 2007), and acoustically (Ljungblad et al., 1998; McDonald et al., 2006). Blue whales produce long, loud and low-frequency stereotyped phrases, repeated every few minutes to form songs (Cumplings and Thompson, 1971). In the southern Indian Ocean, songs from Antarctic blue whales and

two populations of pygmy blue whales - southeastern Indian Ocean (SEIO) and southeastern Indian Ocean (SWIO) types - have been seasonally recorded (Samaran et al., 2010; Stafford et al., 2011; Samaran et al., 2013; Leroy et al., 2016; Dréo et al., 2018; Torterotot et al., 2020). So far, songs have only been attributed to males, and are likely to have a reproductive function (McDonald et al., 2001; Oleson et al., 2007b; Lewis et al., 2018).

Blue whales also produce non-stereotyped calls, often referred to as arch sound, Frequency-Modulated (FM) calls (Thompson, 1996), arch sounds (Ljungblad et al., 1997) or D-calls (Thode et al., 1999). Their frequency is highly variable, ranging from about 100 Hz to 30 Hz (Figure 1). Unlike songs, there is no obvious geographic variation in the D-calls. D-calls have been recorded in association with blue whales in every ocean in which blue whale song has been recorded (Ljungblad et al., 1997; McDonald et al., 2001; Mellinger and Clark, 2003; Rankin et al., 2005; McDonald et al., 2006; Samaran et al., 2010)

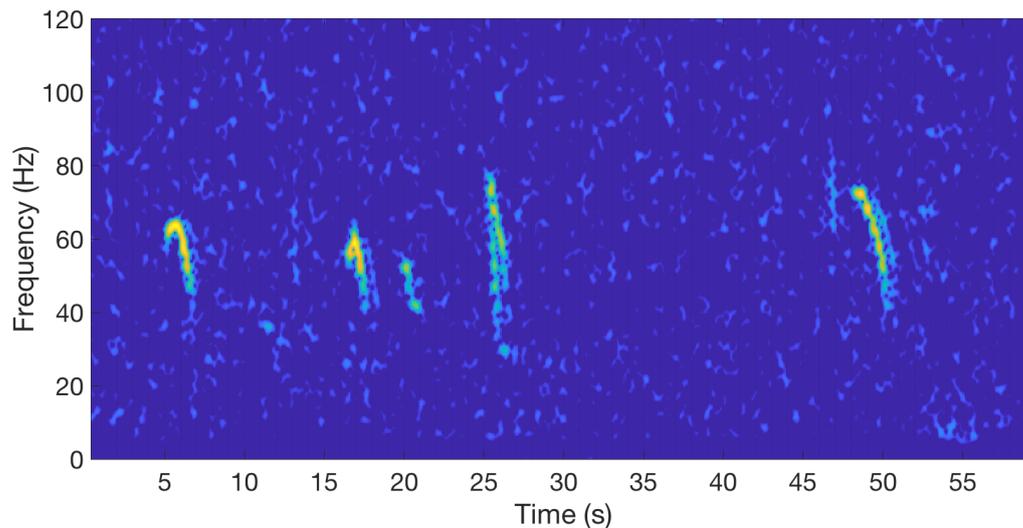


Figure 1: Spectrogram of a series of five D-calls recorded in the southern Indian Ocean. (nfft = 1200, win size = 80ms, overlap = 90 %)

D-calls are thought to be produced by both males and females (Oleson et al., 2007b; Lewis et al., 2018). Only a handful of studies, mainly from southern California feeding grounds, have looked into the behavioral context of their production. Some authors hypothesize that their emissions could be related to social behaviors (Oleson et al., 2007c; Lewis and Širović, 2018; Szesciorka et al., 2020). Data collected with acoustic tags on whales in the northern Pacific found that D-calls were produced during shallow dives between deeper feeding dives, suggesting that they could be used to attract conspecifics on productive feeding areas or to maintain

communication between individuals (Oleson et al., 2007b; Lewis et al., 2018). In contrast, the St Lawrence estuary, Canada, and along the Chilean coast, D-calls have been proposed as a means of maintaining cohesion between male-female pairs of blue whales, particularly when joined by a third whale (Schall et al., 2019).

Automation of D-call detection remains a challenge, due to their highly variable time-frequency signature. Spectrogram correlation has been used to detect Antarctic blue whale D-calls but with highly variable detection rate (between 21% and 71%) (Shabangu et al., 2017) and up to 87% (Shabangu et al., 2019), depending on the year from which the vocalization template was selected. The false alarm rate (*i.e.* number of detections of a signal that is not a D-call) was not specified in those studies. A detector based on a general power-law developed for the detection of humpback whale song units (Helble et al., 2012) was also applied to detect D-calls in data acquired off Antarctica (Thomisch, 2017). Detection rates varied from 75% in winter to 67% in summer, but about half of the automatic detections were incorrect. Given these difficulties, visual detection is still the most common detection method used for these vocalizations (Oleson et al., 2007c; Samaran et al., 2010; Lewis and Širović, 2018; Romagosa et al., 2020), despite its inconvenience for processing large datasets.

This study presents the first long-term acoustic monitoring of D-call presence in the southern Indian Ocean. Our analysis is based on 9 years of low-frequency (0-120 Hz) continuous acoustic recordings (2010-2018) at multiple sites. The monitored area spans historical whaling grounds where blue whales were intensively hunted during the 20th century (Branch et al., 2007). The hydrophone array extends from sub-tropical to sub-polar latitudes, a productive area which includes oceanographic features such as the sub-antarctic and polar fronts. D-calls were detected using a semi-automated technique whose performance was thoroughly evaluated. This study provides new insights into the blue whale occupation of the Indian Ocean, and complements data of Antarctic and pygmy blue whale (SWIO and SEIO) songs (Torterotot et al., 2020). Monitoring D-call seasonal and geographic occurrence, as well as songs thus provides useful information about blue whale use of the ocean.

3 Material and methods

3.1 Data acquisition

All acoustic data were recorded by the OHASISBIO (*Observatoire Hydro-Acoustique de la SISmicité et de la Biodiversité*; (Royer, 2009)) hydrophone network, located in the southern Indian Ocean (Figure 2). This network was first deployed in December 2009 and is still recording as of the date of publication (Table 1). From 2009 to 2016, 5 permanent mooring sites were deployed, located south of La Réunion Island (MAD), north of Crozet archipelago (NCRO), west of Kerguelen Island (WKER) and southwest and northeast of St Paul and Amsterdam islands (SWAMS and NEAMS). In 2012-2013, a mooring was temporarily deployed near the Equator, in the Central Indian Basin, east of Diego Garcia archipelago (RAMA). Since 2014, a new site was instrumented, south of the southeast Indian Ridge (SSEIR). In 2017, the coverage of the northern area was improved to refine the location of blue-whale wintering grounds. The network geometry was slightly modified, with three new sites RTJ, MAD-W and MAD-E, the latter two respectively located southwest and northeast of the initial MAD site, which was removed. A new site (SSWIR) was installed 273 km north of the initial NCRO site and replaced NCRO as recordings were often corrupted by flow noise due to strong currents in this region. Finally, an additional mooring (ELAN) was installed at 56° S, south of Kerguelen plateau, to expand the spatial coverage southward. Most of the sites are equipped with a single hydrophone mooring, but triads of hydrophones were temporarily deployed at some locations. In 2010 and 2011, 30 km spaced triads were installed at NCRO and WKER. In 2012, the NCRO triad was removed and in 2014, the WKER triad was moved to SWAMS with a 10 km spacing between moorings, and deployed until the end of 2015.

The hydrophones are moored between 1000m and 1300m depth, in the local sound fixing and ranging (SOFAR) channel axis. This channel acts as a waveguide, where low-frequency sounds can propagate over very long distances (Lurton, 2002). The continuous recordings are sampled at 240 Hz using a 24-bit analog-to-digital conversion (d’Eu et al., 2012) and stored on hard drives in the instrument. The current database comprises almost continuous acoustic records from 2010 to 2018, with a few gaps mostly due to unexpected battery exhaustion. Table

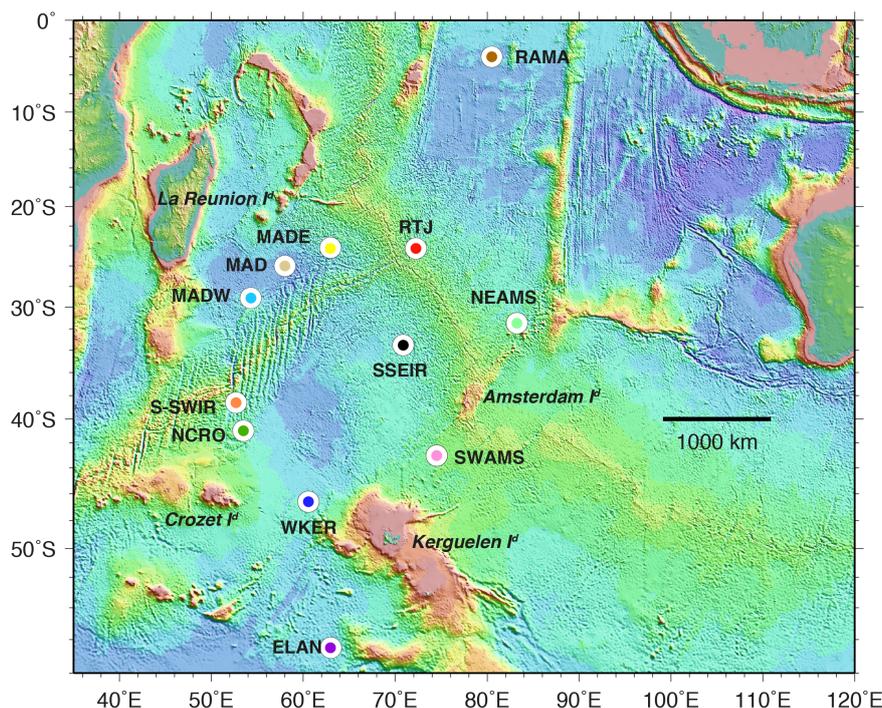


Figure 2: The OHASISIBIO hydrophone network in the Southern Indian ocean. Colored dots represent mooring sites.

1 summarizes the site coordinates and the recording periods of the data used in this study. Only one hydrophone of the triad was used for analysis at SWAMS and NCRO, but some results from the three hydrophones at WKER in 2012 are presented. When not specified, only the data of WKER1 are used in 2012.

Table 1: Overview of the OHASISIBIO deployments used in this study, with: mooring site; latitude and longitude ; starting and ending recording date. A "-" indicates continuous recording without data recovery ; an "x" sign indicates absence of data.

Site	Geo. Coord.	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
		Start	Stop																
MAD	26°05' S, 058°08' E	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	18/02/15	28/01/16	29/01/16	09/01/17	x	x	x	x
NEAMS	31°35' S, 083°14' E	13/02/10	-	-	25/11/11	04/03/12	04/03/13	04/03/13	10/02/14	x	x	4/02/15	25/08/15	x	x	31/01/17	05/02/18	05/02/18	29/01/19
SSEIR	33°30' S, 70°30' E	x	x	x	x	x	x	x	x	13/02/14	04/02/15	05/02/15	18/01/16	25/01/16	04/02/17	04/02/17	08/02/18	08/02/18	23/12/18
NCRO	41°00' S, 52°49' E	x	x	20/01/11	30/01/12	29/01/12	10/02/13	x	x	11/01/14	11/01/15	11/01/15	08/01/16	08/01/16	06/06/16	x	x	x	x
SWAMS	42°59' S, 74°35' E	x	x	x	x	29/02/12	27/02/13	28/02/13	07/02/14	07/02/14	27/01/15	27/01/15	20/01/16	21/01/16	01/08/16	x	x	31/01/18	30/01/19
WKER 1	46°38' S, 60°07' E	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	x	x	x	x	x	x
WKER 2	46°34' S, 60°31' E	x	x	x	x	05/02/12	15/02/13	x	x	15/01/14	01/01/15	16/01/15	01/08/16	12/01/16	20/01/17	20/01/17	19/01/18	19/01/18	28/07/18
WKER 3	46°50' S, 60°24' E	x	x	x	x	03/02/12	16/02/13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RAMA	03°50' S, 80°30' E	x	x	x	x	05/05/12	-	-	11/12/13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RTJ	24°15' S, 72°15' E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11/02/18	10/02/19
MADE	24°11' S, 63°01' E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	07/02/17	13/02/18	13/02/18	21/07/18
MADW	29°03' S, 54°16' E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	06/01/17	06/01/18	06/01/18	3/11/18
S-SWIR	38°33' S, 52°53' E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	08/01/17	22/12/17	09/01/18	14/01/19
ELAN	56°28' S, 62°59' E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	16/01/18	23/01/19

3.2 Automated call detection

Altogether, the OHASISBIO dataset amounts to more than 50 years of recordings. Each audio file lasts 6.48 hours, therefore, a whole year of data comprises about 1300 files. Although visual examination of the data proved to be the most reliable technique to detect D-calls, we had to resort to a semi-automated detection method to process such a large amount of data. We selected an automated detection algorithm based on dictionary learning and sparse representation (Socheleau et al., 2018) and combined it with a post-processing algorithm to reject the majority of the false alarms (Torterotot et al., 2019).

The Sparse Representation based Detector, or SRD (Socheleau et al., 2018) is particularly well adapted for the detection of D-calls, using dictionaries that take D-calls’ time-frequency variability into account. These dictionaries are built from temporal call signals directly extracted from the data and do not require an *a priori* fixed template. The algorithm then tries to reconstitute the observed signal with sparse combinations of the waveforms stored in the dictionaries. If the signal is well reconstructed, then the resemblance metric is high, meaning that it is likely that a D-call lays in the observed signal (Socheleau et al., 2018; Guilment et al., 2018). Before applying the SRD to detect D-calls on our whole dataset, its performance was investigated on manually annotated data subsets containing recordings from different years and locations of the OHASISBIO dataset. A threshold corresponding to one false alarm per hour was set and the matching recall reached between 80% and 90% for positive SNR D-calls (Torterotot et al., 2019). The detector was then applied on a complete year of data (2015) at WKER and every detection was visually double checked. Most of the interferences were due to two specific soundtypes: seismic air-gun blasts and fin whale 40 Hz pulses (Figure 3). A post-processing strategy was thus developed to eliminate these predictable interferences and to minimize the tedious visual verifications.

Two separate post-processing algorithms were used (see Torterotot et al. (2019) for a complete description). The first one differentiates D-calls from fin-whale 40 Hz pulses. The latter are much shorter and impulsive (Watkins, 1981; Širović et al., 2013) than D-calls and thus, the classification method is based on a duration criterion. The second post-processing algorithm recognizes the presence of air-gun shots in the recordings, based on their energy and periodic-

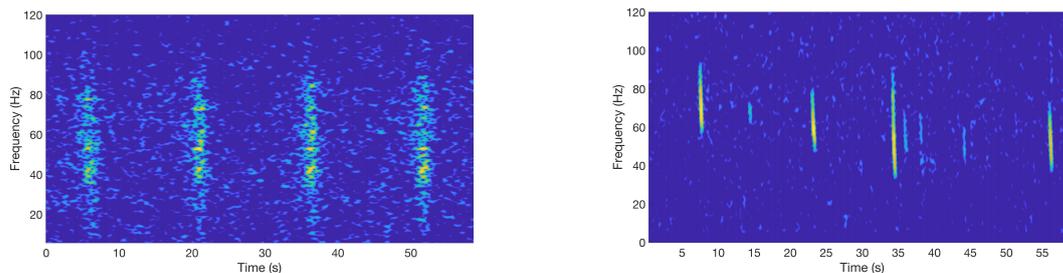


Figure 3: Spectrograms of the two sound types that wrongly trigger the automated D-calls detector, air-gun shots (left) and fin whale 40 Hz pulses (right)

ity (Mellinger, 2004; Nieu Kirk et al., 2012), since they are shot at a constant rate within each seismic survey (from 8 seconds up to 1 minute) (*e.g.* (Fitzgibbon et al., 2017; Nieu Kirk et al., 2012)). Every file containing air-gun sounds was then discarded in all subsequent analyses, without any visual inspection when routinely applied. Since air-gun shots are ubiquitous in the OHASISBIO recordings, eliminating the false alarms they generated in our detections largely overcomes the loss of the few true discernable D-calls in the discarded files (6.48 hours long). Both post-processing methods were tested on the recordings from 2015 at WKER site and the results show that almost 95% of false alarms due to fin whale 40 Hz pulses and air-guns were removed, while keeping more than 75% of the D-calls initially detected (Torterotot et al., 2019). All the SRD detections were thus post-processed as described. Finally, all remaining detections were double-checked by an experienced human operator by visual inspection of 10 minute-bin spectrograms (Hanning window, $nfft = 512$, time window = 256 samples, overlap of 90%), to make sure they were all D-calls. If not, they were classified as false alarms and removed from further analysis.

To further confirm the detector performance on real conditions, we examined the detections from the three instruments in the WKER hydrophone triad (30 km spacing) in 2012.

3.3 Detection results analysis

At each site, the annual number of D-calls as well as the annual number of days of recording (corrected by the number of days removed because of air gun presence in the data) were computed. The weekly number of D-calls detected, normalized by the corrected week duration was also computed. Each week duration was corrected by removing duration corresponding to

the number of files in which air guns were detected. The weekly proportion of files with air-gun signals is represented in Appendix 1.

The proportion of D-calls recorded at each season was also computed for the whole recording period and corrected by the corrected duration of the season, that can be shortened by the removal of files containing air-gun shots. Austral seasons are defined as in Samaran et al. (2010, 2013): summer (December, January, February), autumn (March, April, May), winter (June, July, August), and spring (September, October, November).

Unlike songs, D-calls emission cannot be attributed to a specific blue whale populations based on their time-frequency signature. Therefore, to try and associate D-calls presence with the presence of a specific blue whale population, we measured the co-occurrence of D-calls and stereotyped song as the number of hours within which both were detected, over the total number of hours in which D-calls were detected. The song presence metrics are based on the detections presented in Torterotot et al. (2020).

4 Results

The weekly D-call detection patterns from the hydrophone triad deployed at WKER site in 2012 were highly similar, including the detection peak in April (Pearson’s correlation $\rho > 97\%$, $p < 0.001$; Figure 4).

Figure 5 displays the annual number of D-calls detected at every site, organized roughly from north to south, and the number of days per year examined for D-call presence (*i.e.* days of recordings minus the days when air-gun shots were detected). D-calls were detected every year at all the OHASISBIO recording sites, except RAMA. Only 10 D-calls were detected at RTJ during the only available year of recording (2018), and only 36 D-calls at MADE in its 2-year dataset (2017-2018); therefore, these sites are not included in the following figures. The highest numbers of detections occurred at WKER in 2015 ($n = 6\ 760$) and at ELAN in 2018 ($n = 6\ 594$). Overall, more D-calls were detected at the southern sites (ELAN and WKER) than at the northern sites (SSEIR, MADE, MADW, NEAMS, RTJ) ($n < 1\ 346$). However, more seismic shots were detected at the northern sites, leading to reduced datasets. During

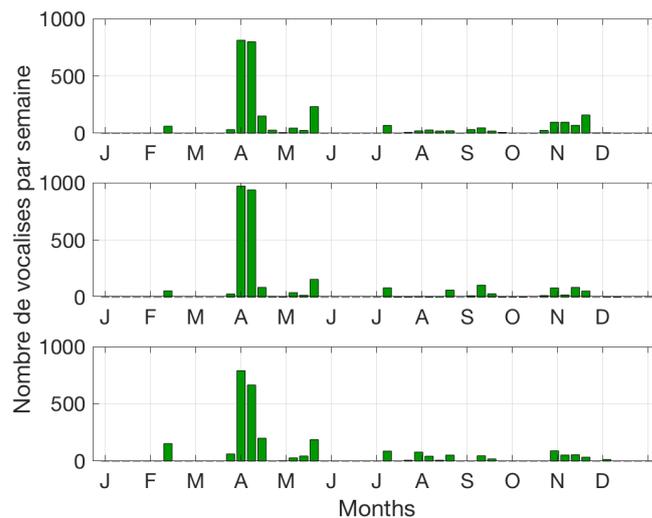


Figure 4: Number of blue whale D-calls detected per week at WKER in 2012; all detections were visually checked by an expert operator.

the recording period (2010 to 2018), there was no trend towards an increase or decrease in the number of D-calls at any site.

The seasonal pattern of D-call presence is shown in Figure 6. Almost no D-call were detected in summer (December to February) at the northern MAD, MADW, NEAMS and SSEIR sites (<3%). At all these sites, most of the D-calls were detected during winter (MAD: 48%, MADW: 70%, NEAMS: 49%, SSEIR: 73%). At the other sites, D-calls were detected in all four seasons, but mostly in winter at SSWIR, NCRO, SWAMS and WKER (respectively 45%, 31%, 38% and 48%) and in spring at ELAN (49%). A more detailed presentation is given in the Appendix 2 with the weekly distribution of D-calls.

To synthesize both song and D-call data, we used annual song detection data from 2010 to 2018 (from (Torterotot et al., 2020)) and compared that to D-call detections from the same sites and time frames (Figure 7). While song from both Antarctic and pygmy blue whales was recorded throughout the array, with geographic variation arising mainly from the song types recorded, D-calls were only infrequently recorded on the northern instruments with occurrence increasing with latitude.

Figure 8 shows the proportion of D-calls that were associated with the presence of Antarctic or SWIO pygmy blue whale calls for the two sites with the highest number of detected D-calls (WKER and ELAN). At WKER, D-calls mainly co-occurred with Antarctic blue whale calls

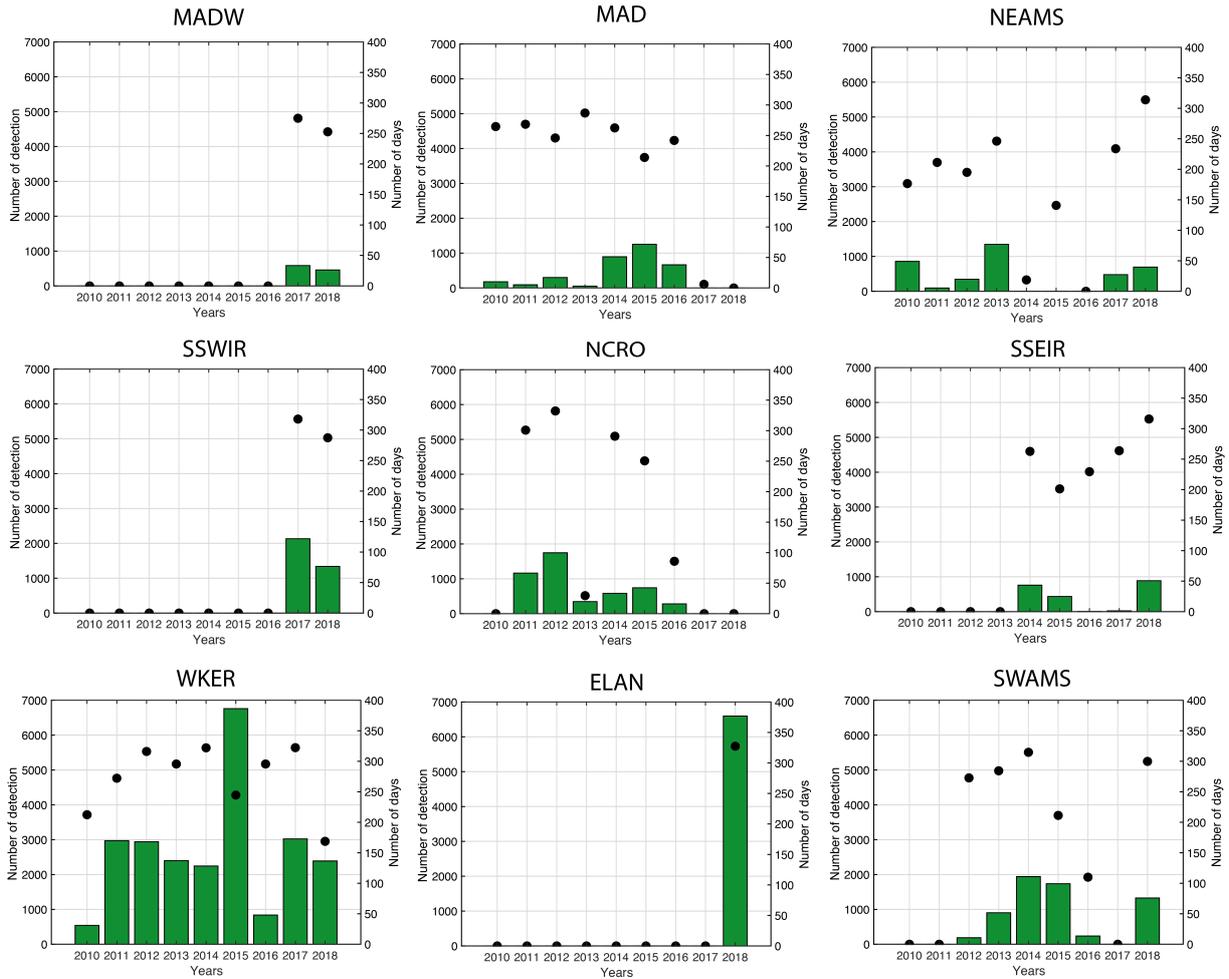


Figure 5: Number of detected D-calls per year at sites of the OHASISBIO network. Black dots represent the number of days of recording for each year, corrected for the number of days when seismic shots were detected (files containing airgun sounds were removed from the analysis).

from July to December. During the rest of the year, D-calls were detected together with both Antarctic and SWIO pygmy blue whale call. At ELAN, D-calls are associated with Antarctic blue whale calls from August to December and to SWIO pygmy blue whale calls in November.

5 Discussion

In terms of performance, the sparse representation based detector used in this study had a detection rate (recall) of more than 80% for positive SNR D-calls and under 60% for negative SNR calls (Torterotot et al., 2019). The final detection results also rely on the post-processing that removed the files containing airguns from the analysis, to avoid a too important double checking phase. Given that discarded files may have contained D-calls (either hidden by the

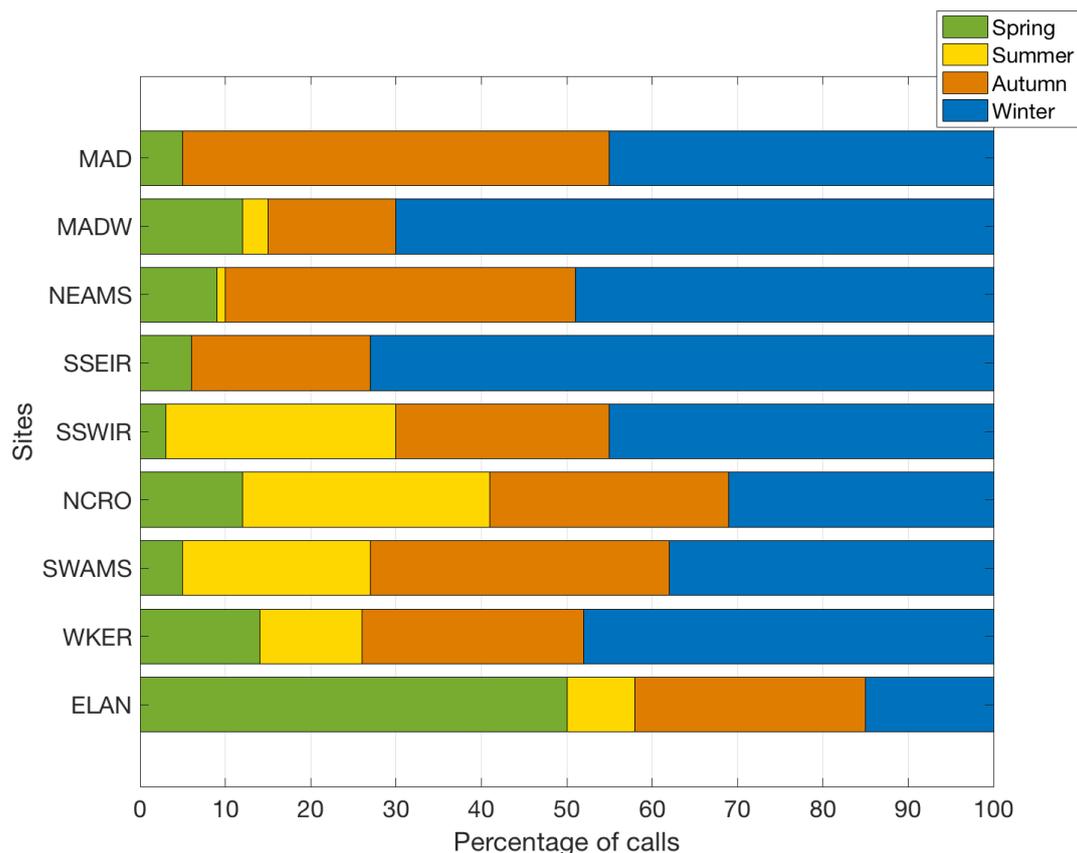


Figure 6: Percentage of hours with detections of D-calls detected each season at all sites

shot sounds or discernable), our results likely underestimate the actual number of D-calls. The Appendix 1 gives an overview of the sub-sampling caused by this post-processing with a figure showing the weekly proportion of files with seismic shots. For all these reasons, the actual number of D-calls is underestimated: only loud calls are detected during quiet periods (*i.e.* when there are no air-gun sounds in the background). The similar detection patterns measured at the WKER hydrophone triads (Figure 4) further corroborate the detector abilities to correctly detect D-calls. It is however worth noting that if the pattern is similar, the actual number of detection may vary from one hydrophone of the triad to the other, depending on the week. To date, there is no reliable estimate of D-calls source levels. Some qualitative analyses agree that it is lower than that of stereotyped calls (Thode et al., 2000; Gavrilov et al., 2011), implying that their detection range is likely smaller Oleson et al. (2007a). The variable weekly number of D-calls detections on the triad hydrophone recordings might therefore be due to the small propagation range of D-calls, whom, depending on the whale location, might not be recorded by all three devices.

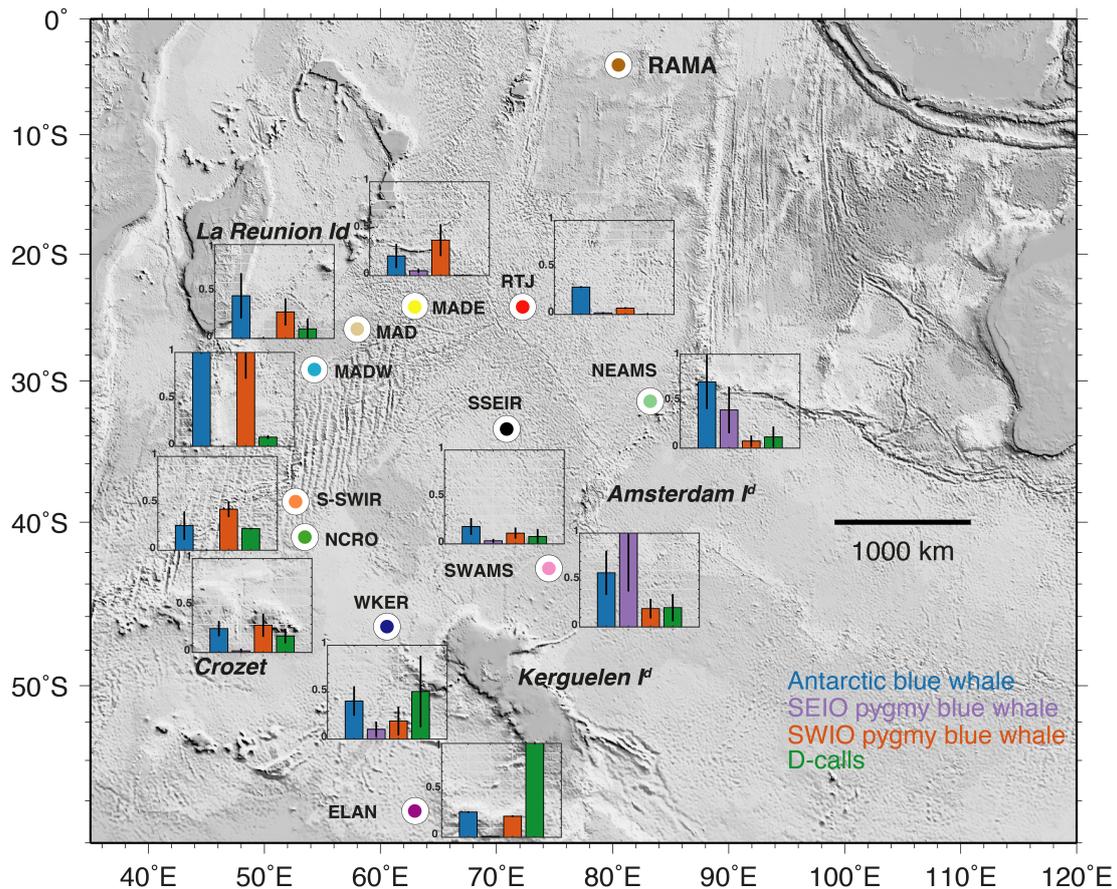


Figure 7: Mean and standard deviation of the number of Antarctic blue whale calls (blue), SEIO pygmy blue whale calls (purple), SWIO pygmy blue whale calls (orange) and D-calls (green) detected per year normalized by the number of days of recording per year. The results are then normalized by the maximum averaged number of detections for each call type.

Oleson et al. (2007a) found that, in the California bight, the number of D-calls was related to the number of visually observed animals. Therefore, they suggested that monitoring D-calls might better indicate blue whale presence than monitoring songs, emitted only by males and whose production rate exhibits spatial and temporal variability due to their reproductive function. However, in our dataset, the proportion of D-calls relative to song is always small, especially at sub-tropical latitudes (MAD, MADW, NEAMS, SWAMS) (Torterotot et al., 2020). Together with the spatial variability of detected D-calls, it suggests that they are not an appropriate proxy for assessing the relative abundance of whales within the vicinity of a hydrophone. Thomisch (2017) used D-calls to describe Antarctic blue whale movement in the Southern Ocean and found persistent D-call presence at 59°S, implying that part of the population remains close to the sea ice edge during winter months. In the southern Indian Ocean, the simultaneous presence of multiple blue whale populations, makes it more challenging to monitor their movements

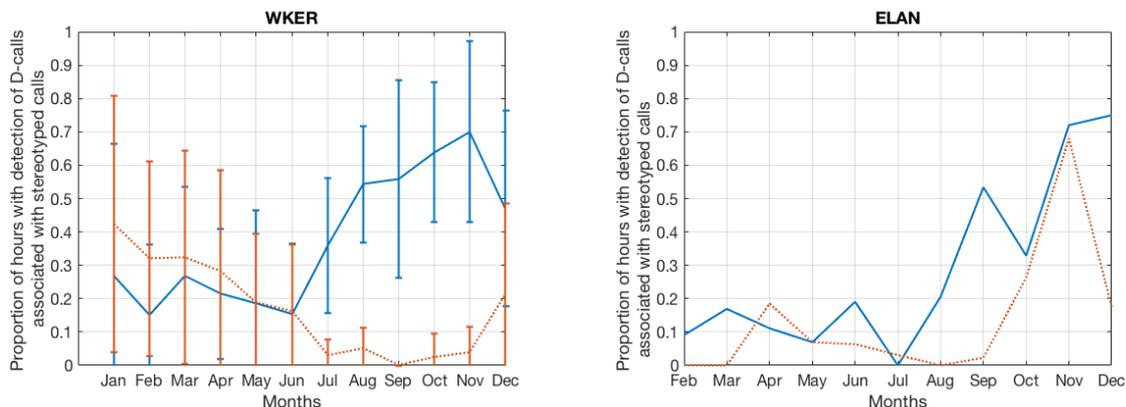


Figure 8: Monthly proportion of hours with D-calls associated with Antarctic blue whale calls (blue) and SWIO pygmy blue whale (orange dotted line) over the total number of hours with D-call detections at (left) WKER and (right) ELAN. Vertical bars are standard deviations values. They do not appear on the right hand side sub-figure because only 1 year of data was analyzed.

only using D-calls. Indeed, unlike songs, it has never been shown that D-calls' time-frequency signatures were geographically distinct. The comparison of the presence of D-calls with that of other stereotyped calls (Figure 8) was unable to univocally associate D-calls with any of the different acoustic populations present (*e.g.* Both Antarctic and SWIO pygmy blue whales were detected from January to June at WKER and in November at ELAN, Figure 8). Thus, monitoring only D-calls on this dataset could not serve to distinguish the distribution and seasonal presence of different acoustic populations of blue whales in this region. However, this call type can bring new insight on blue whale behavior and how they use the Indian Ocean as a habitat.

In the southern Indian Ocean, more D-calls were detected in high productive latitudes (WKER and ELAN), a preferential blue whale foraging ground (Branch et al., 2007; Samaran et al., 2010). The majority of the detections at 56° S were in spring, a productive season due to the melting of the ice cap which induce phyto-planktonic blooms (Pakhomov and McQuaid, 1996). This observation, supports the hypothesis that D-calls are produced during or in-between foraging behavior as observed offshore California (Oleson et al., 2007b). The great number of D-calls recorded in Antarctic feeding grounds during the ENRICH survey in 2019 also corroborate this observation (Miller et al., 2019a). The winter D-call detections at the northern sites of the array might therefore indicate that blue whale also feed on their wintering grounds. This behavior has already been observed for humpback whales off Brazil ($19^{\circ}35'$ S) (Pinto de sa Alves et al., 2009), Mexico (24° N) (Gendron, 1993) and Dominican Republic (19° N) (Baraff

et al., 1991). Detections of D-calls at sub-antarctic locations (NCRO, SSWIR, SWAMS) could indicate that blue whales are feeding during migration, maybe taking advantage of productive seamounts. Such isolated areas have been recognized as highly important for biodiversity as they support rich underwater eco-systems (Pitcher et al., 2007).

In the Pacific Ocean, D-calls production rates have been found to be significantly higher during shallow non-lunging dives and periods of surface non-feeding related behavior (Lewis et al., 2018). D-calls were also detected during dynamic behaviors associated with mating (Schall et al., 2019). These observations, although reported on feeding areas, favor the hypothesis of a multi-purpose social call. D-call would therefore be expected to be detected on wintering grounds, where potential mating and calving would induce the need of social communication. This does not appear to be the case in the Indian Ocean, where only a few D-calls were recorded in low latitudes (Figure 5). Wintering grounds may be geographically more extended than feeding grounds, inducing a sparser blue whale presence and thus fewer social acoustic interactions in the low latitudes. In this case, the low number of D-calls detected at MADW, the site with the greatest number of Antarctic and Madagascan blue whale stereotyped calls (Figure 7) is therefore puzzling, as the context would suggest high levels of social interactions. These observations support the hypothesis that D-calls are mainly produced in feeding contexts and can therefore be a pertinent acoustic indicator of blue whale feeding behavior.

6 Conclusion

This paper is the first broad-scale study describing the seasonal and geographical presence of blue whale D-calls in the southern Indian Ocean. While monitoring songs proved to be an efficient way to infer their distribution in this region (Torterotot et al., 2020), monitoring D-calls adds useful information on how this species uses its habitat. We show a behavioral switch, from song-intensive and sparse-D-call emissions in the north to song-moderate and more intensive D-call emissions in the south, suggesting a latitudinal partition of blue whale habitat use. The highest number of D-calls was detected at ELAN (56° S) during spring, a highly productive season, whereas only a small number of D-calls was detected in low latitudes, where stereotyped calls are highly detected. This corroborates the hypothesis that this call

type is used mainly on foraging grounds and might therefore be a relevant indicator of blue whale feeding behavior.

To better interpret D-call occurrence, joint visual and acoustic observations along with biopsies, would be appropriate to determine which subspecies produce D-calls and in which context(s). This would help understand whether D-calls could be associated to a specific behavior and/or to a specific sub-species. Eventually, comparing D-call occurrence with environmental data (*e.g.* sea surface temperature, chlorophyll *A*) could inform on blue whale habitat preferences and whether it evolves in response to the rapid ocean and climate changes.

7 Acknowledgement

Cruises were subsidized by the French Oceanographic Fleet and the French Polar Institute, with additional support from INSU-CNRS. M.T. was supported by a PhD fellowship from the University of Brest and a travel grant from the ISblue project, Interdisciplinary graduate school for a blue planet (ANT-17-EURE-0015), a project from the French Government program 'Investissement d'Avenir'. The authors wish to thank the captain and crews of RV Marion Dufresne for the successful deployments and recoveries of the hydrophones of the OHASISBIO array as well as Mickaël Beauverger at LGO for the preparation and realization of the scientific cruise. The authors would also like to acknowledge Katherine M. Stafford for the relevant comments and suggestions on the draft of the manuscript.

References

- Baraff, L. S., Clapham, P. J., Mattila, D. K., and Bowman, R. S. (1991). Feeding behavior of a humpback whale in low-latitude waters. *Marine Mammal Science*, 7(2):197–202.
- Berchok, C. L., Bradley, D. L., and Gabrielson, T. B. (2006). St. Lawrence blue whale vocalizations revisited: Characterization of calls detected from 1998 to 2001. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4):2340–2354.
- Branch, T. A., Stafford, K. M., Palacios, D. M., Allison, C., Bannister, J. L., Burton, C., Cabrera, E., Carlson, C. A., Galletti Vernazzani, B., Gill, P. C., Hucke-Gaete, R., Jenner, K. C. S., Jenner, M. N., Matsuoka, K., Mikhalev, Y. A., Miyashita, T., Morrice, M. G., Nishiwaki, S., Sturrock, V. J., Tormosov, D., Anderson, R. C., Baker, A. N., Best, P. B., Borsa, P., Brownell, R. L., Childerhouse, S., Findlay, K. P., Gerrodette, T., Ilangakoon, A. D., Joergensen, M., Kahn, B., Ljungblad, D. K., Maughan, B., McCauley, R. D., McKay, S., Norris, T. F., Rankin, S., Samaran, F., Thiele, D., Van Waerebeek, K., and Warneke, R. M. (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.
- Cummings, W. C. and Thompson, P. O. (1971). Underwater Sounds from the Blue Whale, *Balaenoptera musculus*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 50(4B):1193.
- d’Eu, J.-F., Royer, J.-Y., and Perrot, J. (2012). Long-term autonomous hydrophones for large-scale hydroacoustic monitoring of the oceans. In *2012 Oceans-Yeosu*, pages 1–6. IEEE.
- Dréo, R., Bouffaut, L., Leroy, E. C., Barruol, G., and Samaran, F. (2018). Baleen whale distribution and seasonal occurrence revealed by an ocean bottom seismometer network in the Western Indian Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, (xxxx).
- Fitzgibbon, Q. P., Day, R. D., McCauley, R. D., Simon, C. J., and Semmens, J. M. (2017). The impact of seismic air gun exposure on the haemolymph physiology and nutritional condition of spiny lobster, *Jasus edwardsii*. *Marine Pollution Bulletin*, 125(1-2):146–156.
- Gavrilov, A. N., McCauley, R. D., Salgado-Kent, C., Tripovich, J. S., and Burton, C. (2011).

- Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(6):3651–3660.
- Gendron, D. (1993). Evidence of feeding by humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in the Baja California breeding ground, Mexico. *Marine Mammal Science*, 9(1):76–81.
- Guilment, T., Socheleau, F.-X., Pastor, D., and Vallez, S. (2018). Sparse representation-based classification of mysticete calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3):1550–1563.
- Helble, T. A., Ierley, G. R., D’Spain, G. L., Roch, M. A., and Hildebrand, J. A. (2012). A generalized power-law detection algorithm for humpback whale vocalizations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4):2682–2699.
- Ichihara, T. (1966). The pygmy blue whale, *Balaenoptera musculus breviceuda*, a new subspecies from the Antarctic. *Whales, dolphins, and porpoises*, pages 79–111. University of California Press Berkeley and Los Angeles.
- LeDuc, R., a.G. Dizon, Goto, M., Pastene, L., Kato, H., Nishiwaki, C., LeDuc, C., and Brownell, R. (2007). Patterns of genetic variation in Southern Hemisphere blue whales and the use of assignment test to detect mixing on the feeding grounds. *Journal of Cetacean Research Management*, 9:73–80.
- Leroy, E. C., Samaran, F., Bonnel, J., and Royer, J.-Y. (2016). Seasonal and diel vocalization patterns of Antarctic blue whale (*Balaenoptera musculus intermedia*) in the Southern Indian Ocean: A multi-year and multi-site study. *PLoS ONE*, 11(11).
- Lewis, L. A., Calambokidis, J., Stimpert, A. K., Fahlbusch, J., Friedlaender, A. S., McKenna, M. F., Mesnick, S. L., Oleson, E. M., Southall, B. L., Szesciorka, A. R., and Širović, A. (2018). Context-dependent variability in blue whale acoustic behaviour. *Royal Society Open Science*, 5(8):180241.
- Lewis, L. A. and Širović, A. (2018). Variability in blue whale acoustic behavior off southern California. *Marine Mammal Science*, 34:311–329.

- Ljungblad, D., Clark, C. W., and 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.
- Ljungblad, D. K., Stafford, K. M., Shimada, H., and Matsuoka, K. (1997). Sounds attributed to blue whales recorded off the southwest coast of australia in december 1995. *Report of the International Whaling Commission*, 47:435–439.
- Lurton, X. (2002). *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer Science & Business Media.
- McDonald, M. A., Calambokidis, J., Teranishi, A. M., and 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., Mesnick, S. L., and Hildebrand, J. A. (2006). Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: using song to identify populations. *Journal of Cetacean Research and Management*, 8(1):55–65.
- Mellinger, D. K. (2004). A comparison of methods for detecting right whale calls. *Canadian Acoustics*, 32(2):55–65.
- Mellinger, D. K. and Clark, C. W. (2003). Blue whale (*Balaenoptera musculus*) sounds from the North Atlantic. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(2):1108–1119.
- Miller, B. S., Calderan, S., Miller, E. J., Širović, A., Stafford, K. M., Bell, E., and Double, M. C. (2019a). A passive acoustic survey for marine mammals conducted during the 2019 antarctic voyage on euphausiids and nutrient recycling in cetacean hotspots. *Proceedings of ACOUSTICS 2019*.
- Miller, E. J., Potts, J. M., Cox, M. J., Miller, B. S., Calderan, S., Leaper, R., and Olson, P. A. (2019b). The characteristics of krill swarms in relation to aggregating Antarctic blue whales. *Scientific Reports*, pages 1–13.

- Nieukirk, S. L., Mellinger, D. K., Moore, S. E., Klinck, K., Dziak, R. P., and Goslin, J. (2012). Sounds from airguns and fin whales recorded in the mid-Atlantic Ocean, 1999–2009. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2):1102–1112.
- Nieukirk, S. L., Stafford, K. M., Mellinger, D. K., Dziak, R. P., and Fox, C. G. (2004). Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(4):1832–1843.
- Oleson, E. M., Calambokidis, J., Barlow, J., and 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., and Hildebrand, J. A. (2007b). Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. *Marine Ecology Progress Series*, 330(January):269–284.
- Oleson, E. M., Wiggins, S. M., and Hildebrand, J. A. (2007c). Temporal separation of blue whale call types on a southern California feeding ground. *Animal Behaviour*, 74(4):881–894.
- Pakhomov, E. and McQuaid, C. (1996). Distribution of surface zooplankton and seabirds across the southern ocean. *Polar Biology*, 16(4):271–286.
- Pinto de sa Alves, L. C., Andriolo, A., Zerbini, A., Altmayer Pizzorno, J. L., and Clapham, P. (2009). Record of feeding by humpback whales (megaptera novaeangliae) in tropical waters off brazil. *Publications, Agencies and Staff of the US Department of Commerce*, page 45.
- Pitcher, T. J., Morato, T., Hart, P. J., Clark, M. R., Haggan, N., and Santos, R. S. (2007). The depths of ignorance: an ecosystem evaluation framework for seamount ecology, fisheries and conservation. *Seamounts: ecology, fisheries and conservation. Blackwell Fisheries and Aquatic Resources Series*, 12:476–488.
- Rankin, S., Ljungblad, D. K., and Clark, C. W. (2005). 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 Management*, 7(1):13–20.

- Rice, D. W. (1998). Marine mammals of the world: systematics and distribution.
- Rocha, R. C., Clapham, P. J., and Ivashchenko, Y. V. (1982). Emptying the Oceans : A Summary of Industrial Whaling Catches in the 20th Century. *Marine Fisheries Review*, 76(4):37–48.
- Romagosa, M., Baumgartner, M., Cascão, I., Lammers, M. O., Marques, T. A., Santos, R. S., and Silva, M. A. (2020). Baleen whale acoustic presence and behaviour at a Mid-Atlantic migratory habitat , the Azores Archipelago. *Scientific Reports*, pages 1–11.
- Royer, J.-Y. (2009). OHASISBIO - Hydroacoustic observatory for the seismicity and biodiversity in the Indian Ocean. DOI: 10.18142/229.
- Saddler, M. R., Bocconcelli, A., Hickmott, L. S., Chiang, G., Landea-briones, R., Bahamonde, P. A., Howes, G., Segre, P. S., and Sayigh, L. S. (2017). Characterizing Chilean blue whale vocalizations with DTAGs : a test of using tag accelerometers for caller identification. *Journal of Experimental Biology*, 220:4119–4129.
- Samaran, F., Adam, O., and Guinet, C. (2010). Discovery of a mid-latitude sympatric area for two Southern Hemisphere blue whale subspecies. *Endangered Species Research*, 12(2):157–165.
- Samaran, F., Stafford, K. M., Branch, T. A., Gedamke, J., Royer, J.-Y., Dziak, R. P., and Guinet, C. (2013). Seasonal and geographic variation of southern blue whale subspecies in the Indian Ocean. *PLoS ONE*, 8(8).
- Schall, E., Iorio, L. D., Berchok, C., Filún, D., Bedriñana-romano, L., Buchan, S. J., Opzeeland, I. V., and Hucke-gaete, R. S. R. (2019). Visual and passive acoustic observations of blue whale trios from two distinct populations. *Marine Mammal Science*, pages 1–10.
- Shabangu, F. W., Findlay, K. P., Yemane, D., Stafford, K. M., Berg, M. V. D., Blows, B., and Andrew, R. K. (2019). Seasonal occurrence and diel calling behaviour of Antarctic blue whales and fin whales in relation to environmental conditions off the west coast of South Africa. *Journal of Marine Systems*, 190(November 2017):25–39.

- Shabangu, F. W., Yemane, D., Stafford, K. M., Ensor, P., and Findlay, K. P. (2017). Modelling the effects of environmental conditions on the acoustic occurrence and behaviour of Antarctic blue whales. *PLoS ONE*, 12(2):1–24.
- Širović, A., Williams, L. N., Kerosky, S. M., Wiggins, S. M., and Hildebrand, J. A. (2013). Temporal separation of two fin whale call types across the eastern North Pacific. *Marine Biology*, 160(1):47–57.
- Socheleau, F.-X., Samaran, F., and Calls, M. (2018). Detection of Mysticete Calls : a Sparse Representation-Based Approach. Technical report.
- Stafford, K. M., Chapp, E., Bohnenstiel, D. R., and 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., Nieukirk, S. L., and Fox, C. G. (2001). Geographic and seasonal variation of blue whale calls in the North Pacific. *Journal of Cetacean Research and Management*, 3(1):65–76.
- Szescioroka, A. R., Ballance, L. T., Širovi, A., Rice, A., Ohman, M. D., Hildebrand, J. A., and Franks, P. J. S. (2020). Timing is everything : Drivers of interannual variability in blue whale migration. *Scientific Reports*, pages 1–9.
- Thode, A. M., D’Spain, G. L., and Kuperman, W. A. (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.
- Thode, A. M., D’Spain, G. L., and Kuperman, W. A. (1999). Physical constraints on blue whale sound production mechanisms derived from matched-field processing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(2):993–993.
- Thomisch, K. (2017). *Distribution patterns and migratory behavior of Antarctic blue whales*. PhD thesis.
- Thompson, P. O. (1996). Underwater Sounds of Blue Whales, *Balaenoptera musculus*, in the Gulf of California, Mexico. *Marine Mammal Science*, 12(April):288–293.

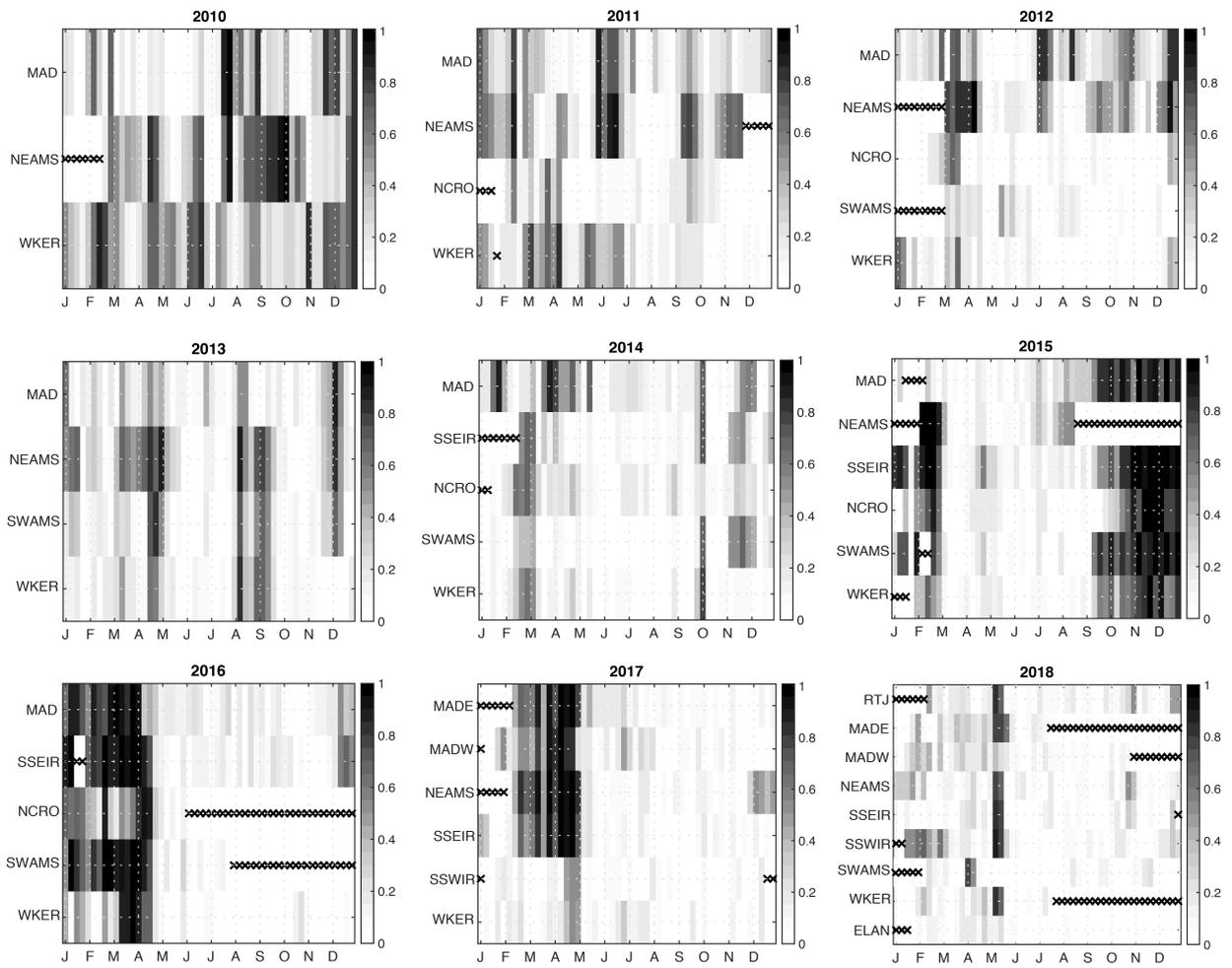
Torterotot, M., Royer, J.-Y., and Samaran, F. (2019). Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the Southern Indian Ocean. In *IEEE OCEANS*, pages 1–10. IEEE.

Torterotot, M., Samaran, F., Stafford, K. M., and Royer, J.-Y. (submitted in March 2020). Distribution of blue whale populations in the southern indian ocean based on a decade of acoustic monitoring. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*.

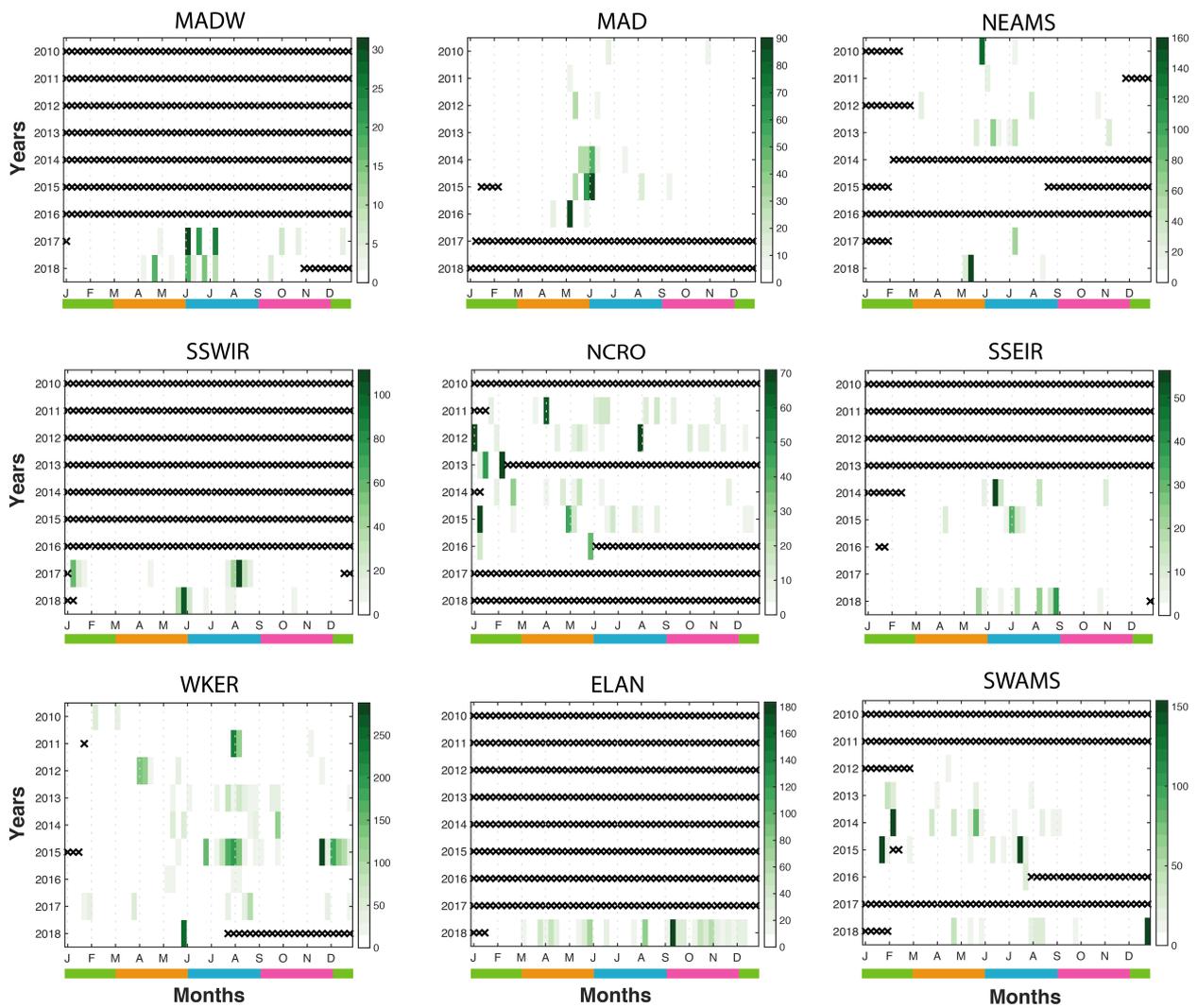
Videsen, S. K. A., Bejder, L., Johnson, M. P., and Madsen, P. T. (2017). High suckling rates and acoustic crypsis of humpback whale neonates maximise potential for mother – calf energy transfer. *Functional Ecology*, page 13.

Watkins, W. A. (1981). Activities and underwater sounds of fin whales. *Scientific Report of Whale Research Institute*, (33):83–117.

Appendix



Appendix 1: Weekly proportion of files with air-gun signals for every year of recording. Black crosses indicate weeks with no available recordings.



Appendix 2: Weekly number of D-calls detected, normalized by the corrected week duration. Black crosses indicate weeks with no available recordings. Season are color coded as follow: summer: green; autumn: orange; winter: blue and spring: pink.

4.3 Discussion

Cette étude souligne l'intérêt de surveiller la présence des deux types de vocalisations produits par les baleines bleues sur de larges observatoires acoustiques. Jusqu'à présent, la présence des D-calls a surtout été observée sur des aires d'alimentation côtières (*e.g.* golfe de Californie (Oleson et al., 2007b), Açores (Romagosa et al., 2020)) et a permis (1) de mieux documenter la présence des baleines bleues dans ces régions (Oleson et al., 2007c) et (2) de mieux estimer le nombre de baleines bleues présentes autour de l'hydrophone (Oleson et al., 2007a) qu'en utilisant seulement les chants. Les D-calls ne peuvent pas formellement être associés à chaque population; ainsi dans l'océan Indien, peuplé par trois populations acoustique de baleines bleues, la présence des D-calls dans les enregistrements est plus difficilement interprétable. Contrairement au golfe de Californie, où la présence saisonnière des D-calls est décalée par rapport à la présence saisonnière des chants, dans l'océan Indien les chants des différentes populations sont enregistrés presque toute l'année et donc la présence de D-calls n'apporte pas d'information supplémentaire sur une quelconque présence saisonnière. De plus, le nombre de D-calls détecté n'étant pas corrélé avec le nombre de vocalisations stéréotypées détectées, il semble peu probable que les estimations de densités calculées à partir des seuls D-calls soient plus fiables que celles calculées à partir des chants, comme suggéré par Oleson et al. (2007a). En revanche, la comparaison des patrons géographiques de présence des D-calls et des chants dans l'océan Indien met en évidence un phénomène intéressant : aux basses latitudes, la majorité des chants enregistrés coïncide avec un minimum d'émissions de D-calls tandis qu'aux hautes latitudes, c'est l'inverse, la majorité des D-calls coïncide avec un minimum d'émissions de chants (cf. Figure 7 de l'article). Nous interprétons cette observation comme un changement de comportement acoustique des baleines bleues entre hautes et basses latitudes, associé à des usages différents de l'océan Indien en fonction de la latitude (cf. Discussion générale 6.5).

Il est important de rappeler que la détection des D-calls n'a pu se faire que sur les fichiers vierges de tirs sismiques (cf. partie 2.1.4). Cette étude donne donc un premier aperçu de la présence des D-calls dans les enregistrements OHASISBIO, qui pourrait être affinée par des détecteurs plus performants. Il serait intéressant de compléter ces premières observations acoustiques par des observations visuelles, notamment pour préciser le contexte de production des vocalisations. Pour cela, les données opportunistes collectées lors des rotations du Marion Dufresne dans les Terres Australes et antarctique Françaises pourraient être traitées systématiquement. Ce navire n'effectue cependant que quelques rotations annuelles et le comportement des animaux n'est en général pas relevé. La pose de balises sur les animaux pourrait aussi apporter des informations sur le contexte de production des vocalisations. L'océan Indien austral n'est toutefois pas très adapté pour ce genre d'expérience acoustique, dans lesquelles les balises doivent être récupérées pour

disposer des données. On pourrait aussi envisager d’équiper les baleines bleues de balises permettant de positionner l’animal tout en mesurant divers données environnementales transmises par satellite, à l’image des expériences menées sur des éléphants de mer (Simmons et al., 2007; Dragon et al., 2010; Guinet et al., 2014) ou des tortues marines (Seminoff et al., 2008; Chambault et al., 2016). Ainsi, même si le comportement acoustique n’est pas enregistré, le comportement de plongée et la position des animaux en fonction de certain paramètres environnementaux permettraient de mieux comprendre ce qui motive les mouvements migratoires des baleines bleues et définir les caractéristiques de leurs habitats privilégiés. Enfin, à l’instar des sons sociaux de baleines à bosse (Dunlop et al., 2007), il serait intéressant d’essayer de classer les D-calls en catégories en fonction de leur forme temps fréquence, puis d’observer si l’individu, le comportement, la population, la situation géographique et/ou saisonnière ou encore le niveau de bruit ambiant ont un effet sur cette forme temps/fréquence. Les D-calls détectés automatiquement sur les enregistrements OHASISBIO représentent en effet une base de donnée inédite et conséquente de ce type de vocalisations.

Chapitre 5

Analyse des patrons journaliers d'émission des vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées de baleines bleues dans l'océan Indien austral

5.1 Introduction

Les distributions saisonnières et spatiales de trois populations acoustiques de baleines bleues sont maintenant bien établies dans l'océan Indien austral. Les détections complémentaires des vocalisations non-stéréotypées apportent de nouvelles informations sur le comportement des baleines bleues dans cette région. Des études ont montré que les variations des taux d'émission de vocalisations en fonction du régime de lumière (*i.e.* rythme nyctéméral) pouvaient être de bons indicateurs (1) du comportement des mammifères marins (alimentation ou reproduction, *e.g.* (Risch et al., 2013)) ou (2) de leur stratégie d'alimentation (en profondeur ou en surface, *e.g.* (Stafford et al., 2005)).

Nos détections systématiques des vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées de trois populations de baleines bleues vont ici permettre de vérifier le rythme nyctéméral des chants de baleines bleues Antarctique observé par Leroy et al. (2016) et de déterminer celui des chants de baleine bleue pygmée et des D-calls. Les variations des rythmes d'émission pourront ensuite être interprétées en termes de comportement et de stratégies d'alimentation des baleines bleues.

5.2 Contexte

Thompson (1965) est le premier à remarquer que l'émission des vocalisations de baleines bleues enregistrées dans le canal de Santa Barbara (entre l'île San Clemente et la côte californienne sud) présentait un rythme nyctéméral. Le nombre de vocalisations enregistrées culminait juste avant le lever du jour (aube) et juste après le coucher du soleil (crépuscule). Des années plus tard, au même endroit, les vocalisations des baleines bleues sont toujours majoritairement détectées durant la nuit (Clark and Fristrup, 1997; Wiggins et al., 2005; Oleson et al., 2007c). L'une des dernières études en date sur les baleines bleues au large de la Californie constate toutefois que la différence entre le nombre d'émissions diurnes et nocturnes n'est pas significative (Lewis et al., 2018). D'autres travaux, au large de l'Amérique centrale (Pacifique tropical) montrent que les vocalisations de baleines bleues (unité B) sont majoritairement détectées à l'aube, au crépuscule et la nuit (Stafford et al., 2005). En Atlantique, la seule étude sur le rythme nyctéméral vocal de baleines bleues met en évidence une absence de variation du rythme d'émission en fonction du régime de lumière pour les populations enregistrées au large des Açores (Romagosa et al., 2020).

Dans l'océan Indien austral, le rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique apparaît significativement plus élevé la journée que la nuit (Leroy et al., 2016). Dans le même temps, cette population de baleines au sud-est de l'Australie (au large de Portland) est davantage détectée durant la nuit et jusqu'au lever du jour que durant la journée, notamment au printemps austral (Tripovich et al., 2015).

Des enregistrements de baleines bleues pygmées d'Australie au large du Cap Leeuwin, au sud-ouest de l'Australie, ont révélé que leur rythme d'émission vocales diminuait la journée (Gavrilov and McCauley, 2013). Toutefois, ces auteurs ne différencient pas les périodes d'aube et de crépuscule, assimilées à la période nocturne. Au sud-est de l'Australie (au large de Portland), ces baleines sont vocalement plus actives entre midi et le début de soirée (Tripovich et al., 2015). Aucune information n'est, à ce jour, disponible sur le rythme nyctéméral des chants des populations de baleines bleues pygmées de Madagascar, de Nouvelle-Zélande et du Chili.

Toutes ces études montrent que majoritairement, le rythme d'émission des vocalisations stéréotypées de baleines bleues est plus élevés durant la nuit que pendant le jour (Tripovich et al., 2015; Gavrilov and McCauley, 2013; Clark and Fristrup, 1997; Wiggins et al., 2005; Oleson et al., 2007c; Lewis et al., 2018; Stafford et al., 2005), à l'exception de celui des baleines bleues Antarctique enregistrées dans l'océan Indien austral (Leroy et al., 2016) et des baleines bleues pygmées d'Australie au sud-est de ce continent (Tripovich et al., 2015). Certaines études soulignent aussi que le rythme nyctéméral des vocalisations peut varier d'une saison à l'autre.

Le patron journalier des vocalisations non-stéréotypées a seulement été étudié dans le golfe de Californie, aire d'alimentation des baleines bleues du Pacifique, c'est-à-dire pendant des périodes de chasse active. Le rythme d'émission des D-calls serait ainsi plus élevé durant la journée (Oleson et al., 2007c) ou au crépuscule (Lewis et al., 2018).

La plupart des auteurs font l'hypothèse que le rythme nyctéméral d'émission de vocalisations stéréotypées est lié à l'activité d'alimentation des baleines bleues (Stafford et al., 2005; Wiggins et al., 2005). Les vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées sont émises à des profondeurs allant de 10 à 50 m (Thode et al., 2000; Saddler et al., 2017; Lewis et al., 2018). Les baleines bleues peuvent cependant plonger jusqu'à 200 mètres de profondeur pour se nourrir sur des concentrations de krill (Alling et al., 1991; Croll et al., 1998; Lagerquist et al., 2000; Lewis et al., 2018). Lors de ces plongées profondes à but alimentaire, les activités vocales sont alors inexistantes et la diminution des détections de vocalisation durant la journée serait donc une conséquence directe de ces plongées d'alimentations profondes.

Dans l'océan Pacifique, le pic d'émission des vocalisations de baleines bleues semble coïncider avec la migration verticale des espèces d'euphasiacés dont elle se nourrissent *Euphausia pacifica* et *Thysanoëssa spinnifera* (Wiggins et al., 2005; Stafford et al., 2005; Oleson et al., 2007c). Le krill passe en effet la journée en profondeur et remonte vers la surface la nuit (Brinton, 1967; Genin et al., 1988). Wiggins et al. (2005) suggère alors que le taux d'émission des vocalisations est plus faible durant la journée, car les baleines bleues plongent à des profondeurs incompatibles avec leur activité vocale, pour se nourrir. Les taux d'émission plus élevés du crépuscule à l'aube indiqueraient alors que lors de ces périodes, les baleines bleues se trouvent principalement en surface, qu'elles s'y alimentent ou non.

Dans l'océan Indien, où le rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique est plus élevé le jour Leroy et al. (2016), les proies favorites des baleines bleues sont deux espèces de krill (*Euphausia vallentini* et *Euphausia frigida*) et des myctophydés (*Myctophum punctatum*) qui migrent vers la surface et forment des groupe plus denses et diversifiés la nuit (Atkinson et al., 1992; Hamame and Antezana, 2010; Duhamel et al., 2000). Le rythme d'émission vocal plus faible la nuit serait lors la conséquence de l'incompatibilité entre l'émission de chant et l'activité d'alimentation, même quand celle-ci à lieu en surface. Ces résultats sont cohérents avec les données historiques de chasse où les baleiniers relatent des observations de grandes baleines se nourrissant principalement soit tôt le matin, soit en soirée, avec une baisse générale de cette activité au cours de la journée (Ingebrigtsen, 1929; Nemoto, 1959, 1970). Toutefois, Oleson et al. (2007c) réfutent l'hypothèse que la variation nyctémérale d'émission des chants ait un lien avec la présence ou non de nourriture. De plus, dans le Pacifique, les unités A des chants de baleines bleues enregistrées seules, ont été associées à des comportements d'alimentation

(Lewis et al., 2018). Ces auteurs suggèrent par conséquent que la présence de D-calls est un meilleur indicateur d'un comportement d'alimentation que la diminution du rythme d'émission des chants.

Le lien entre le rythme nyctéméral de l'activité vocale et le comportement, possiblement d'alimentation, des baleines bleues reste donc un débat ouvert dans la communauté. Les explications avancées pour établir ce lien sont bien souvent complexes. Chez d'autres mysticètes, le rythme d'émission des vocalisations semble plus facile à interpréter et peut être un indicateur du comportement local des cétacés. Par exemple, sur une aire de reproduction au large d'Hawaii, le rythme d'émission vocale de petits rorquals ne présente pas de variations nyctémérales (Oswald et al., 2011) alors que sur une aire d'alimentation dans la baie du Massachusetts, leurs vocalisations sont principalement émises la nuit (Risch et al., 2013). Ces observations suggèrent une relation étroite entre activité d'alimentation (disponibilité des proies) et activité vocale.

Notre collection inédite de vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées offre l'opportunité d'en apprendre un peu plus sur le rythme nyctéméral vocal des baleines bleues Antarctique et pygmées de Madagascar et d'Australie à chaque point d'écoute du réseau OHASISBIO.

5.3 Méthodes

Deux échelles temporelles seront utilisées pour visualiser le rythme d'émission journalier des vocalisations de baleines bleues : (1) l'échelle de l'heure de la journée et (2) l'échelle du régime de lumière en utilisant l'approche de Leroy et al. (2016).

1. Le nombre quotidien de vocalisations par heure est calculé. Les résultats sont ensuite normalisés par le nombre moyen de détections par heure de la journée correspondante (Stafford et al., 2005; Wiggins et al., 2005), pour permettre une comparaison entre toutes les journées de l'année.
2. Le nombre quotidien de vocalisations par régime de lumière est calculé et divisé par la durée du régime de lumière du jour correspondant (qui varie en fonction de la période de l'année). Les résultats sont ensuite normalisés par le nombre moyen de détections par heure de la journée correspondante. Les heures de changement de régime de lumière proviennent du site de l'United States Naval Observatory Astronomical Applications Department (<http://aa.usno.navy.mil>). L'aube commence quand le soleil est à 12 degrés sous l'horizon et se termine au lever du soleil; le crépuscule commence au coucher du soleil et se termine quand le soleil est à plus de 12 degrés sous l'horizon. Les périodes de jour se trouvent entre le lever et le

coucher du soleil et les périodes de nuit s'étendent de la fin du crépuscule au début de l'aube.

Ces deux représentations sont calculées sur les journées où un nombre significatif de vocalisations a été détecté. Ceci permet de limiter la prise en compte d'éventuelles fausses détections et d'être plus représentatif du comportement acoustique des baleines bleues (en évitant, par exemple, de prendre en compte les vocalisations d'individus isolés passant brièvement à proximité des hydrophones). Les périodes de présence importante sont définies comme étant les semaines où le nombre de détections est supérieur au premier quartile des quantités hebdomadaires de détections sur l'année. La moyenne de ces résultats est ensuite calculée à chaque site sur toutes les années pour lesquelles des enregistrements sont disponibles, sans prendre en compte les journées sans détection.

Les vocalisations de baleines bleues Antarctique sont enregistrées presque toute l'année et sur tous les sites. Les rythmes d'émission ont donc dans un premier temps été calculés par période (*i.e.* été-automne, soit de décembre à mai et hiver-printemps, soit de juin à novembre). Les vocalisations de baleines bleues pygmées et les D-calls sont présents de façon très saisonnière, les variations nyctémérales des taux d'émission ont donc été calculés sur toute leur période de présence.

D'un point de vue statistique, la distribution des taux de vocalisations par régime de lumière n'est pas normale. Le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis servira alors à comparer les distributions entre les différents régimes de lumière. Dans le cas où l'hypothèse nulle pour laquelle il n'y a pas de différence significative entre les distributions des différents régimes de lumière est rejetée, un test de Wilcoxon est utilisé pour comparer les distributions deux à deux.

On notera enfin que pour les D-calls, seuls les résultats pour les sites WKER et ELAN sont présentés, car ce sont les seuls sites pour lesquels le nombre de détections est suffisamment important.

5.4 Résultats

La Figure 5.1 illustre à la fois la présence saisonnière et journalière des vocalisations de baleines bleues Antarctique, pygmée d'Australie, pygmée de Madagascar et D-calls enregistrés au site WKER en 2015. Si des patrons de présence saisonnière sont visuellement discernables (*e.g.* de juillet à novembre pour les baleines bleues Antarctique, en mars pour les baleines bleues pygmées d'Australie et durant le premier semestre pour les baleines bleues pygmées de Madagascar), aucun rythme journalier d'émission évident ne ressort. Pour des raisons de place, cette représentation complète des détections en fonction

de la saison et de la journée n'est pas présentée pour chacun des sites et pour chaque année. Leur examen n'a cependant révélé aucun rythme nycthéral particulier selon le site ou l'année. Pour compléter ces premières observations, les valeurs médianes et moyennes des rythmes d'émission par site sont donc présentées.

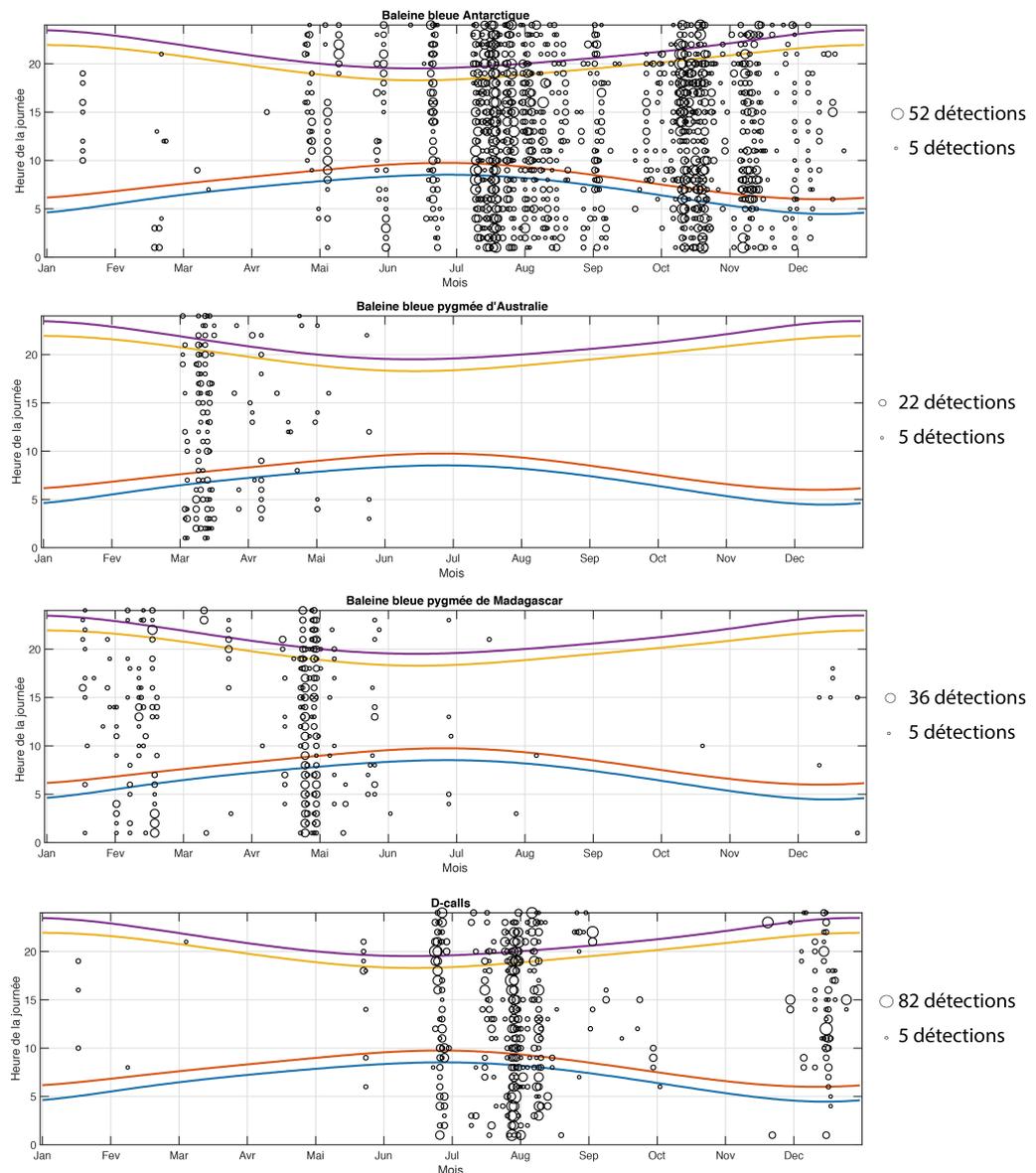


FIGURE 5.1 – Nombre de vocalisations stéréotypées de trois populations de baleines bleues et de D-calls par heure détectés chaque jour sur le site WKER en 2015. Les lignes bleue, orange, jaune et violet représente le début des différents régime de lumière (resp. aube, jour, crépuscule, nuit)

On notera qu'aucune différence significative n'a été observée entre les patrons journaliers d'émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique selon les saisons. Les résultats ont donc été calculés à partir des données de l'année complète. L'hypothèse nulle, que le taux d'émission des vocalisations est le même pour tous les régimes de lumière, est rejetée par le test de Kruskal-Wallis, pour les baleines bleues Antarctique à tous les sites sauf RTJ, MADW et NEAMS, uniquement à SWAMS pour les baleines bleues

pygmées d’Australie et à MADE et MADW pour les baleines bleues pygmées de Madagascar ($p > 0.001$ ou $KW < 15$; Tableau 5.1). Inversement pour tous les sites pour lesquels $p < 0.001$ ($KW > 15$), le taux d’émission des vocalisations en question diffère selon le régime de lumière.

TABLE 5.1 – Résultats des tests de Kruskal-Wallis pour le rythme nyctéméral des baleines bleues Antarctique et pygmées d’Australie et de Madagascar avec pour hypothèse nulle H_0 : il n’y a pas de différence significative du rythme d’émission des vocalisations en fonction du régime de lumière. KW est la valeur du test et p-val la probabilité de rejeter à tort l’hypothèse nulle ($KW < 15$ ou $p < 0.001$ indique qu’il est très peu probable que le rythme nyctéméral d’émission des vocalisations soit le même pour tous les régimes de lumière pour le site et la vocalisation considéré). Les X indiquent les sites auxquels les tests n’ont pas été effectués car le nombre de vocalisations détectées était trop faible.

	Antarctic BW		Australian PBW		Madagascan PBW		D-calls	
	KW	p-val	KW	p-val	KW	p-val	KW	p-val
RTJ	9	0.029	X	X	X	X	X	X
MADE	21.72	7.4 e-05	X	X	4.5	0.212	X	X
MAD	67.95	1.17 e-14	X	X	26.22	8.59 e-06	X	X
MADW	1.51	0.68	X	X	8.25	0.0411	X	X
NEAMS	12.7	0.0053	25.35	1.31 e-05	X	X	X	X
SSEIR	59.83	6.39 e-13	X	X	45.99	5.69 e-10	X	X
NCRO	87.21	8.72 e-19	X	X	20.7	0.0001	X	X
SWAMS	29.45	1.80e-06	14.1	0.0028	58.31	1.35 e-12	X	X
WKER	64.61	6.06 e-14	165.16	1.41 e-35	121.5	3.67 e-26	224.62	2.01 e-48
ELAN	51.25	4.12 e-11	X	X	29.13	2.11 e-06	31.99	5.25 e-07

Pour les baleines bleues Antarctique, la Figure 5.2 montre une variation du rythme d’émission des vocalisations en fonction de l’heure de la journée similaires aux sites MAD, MADE, SSEIR, NCRO et WKER. Le rythme d’émission est plus élevé durant la journée et moindre durant la nuit, augmentant durant l’aube et diminuant durant le crépuscule. Aux sites RTJ, MADW et NEAMS, le rythme d’émission est plus élevé durant le crépuscule. Ces différences diurnes et nocturnes sont visibles sur la Figure 5.3 et le test de Wilcoxon (cf. Tableau 5.5) montre qu’à tous les sites sauf à MADE et ELAN, les distributions des rythmes d’émissions de vocalisations diurnes et nocturnes sont significativement différentes ($p < 8e - 05$), avec en moyenne plus de vocalisations enregistrées le jour que la nuit. En outre, ce test indique que les rythmes d’émission pendant l’aube et le crépuscule ne sont pas significativement différents ($p > 0.001$).

Pour les baleines bleues pygmées d’Australie, aucun patron évident de rythme d’émission journalier ne ressort (Figure 5.4). La Figure 5.5 montre qu’il n’y a pas de différence entre les rythmes diurnes et nocturnes, mais il est plus compliqué de conclure pour les régimes d’aube et de crépuscule. Le tableau 5.4 confirme l’absence de différence significatives entre les rythmes d’émission le jour et la nuit ($p > 0.01$).

Pour les baleines bleues pygmées de Madagascar, le rythme d'émission semble plus élevé à l'aube et au crépuscule à MAD, uniquement à l'aube à NCRO et ELAN et uniquement au crépuscule à SSEIR et MADE alors qu'aucun patron évident ne se dessine à WKER, NEAMS et SWAMS (Figure 5.6). La Figure 5.7 montre aussi que les rythmes d'émission diurnes et nocturnes ainsi que ceux de l'aube et du crépuscule sont similaires. Les tests de Wilcoxon confirment que les rythmes diurnes et nocturnes ne sont pas significativement différents, et cela à tous les sites (Tableau 5.4).

Pour les D-calls, le rythme moyen d'émission ne semble pas varier durant la journée, à part au crépuscule où il semble légèrement plus élevé (cf. Figure 5.8). La Figure 5.9 nuance cette observation avec une distribution des rythmes d'émission assez faible lors du crépuscule, mais la moyenne reste élevée, à cause de quelques valeurs extrêmes de taux d'émission.

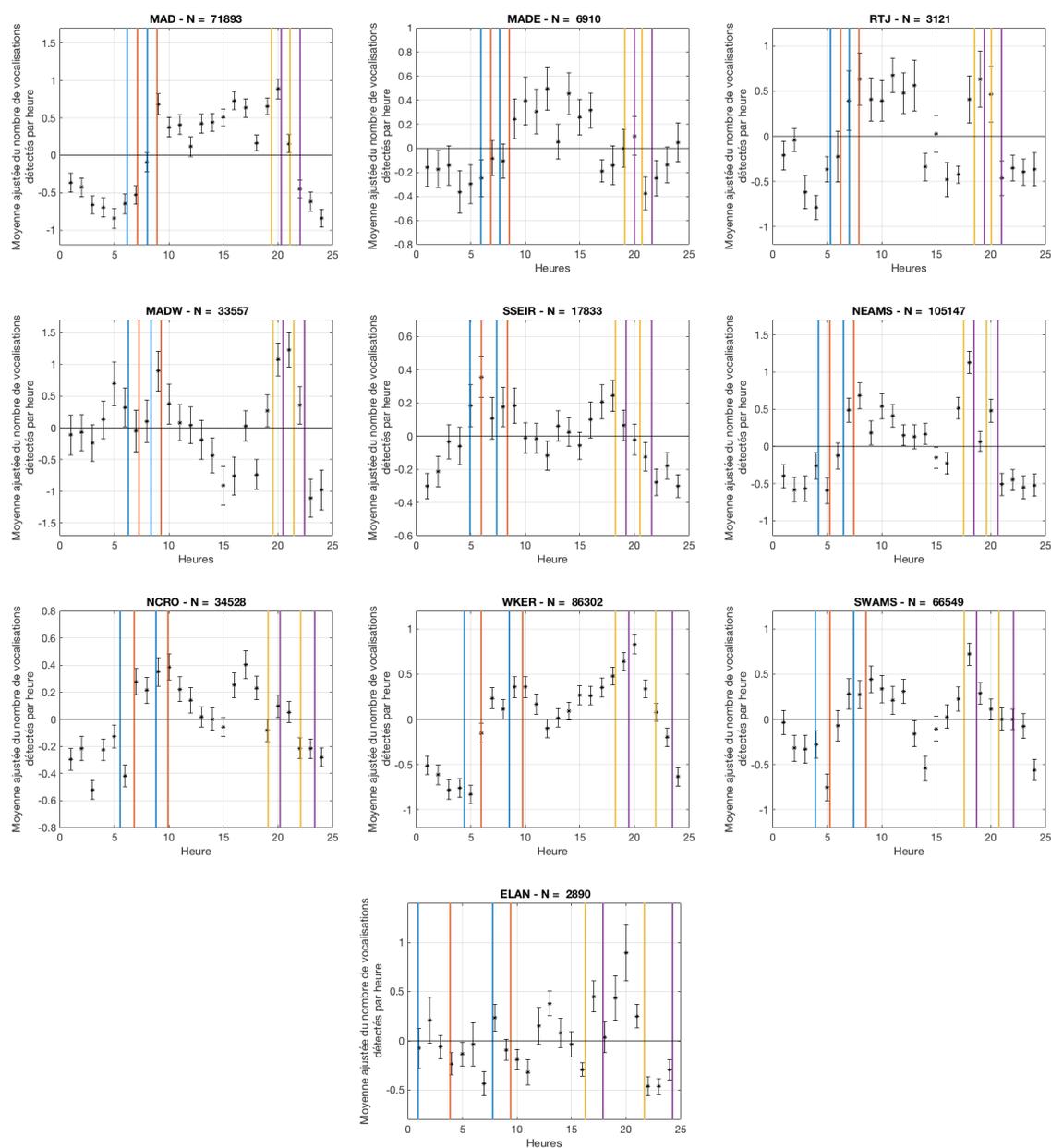


FIGURE 5.2 – Moyennes ajustées et erreurs types des rythmes d’émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique pour chaque heure de la journée. Les lignes verticales correspondent aux heures de début de l’aube (bleu), du lever du jour (orange), du début du crépuscule (jaune) et début de la nuit (violet) pour les jours le plus long et le plus court de l’année.

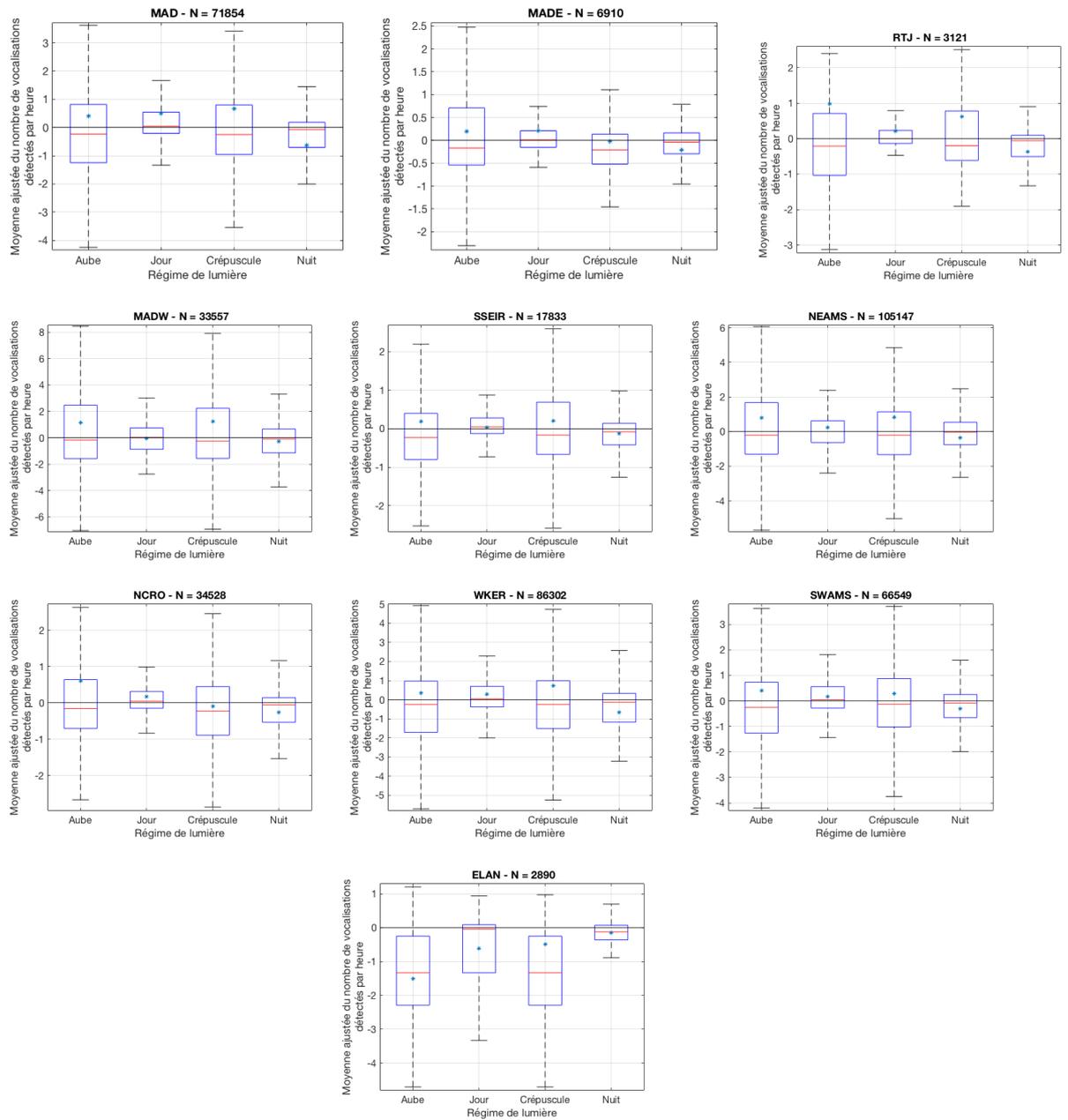


FIGURE 5.3 – Diagramme en boîtes à moustache des moyennes ajustées du nombre de vocalisations de baleines bleues Antarctique détectées par heure pour chaque régime de lumière. Les traits horizontaux rouges représentent la valeur médiane et la croix bleue la moyenne. Les limites hautes et basses des boîtes bleues indiquent les 25ème et 75ème percentiles. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs extrêmes non considérées comme aberrantes. Ces dernières sont nombreuses et ne sont pas représentées ici pour une meilleure lisibilité des figures.

TABLE 5.2 – Résultats du test de la somme des rangs de Wilcoxon avec pour hypothèse nulle H_0 : il n’y a pas de différence significative du rythme d’émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique en fonction du régime de lumière. W est la valeur du test et p la probabilité de rejeter à tort l’hypothèse nulle. (*i.e.* $p < 0.001$ indique qu’il est très peu probable que le rythme nyctéméral d’émission des vocalisations soit le même pour les 2 régimes de lumière pour le site et la vocalisation considérés.)

	Wilcoxon pairwise comparison test between	W	p
MADE	Dawn/Day	25 4020	1.10 e-3e
	Dawn/Dusk	28 762	0.610
	Dawn/Night	26 899	0.114
	Day/Dusk	32 261	9.02 e-06
	Day/Night	30 051	0.050
	Dusk/Night	26 022	0.0102
MAD	Dawn/Day	349 540	2.59 e-11
	Dawn/Dusk	389 480	0.672
	Dawn/Night	382 440	0.128
	Day/Dusk	435 627	1.12 e-11
	Day/Night	433 430	1.13 e-10
	Dusk/Night	383 181	0.159
SSEIR	Dawn/Day	164 300	2.62 e-12
	Dawn/Dusk	185 919	0.237
	Dawn/Night	179 844	4.90 e-3
	Day/Dusk	210 131	9.86 e-08
	Day/Night	211 612	1.02 e-08
	Dusk/Night	185 834	0.228
NCRO	Dawn/Day	370 670	9.65 e-11
	Dawn/Dusk	427 170	4.41 e-02
	Dawn/Night	407 560	0.351
	Day/Dusk	471 357	5.21 e-18
	Day/Night	458 050	2.94 e-11
	Dusk/Night	393 710	2.60 e-03
SWAMS	Dawn/Day	263 530	2.78 e-07
	Dawn/Dusk	280 330	6.56 e-02
	Dawn/Night	278 520	2.81 e-02
	Day/Dusk	305 063	2.60 e-03
	Day/Night	309 910	7.39 e-05
	Dusk/Night	290 060	0.9459
WKER	Dawn/Day	573 960	5.85 e-11
	Dawn/Dusk	625 571	0.357
	Dawn/Night	632 440	0.864
	Day/Dusk	686 475	1.06 e-08
	Day/Night	700 410	4.49 e-13
	Dusk/Night	641 270	0.429
ELAN	Dawn/Day	573 960	3.79 e-05
	Dawn/Dusk	625 571	0.839
	Dawn/Night	632 440	4.19 e-09
	Day/Dusk	686 475	3.86 e-05
	Day/Night	700 410	0.7705
	Dusk/Night	641 270	3.69 e-09

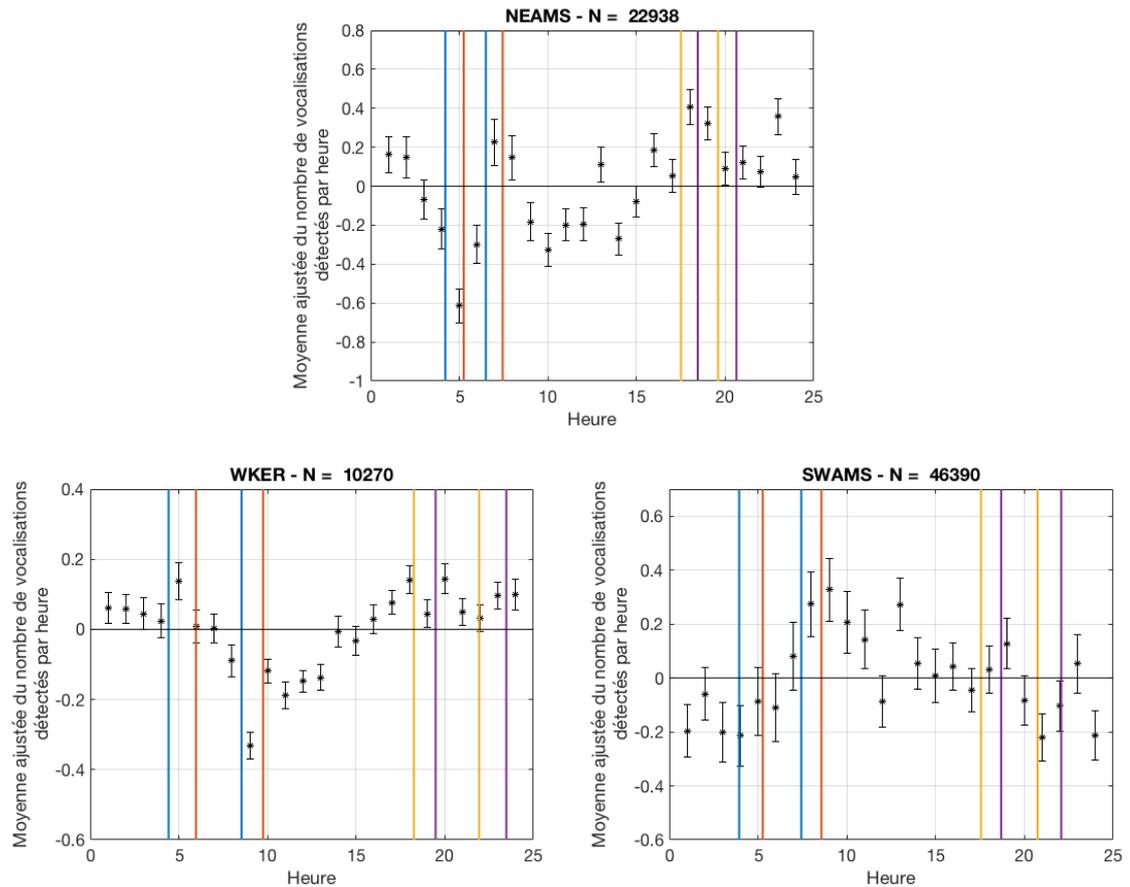


FIGURE 5.4 – Moyennes ajustées et erreurs types des rythmes d'émission des vocalisations de baleines bleues pygmées d'Australie pour chaque heure de la journée. Les lignes verticales correspondent aux heures de début de l'aube (bleu), lever du jour (orange), début du crépuscule (jaune) et début de la nuit (violet) pour les jours le plus long et le plus court de l'année.

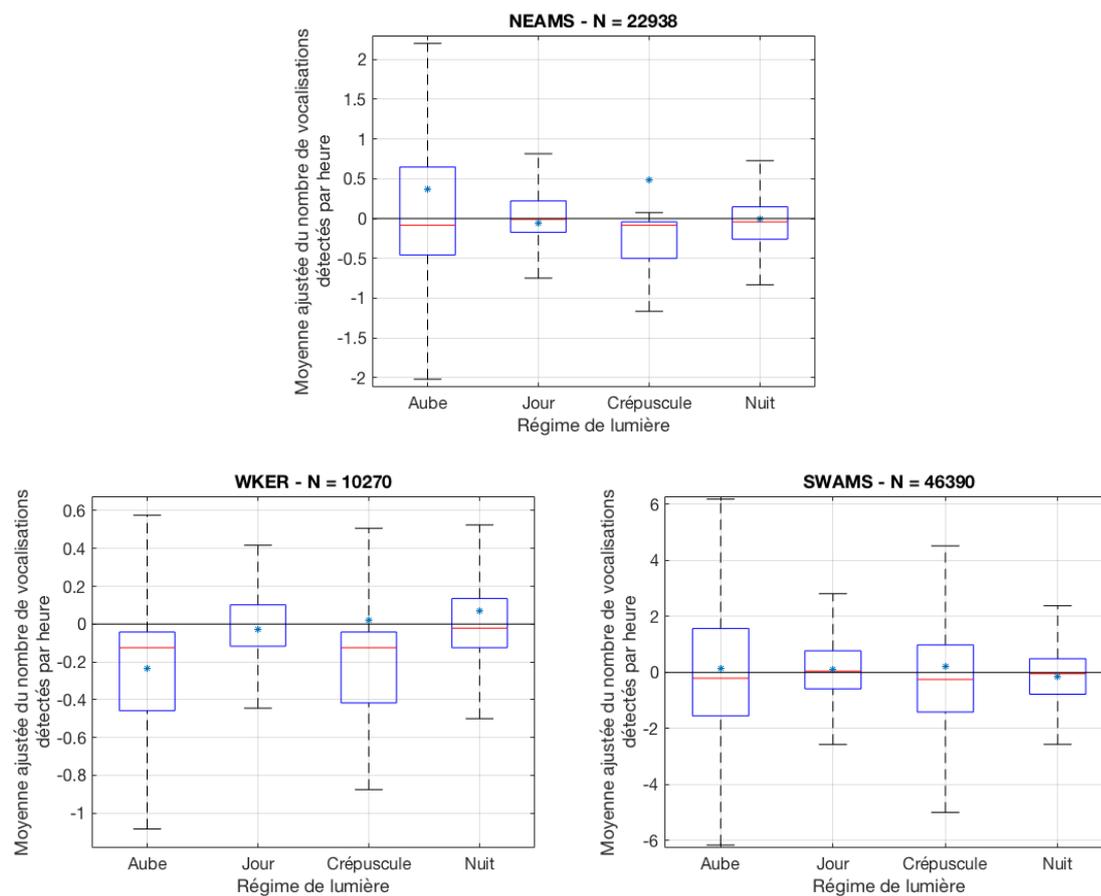


FIGURE 5.5 – Diagramme en boîtes à moustache des moyennes ajustées du nombre de vocalisations de baleines bleues pygmées d’Australie détectées par heure pour chaque régime de lumière. Les traits horizontaux rouges représentent la valeur médiane et la croix bleue la moyenne. Les limites hautes et basses des boîtes bleues indiquent les 25ème et 75ème percentiles. Les moustaches s’étendent jusqu’aux valeurs extrêmes non considérées comme aberrantes. Ces dernières sont nombreuses et ne sont pas représentées ici pour une meilleure lisibilité des figures.

TABLE 5.3 – Résultats du test de la somme des rangs de Wilcoxon avec pour hypothèse nulle H0 : il n'y a pas de différence significative du rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues pygmées d'Australie en fonction du régime de lumière. W est la valeur du test et p la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle. (*i.e.* $p < 0.001$ indique qu'il est très peu probable que le rythme nyctéméral d'émission des vocalisations soit le même pour les 2 régimes de lumière pour le site et la vocalisation considérés.)

	Wilcoxon pairwise comparison test between	W	p
NEAMS	Dawn/Day	93 335	1.50 e-03
	Dawn/Dusk	102 800	0.347
	Dawn/Night	96 527	7.31 e-02
	Day/Dusk	111 730	1.41 e-06
	Day/Night	104 810	7.10 e-02
	Dusk/Night	93 335	1.50 e-03
SWAMS	Dawn/Day	211 230	9.40 e-03
	Dawn/Dusk	223 607	0.714
	Dawn/Night	218 032	0.333
	Day/Dusk	236 800	4.23 e-04
	Day/Night	231 900	1.86 e-02
	Dusk/Night	215 240	0.102
WKER	Dawn/Day	201 130	8.51 e-23
	Dawn/Dusk	240 590	0.297
	Dawn/Night	202 538	1.79 e-21
	Day/Dusk	283 740	1.11 e-17
	Day/Night	243 920	0.764
	Dusk/Night	208 048	1.15 e-16

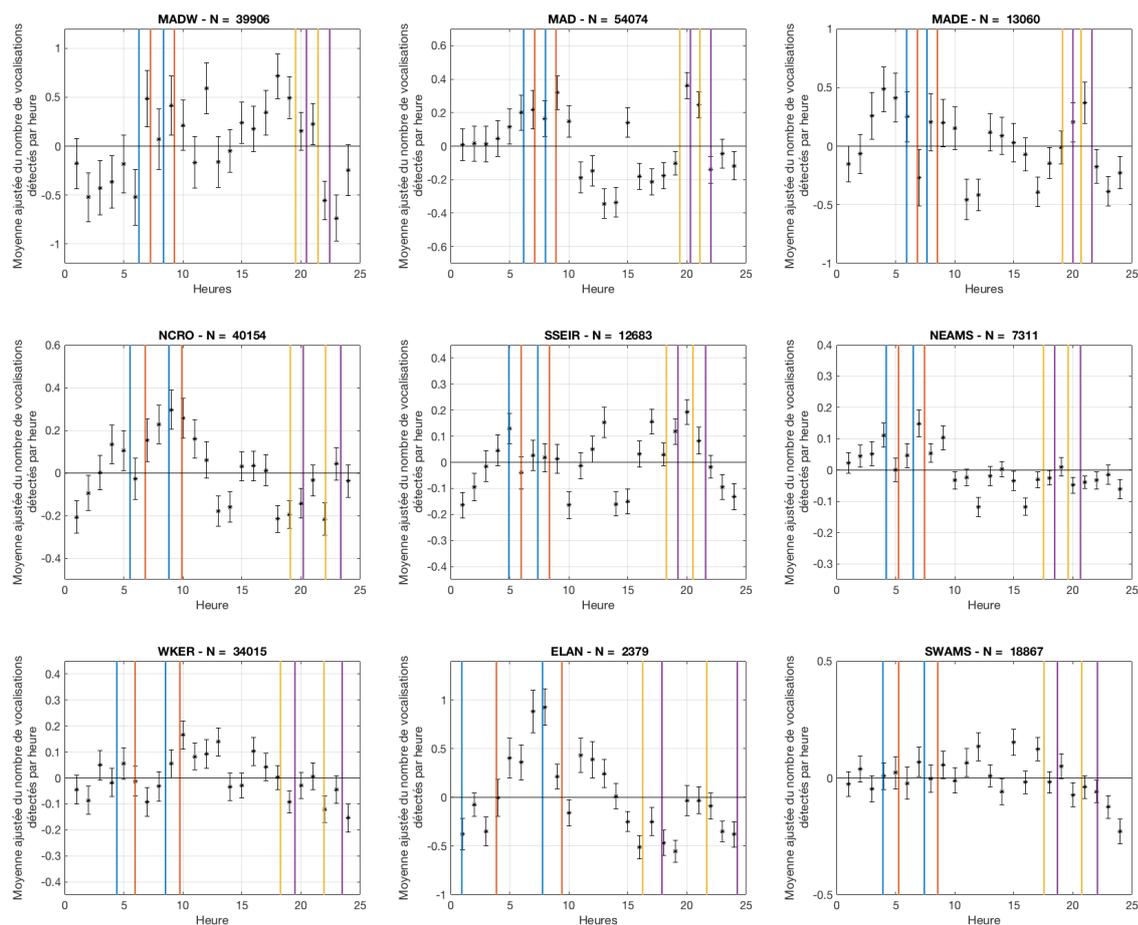


FIGURE 5.6 – Moyennes ajustées et erreurs types des rythmes d’émission des vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar pour chaque heure de la journée. Les lignes verticales correspondent aux heures de début de l’aube (bleu), du lever du jour (orange), du début du crépuscule (jaune) et du début de la nuit (violet) pour les jours le plus long et le plus court de l’année.

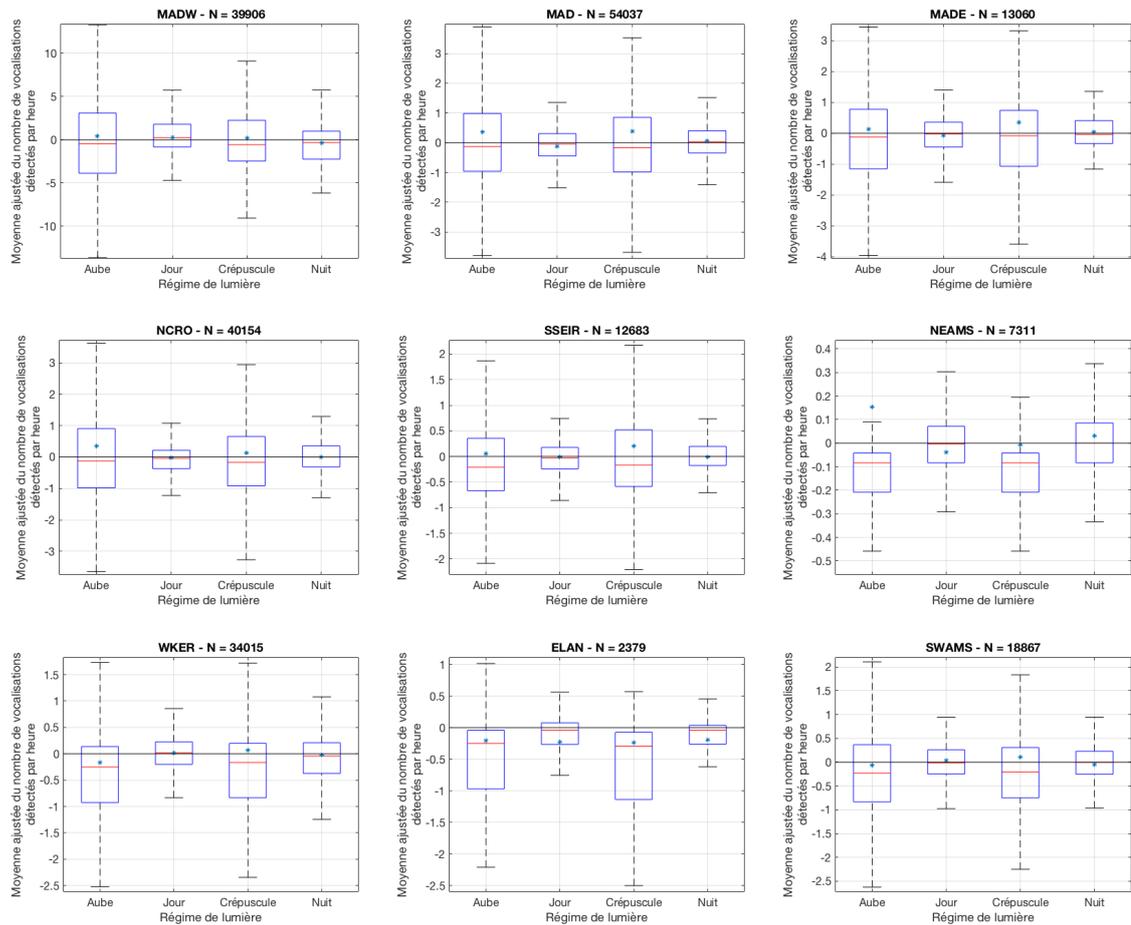


FIGURE 5.7 – Diagramme en boîtes à moustache des moyennes ajustées du nombre de vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar détectées par heure pour chaque régime de lumière. Les traits horizontaux rouges représentent la valeur médiane et la croix bleue la moyenne. Les limites hautes et basses des boîtes bleues indiquent les 25ème et 75ème percentiles. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs extrêmes non considérées comme aberrantes. Ces dernières sont nombreuses et ne sont pas représentées ici pour une meilleure lisibilité des figures.

TABLE 5.4 – Résultats du test de la somme des rangs de Wilcoxon avec pour hypothèse nulle H_0 : il n’y a pas de différence significative du rythme d’émission des vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar en fonction du régime de lumière. W est la valeur du test et p la probabilité de rejeter à tort l’hypothèse nulle. (*i.e.* $p < 0.001$ indique qu’il est très peu probable que le rythme nyctéméral d’émission des vocalisations soit le même pour les 2 régimes de lumière pour le site et la vocalisation considérés.)

	Wilcoxon pairwise comparison test between	W	p
MAD	Dawn/Day	360 401	5.10 e-02
	Dawn/Dusk	378 150	0.350
	Dawn/Night	351 294	6.01 e-04
	Day/Dusk	391 890	1.50 e-03
	Day/Night	359 110	3.07 e-02
	Dusk/Night	343 859	3.49 e-06
SSEIR	Dawn/Day	166 960	5.47 e-06
	Dawn/Dusk	178 676	0.192
	Dawn/Night	161 459	1.31 e-09
	Day/Dusk	194 159	2.90 e-03
	Day/Night	176 640	6.17 e-02
	Dusk/Night	167 020	5.96 e-06
NCRO	Dawn/Day	351 360	2.32 e-02
	Dawn/Dusk	369 565	0.463
	Dawn/Night	348 341	5.60 e-03
	Day/Dusk	385 585	7.35 e-04
	Day/Night	357 090	0.186
	Dusk/Night	341 420	9.23 e-05
SWAMS	Dawn/Day	210 880	5.22 e-09
	Dawn/Dusk	233 110	0.447
	Dawn/Night	212 710	5.87 e-08
	Day/Dusk	259 724	1.03 e-07
	Day/Night	238 210	0.686
	Dusk/Night	214 997	9.59 e-07
WKER	Dawn/Day	510 679	1.29 e-20
	Dawn/Dusk	580 780	0.208
	Dawn/Night	532 431	9.65 e-12
	Day/Dusk	663 630	1.52 e-16
	Day/Night	616 640	4.30 e-03
	Dusk/Night	542 469	1.52 e-08
ELAN	Dawn/Day	573 960	1.30 e-03
	Dawn/Dusk	625 571	5.80 e-03
	Dawn/Night	632 440	3.06 e-04
	Day/Dusk	686 475	9.50 e-05
	Day/Night	700 410	0.934
	Dusk/Night	641 270	1.17 e-05

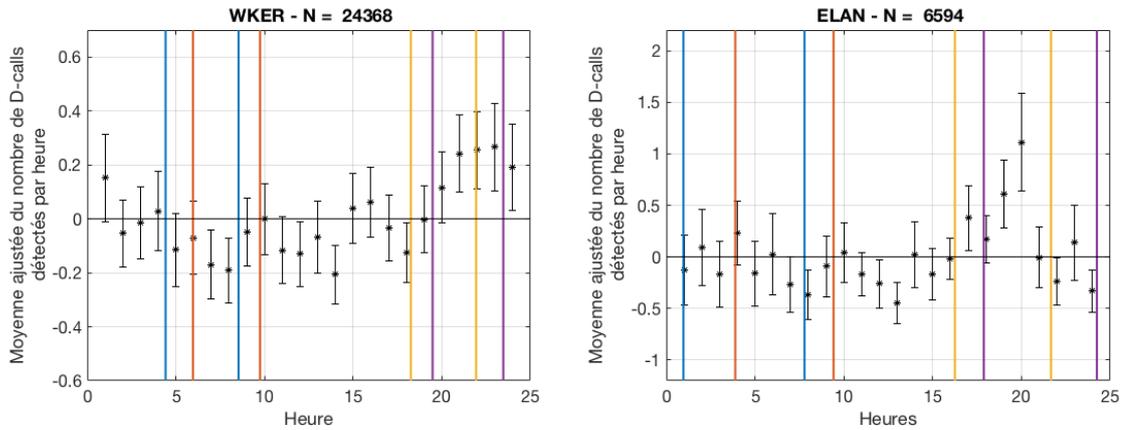


FIGURE 5.8 – Moyennes ajustées et erreurs types des rythmes d'émission des D-calls pour chaque heure de la journée. Les lignes verticales correspondent aux heures de début de l'aube (bleu), du lever du jour (orange), du début du crépuscule (jaune) et du début de la nuit (violet) pour les jours le plus long et le plus court de l'année.

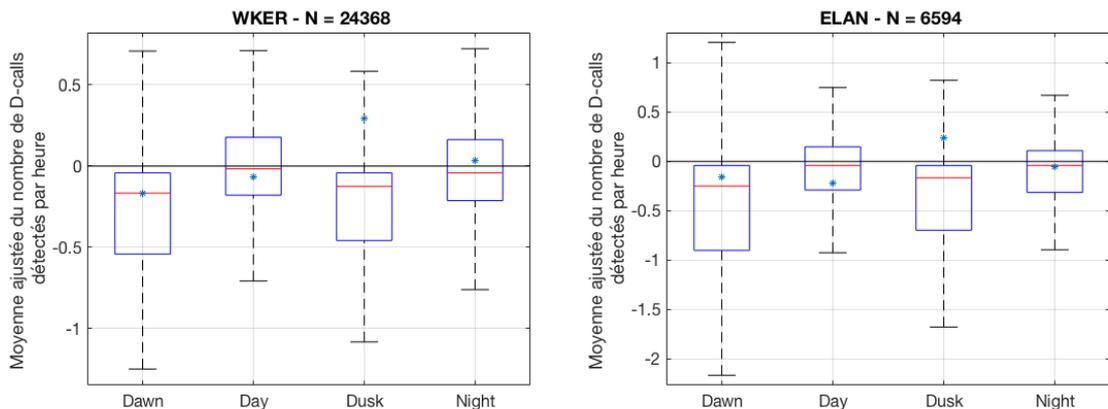


FIGURE 5.9 – Diagramme en boîtes à moustache des moyennes ajustées du nombre de D-calls détectés par heure pour chaque régime de lumière. Les traits horizontaux rouges représentent la valeur médiane et la croix bleue la moyenne. Les limites hautes et basses des boîtes bleues indiquent les 25ème et 75ème percentiles. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs extrêmes non considérées comme aberrantes. Ces dernières sont nombreuses et ne sont pas représentées ici pour une meilleure lisibilité des figures.

TABLE 5.5 – Résultats du test de la somme des rangs de Wilcoxon avec pour hypothèse nulle H_0 : il n’y a pas de différence significative du rythme d’émission des D-calls en fonction du régime de lumière. W est la valeur du test et p la probabilité de rejeter à tort l’hypothèse nulle. (*i.e.* $p < 0.001$ indique qu’il est très peu probable que le rythme nyctéméral d’émission des vocalisations soit le même pour les 2 régimes de lumière pour le site et la vocalisation considérés.)

	Wilcoxon pairwise comparison test between	W	p
WKER	Dawn/Day	667 486	9.96 e-38
	Dawn/Dusk	769 253	3.33 e-04
	Dawn/Night	680 630	2.42 e-31
	Day/Dusk	904 990	1.92 e-18
	Day/Night	820 350	0.290
	Dusk/Night	724 905	2.581 e-06
ELAN	Dawn/Day	29 332	2.67 e-05
	Dawn/Dusk	32 665	0.365
	Dawn/Night	29 112	9.95 e-06
	Day/Dusk	37 133	4.46 e-04
	Day/Night	33 777	0.846
	Dusk/Night	29 845	2.21 e-04

5.5 Discussion

Les résultats confirment ceux de Leroy et al. (2016), à savoir que dans l'océan Indien, le rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique est légèrement plus élevé durant la journée que durant la nuit. Ces observations contrastent avec celles de l'océan Pacifique, où les baleines bleues émettent des chants principalement la nuit (Stafford et al., 2005; Wiggins et al., 2005; Clark and Fristrup, 1997). Durant la journée, le krill, principale source d'alimentation des baleines bleues, se trouve à des profondeurs auxquelles les baleines bleues ne vocalisent pas, ou peu (Aroyan et al., 2000; Thode et al., 2000), alors qu'il remonte en surface durant la nuit. La baisse du taux d'émission diurne dans le Pacifique traduirait un rythme de plongée des baleines accru la journée, pour se nourrir sur les bancs de krill en profondeur (Stafford et al., 2005). Dans l'océan Indien, le taux plus élevé de vocalisations de baleines bleues Antarctique durant la nuit suggère une stratégie d'alimentation différente. A l'instar de baleines bleues observées le long des côtes australiennes (Gill, 2002), les baleines bleues Antarctique se nourriraient principalement sur des bancs de krill, proches de la surface durant la nuit. Cette conclusion serait cohérente avec l'observation des baleiniers, mentionnée en introduction, décrivant des baleines se nourrissant principalement soit tôt le matin, soit en soirée, et moins la journée (Ingebrigtsen, 1929; Nemoto, 1959, 1970). Il faudrait toutefois être sûr qu'il s'agissait bien de baleines bleues Antarctique. Il est de toute façon probable que la stratégie d'alimentation des baleines bleues change en fonction de l'abondance et de l'accessibilité des proies. Là où le krill est abondant et proche de la surface la nuit, elles chassent préférentiellement la nuit et vocalisent en journée. Là où la ressource est toujours accessible (zones peu profondes, proximité des côtes), elles chassent le jour et vocalisent la nuit.

Chez les petits rorquals, le rythme d'émission varie avec le régime de lumière dans les aires d'alimentation (Risch et al., 2013) et ne varie pas dans les aires de reproduction (Oswald et al., 2011). Dans l'océan Indien, les aires de reproduction des baleines bleues sont encore mal cernées, mais se situent vraisemblablement dans les régions subtropicales. Les différences non-significatives du rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique aux sites RTJ, MADW et NEAMS, tous situés au nord de 30° S, pourraient alors être des indicateurs d'aires de reproduction où les baleines vocaliseraient quelles que soient les conditions de lumière. Le patron journalier très marqué au site MAD, situé aux mêmes latitudes fragilise tout-de-même cette observation.

Au vu de la Figure 5.1 (a), il n'est pas vraiment évident de conclure de façon simple et univoque sur le rythme nyctéméral vocal des baleines bleues Antarctique, et cela sur l'ensemble des sites d'écoute. Cette constatation est encore plus vraie pour les baleines bleues pygmées pour lesquelles aucune tendance significative ne se dégage entre les rythmes d'émission diurne et nocturne (Figures 5.5 et 5.7 et Tableaux 5.3 et 5.4).

Cette quasi absence de variations suggère que dans l'océan Indien, le rythme d'émission des chants en fonction du régime de lumière n'est pas un indicateur probant du comportement (alimentation ou reproduction) ou de la stratégie d'alimentation des baleines bleues.

Comme suggéré par Oleson et al. (2007c), la présence des D-calls dans les enregistrements semble un meilleur indicateur du comportement d'alimentation (Oleson et al., 2007b; Lewis et al., 2018; Miller et al., 2019). Dans l'océan Indien, ceux-ci sont en effet majoritairement détectés sur les sites situés dans les zones productives sub-antarctiques (WKER et ELAN, voir chapitre 4). Le rythme moyen plus élevé d'émission des D-calls au crépuscule aux deux sites suggère alors que l'activité d'alimentation est plus importante à cette période, qui coïncide avec la remontée du krill en surface. Ce résultat corrobore aussi les observations des baleiniers que les baleines bleues se nourrissent principalement durant les périodes d'aube et de crépuscule.

Pour conclure, les variations du rythme d'émission dans la journée observés dans l'océan Indien ont une amplitude similaire à celles présentées dans la littérature et sont assez faibles comparées à d'autres espèces de mysticètes, pour lesquelles le patron nyctéméral d'émissions vocales est bien marqué (*e.g.* Mellinger et al., 2007; Baumgartner et al., 2008; Oswald et al., 2011; Risch et al., 2013)). Mesurer ces rythmes ajoute donc ici très peu d'informations sur le comportement de ces animaux dans l'océan Indien austral. Des données complémentaires, comme des profils de plongée, seraient sûrement plus pertinentes pour appréhender la question des stratégies d'alimentation des baleines bleues dans l'océan Indien austral. Cette étude souligne *in fine* le manque de connaissance sur la fonction première des vocalisations des baleines bleues et la raison de leur disparité entre zones géographiques et entre populations.

Chapitre 6

Evolution du bruit ambiant et contribution temporelle des tirs de canons à air au paysage acoustique

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, le bruit ambiant est défini comme l'ensemble des signaux sonores n'émanant pas des baleines bleues. Dans les basses fréquences ($<120\text{Hz}$), les sources naturelles de bruit sont principalement les autres espèces de grandes baleines (*e.g.* rorquals communs), les événements sismiques, les craquements d'icebergs et l'état de la mer. Les sources de bruit anthropiques sont essentiellement générées par le trafic maritime et la prospection pétrolière (*i.e.* tirs sismiques). Connaître l'évolution du niveau de bruit au cours du temps et selon les régions permet de replacer les détections des vocalisations de baleines bleues dans leur contexte et de les interpréter de façon plus avertie. Par exemple, si le nombre de vocalisations détectées une année est moindre, c'est peut-être parce que les niveaux de bruit ambiant sont plus élevés que la normale. Mesurer les variations temporelles et géographiques du bruit ambiant permet aussi de comparer les sites et les périodes en termes de pression acoustique. En France, la loi du 12 juillet 2010 du code de l'environnement reconnaît le bruit sous-marin comme une pollution, au même titre que la pollution chimique par exemple. Dès lors, quantifier la contribution des sources, et particulièrement des sources anthropiques, est un moyen de définir des régions critiques, exposées à de fortes nuisances sonores. Même si des niveaux de bruit élevés ont sans aucun doute des effets sur la faune sous-marine, l'importance de cet impact reste une question complexe qui demandera encore de nombreux travaux pour y répondre.

Ce chapitre présente dans un premier temps l'évolution du bruit ambiant dans l'océan

Indien de 2010 à 2018, mesuré à partir des enregistrements du réseau OHASISBIO. Ces mesures seront comparées avec des observations faites dans d'autres régions du globe et avec les résultats de présence acoustique des baleines bleues, décrites dans les chapitres précédents. Une deuxième partie sera plus particulièrement consacrée à la contribution des tirs sismiques au bruit ambiant. Ces deux volets ont fait l'objet d'une présentation à la 179ème réunion de la Société Américaine d'Acoustique en décembre 2019 à San Diego.

6.2 Evolution du bruit ambiant dans l'océan Indien austral de 2010 à 2018

6.2.1 Méthodes

Pour être ici pertinente, la mesure du niveau de bruit ambiant se fera dans une bande de fréquences dans laquelle il n'y a aucune vocalisation de baleine bleue (Antarctique ou pygmée). La Figure 6.1 représente la densité spectrale de puissance des données enregistrées au site SWAMS en 2012 et 2013 (Tsang-Hin-Sun et al., 2015). Les pics d'énergie à 18-28 Hz, 35 Hz et 70 correspondent aux fréquences des vocalisations de baleines bleues Antarctique et pygmées de Madagascar et d'Australie respectivement. La bande de fréquences 40-60 Hz située entre ces pics servira donc à observer l'évolution du bruit ambiant au cours du temps. Cette bande est classiquement utilisée pour quantifier l'évolution du bruit ambiant basse fréquence (*e.g.*(Miksis-Olds and Nichols, 2016)).

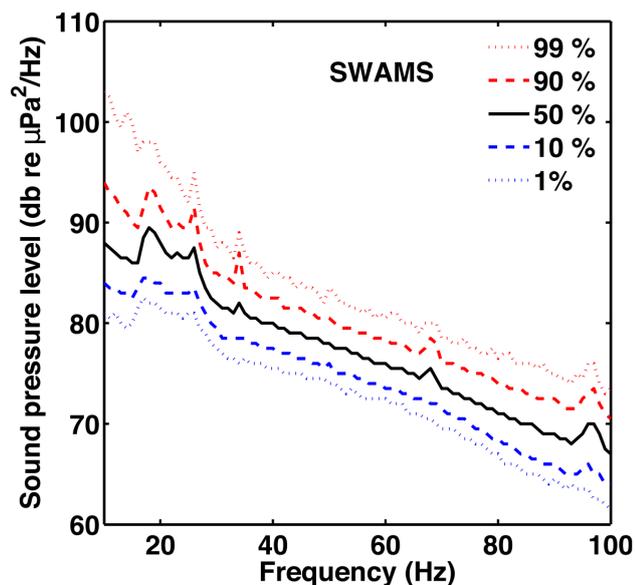


FIGURE 6.1 – Distribution des niveaux de bruit pour différents percentiles moyennés sur les enregistrements de SWAMS en 2012 et 2013, d'après Tsang-Hin-Sun et al. (2015)

La densité spectrale de puissance est estimée pour chaque fichier d'enregistrement

(d'une durée de 6h28) à l'aide de la fonction *pwelch* de MATLAB sur une fenêtre de 200 secondes et avec une résolution fréquentielle de 0.1 Hz. Puis pour chaque jour, une valeur médiane de niveau de bruit est calculée dans la bande de fréquences 40-60 Hz (en dB ref $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^2$). Enfin, ces amplitudes sont lissées par une moyenne glissante sur 20 jours.

6.2.2 Résultats

La Figure 6.3 présente l'évolution du niveau de bruit entre 40 et 60 Hz sur tous les sites du réseau OHASISBIO (dBref $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^2$). Pour permettre une meilleure visualisation, les Figures 6.2 et 6.4 reprennent ces valeurs, avec respectivement les sites dont les séries d'enregistrements sont les plus longues et continues (plus de deux ans, sauf pour SSWIR, qui remplace l'hydrophone de NCRO), et les nouveaux sites installés en 2017.

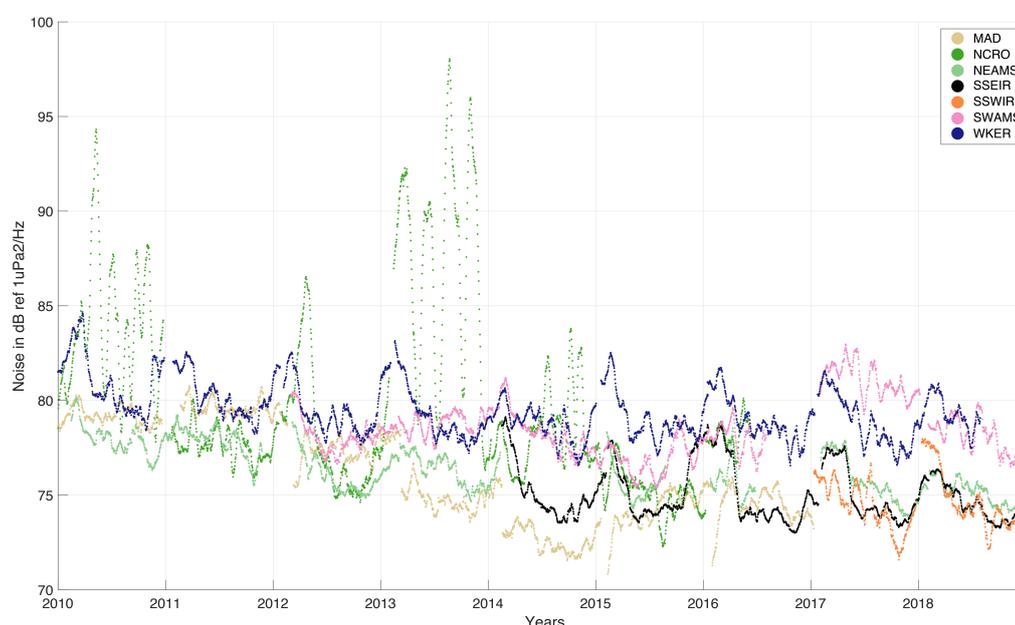


FIGURE 6.2 – Niveaux de bruit dans la bande de fréquences 40-60 Hz des données long terme OHASISBIO de 2010 à 2018.

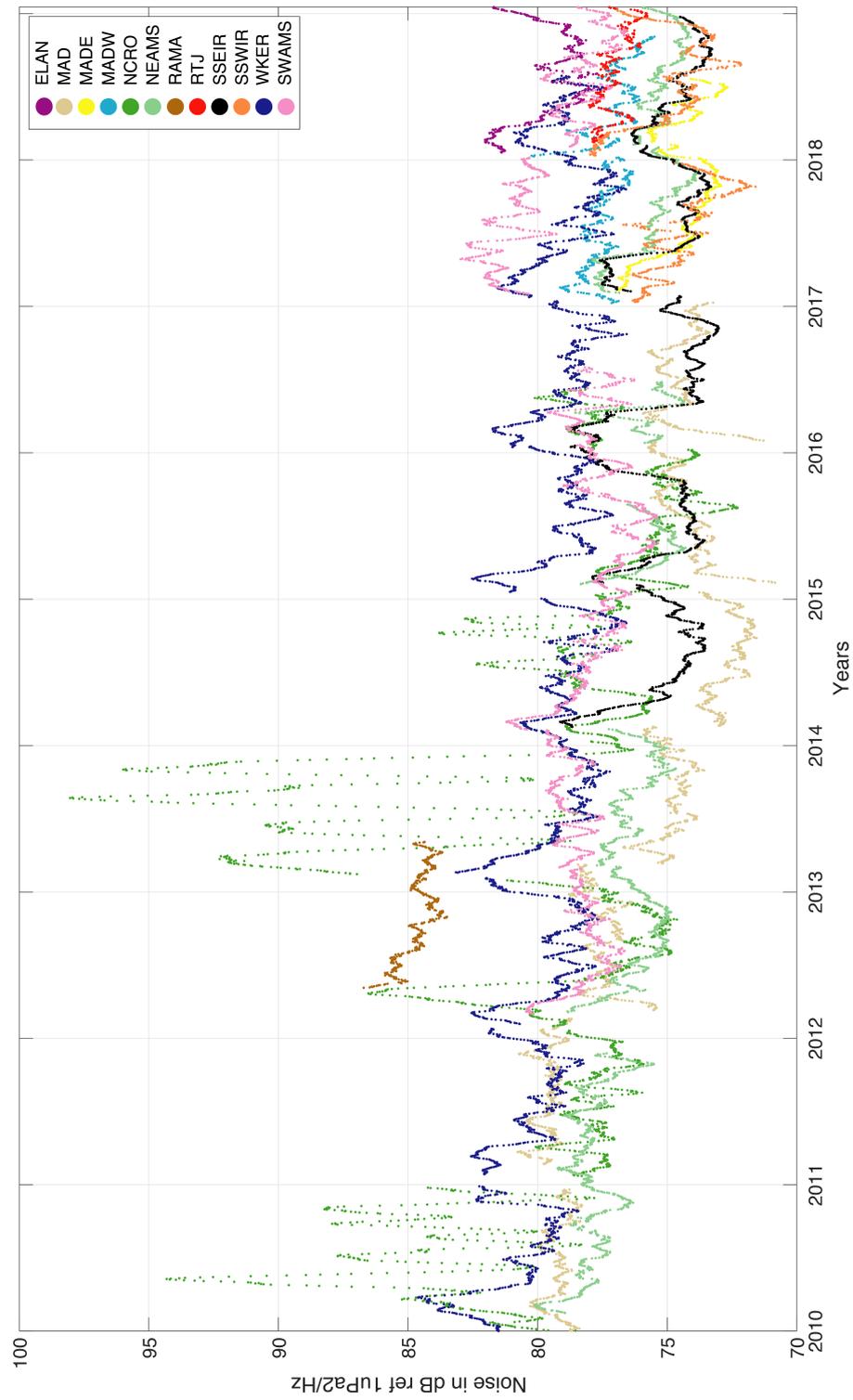


FIGURE 6.3 – Niveaux de bruit dans la bande de fréquences 40-60 Hz des données OHASISBIO de 2010 à 2018.

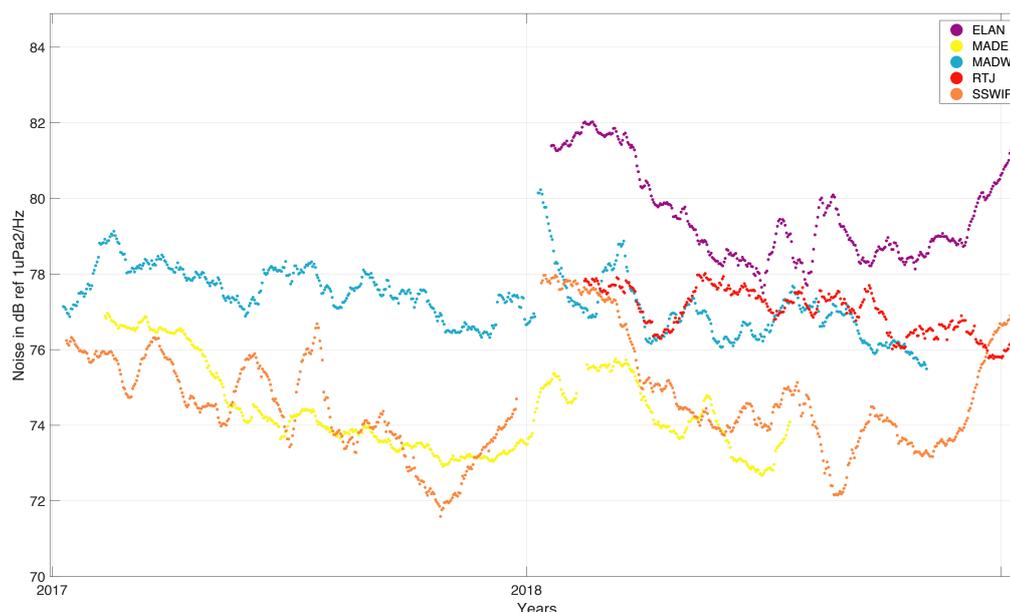


FIGURE 6.4 – Niveaux de bruit dans la bande de fréquences 40-60 Hz des données des nouveaux sites OHASISBIO de 2017 à 2018.

Les écarts qui apparaissent parfois entre deux années d’enregistrement consécutives (*e.g.* aux sites WKER entre 2014 et 2015 ou SSWIR entre 2017 et 2018) viennent du fait que la moyenne glissante s’interrompt d’une année à la suivante. En général, ces écarts sont imperceptibles. La seule exception concerne le site MAD pour lequel les valeurs moyennes de bruit semblent diminuer par paliers tous les ans entre 2011 et 2014 ; en 2015 et 2016, les niveaux en début d’année sont très bas par rapport au reste de l’année. Ces phénomènes apparaissent aussi sur les valeurs non lissées de niveau de bruit (*cf.* Figure 6.5), sur laquelle chaque point représente le niveau de bruit moyen sur une journée). Au site MAD, c’est pourtant le même hydrophone qui a été immergé de 2012 à 2016. A priori, la sensibilité des hydrophones varie peu, toutefois aucune recalibration ne l’a réellement vérifié. Il est donc possible qu’elle ait évolué au cours du temps. Cependant, il est intrigant que les sauts de niveaux de bruit soient observés exactement entre deux immersions. Aucune explication satisfaisante n’a encore été trouvée pour expliquer ces observations.

Les niveaux de bruit estimés sur tous les sites entre 2010 et 2018 sont compris entre 72 et 98 dB ref $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^2$. Le niveau le plus élevé est atteint en 2013 au site NCRO et le plus faible au site MAD en 2015. RAMA enregistre les niveaux moyens les plus élevés, suivi par WKER et ELAN. Les niveaux moyens les plus faibles sont enregistrés à MAD, SSEIR, MADE et SSWIR. Sur le long terme, il semble que les niveaux de bruit diminuent. C’est particulièrement visible à WKER, où les niveaux maximaux passent de presque 85 dB ref $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^2$ en 2010 à 81 ref $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^2$ en 2018, mais aussi à NEAMS. Enfin, il est clair que le bruit varie de façon saisonnière à WKER et SSEIR, avec des niveaux plus

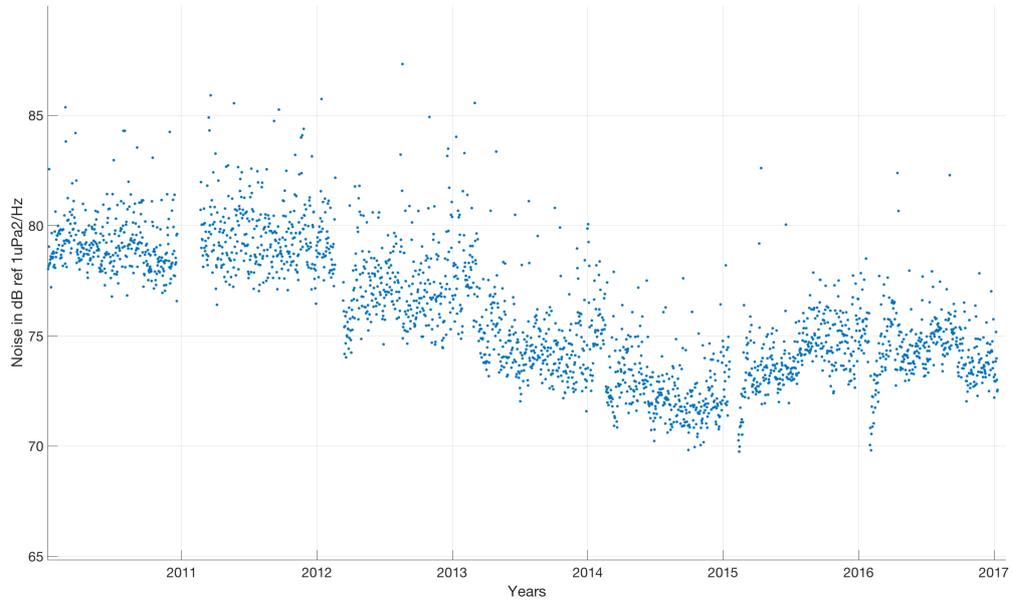


FIGURE 6.5 – Niveaux de bruit journalier dans la bande de fréquences 40-60 Hz des enregistrements du site MAD.

élevés de décembre à avril.

6.3 Contribution des tirs sismiques au paysage acoustique

L'examen visuel de nombreux spectrogrammes des enregistrements OHASISBIO a révélé la présence importante d'une source de bruit anthropique : les tirs de canons à air. Ces tirs sont émis lors de campagnes d'exploration sismique, pour imager les structures géologiques profondes grâce à l'analyse des échos qu'elles réfléchissent. Cette méthode est principalement utilisée pour la prospection pétrolière, mais aussi pour la recherche. Les sons émis par les canons à air sont basses fréquences (2-188 Hz à la source), courts (<0.1 secondes) et de grande amplitude (216-261 dB pic-à-pic re. $1\mu Pa@1m$) (Caldwell and Dragoset, 2000). Une campagne de prospection pétrolière peut durer plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Le spectrogramme de la Figure 6.6 (a) montre l'arrêt soudain d'une série de tirs et permet de se rendre compte de l'importante contribution des tirs au paysage acoustique sous-marin. Celui de la Figure 6.6 (b) illustre la superposition de tirs sismiques et d'une (ou plusieurs) vocalisations(s) de baleine bleue pygmée d'Australie (à 70 Hz) et de baleine bleue Antarctique (vers 28 Hz). En fonction des effets de la propagation, les signaux de tirs sismiques reçus aux hydrophones peuvent être dégradés, comme sur la Figure 6.6 (c), où seules les très basses fréquences sont encore présentes.

La détection automatique des D-calls par le SRD 2, a déclenché de nombreuses fausses

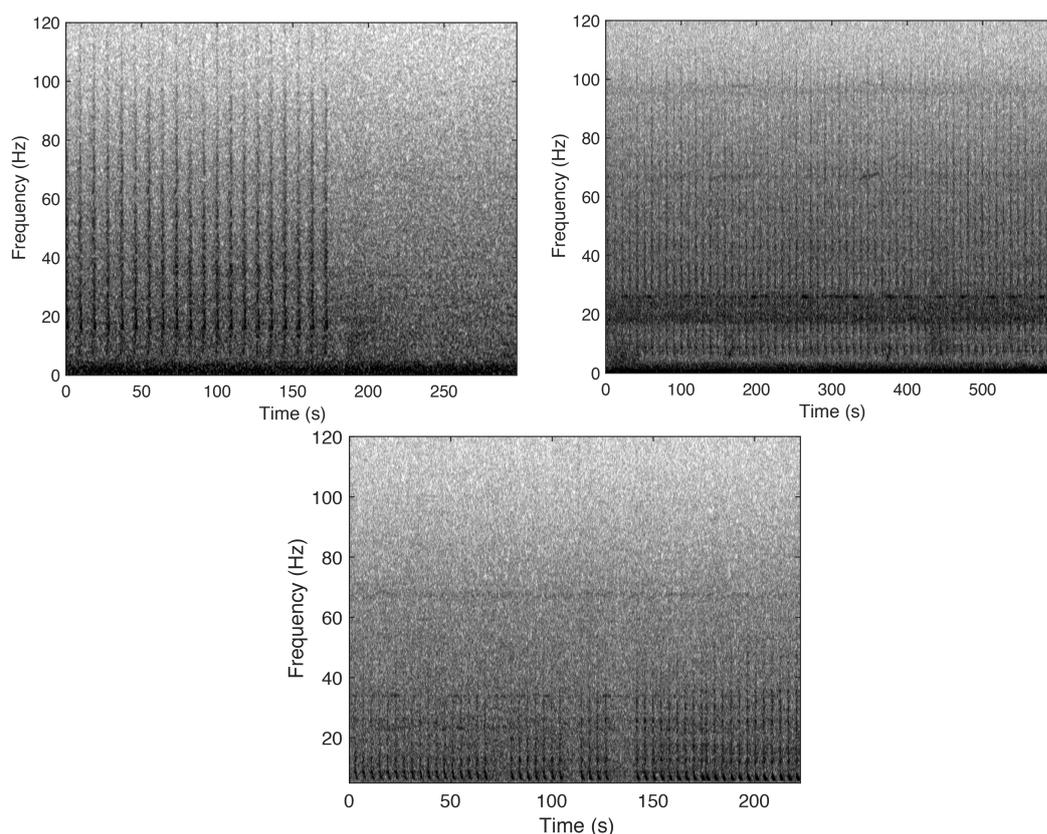


FIGURE 6.6 – Spectrogrammes d’enregistrements contenant des tirs de canons à air (a) à MAD-E en 2017, (b) à NEAMS en 2017, (c) à SSEIR en 2016.

alarmes dues à la détection automatique de tirs de canon à air. Pour les éliminer, il a fallu recourir à une méthode de post-traitement (Torterotot et al., 2019). Ces fausses alarmes, retirées des analyses du chapitre 4 peuvent cependant être exploitées pour évaluer la contribution temporelle des tirs sismiques au paysage acoustique ambiant dans le réseau OHASISBIO.

6.3.1 Méthode

La méthode de détection des tirs de canons à air se base sur des mesures d’énergie et de périodicité (Mellinger et al., 2004a; Nieukirk et al., 2012; Torterotot et al., 2019). En effet, les tirs de canon à air sont émis à intervalles réguliers de 5 à 60 secondes (Nieukirk et al., 2012). En réalité, la majorité des tirs de canon à air enregistrés par le réseau OHASISBIO présentent une plage de périodicité plus restreinte. Les enregistrements de WKER en 2015 (choisis pour évaluer les performances du détecteur automatique de vocalisations, cf. chapitre 2), montrent par exemple principalement des tirs toutes les 5 à 20 secondes. En pratique, un spectrogramme est calculé pour chaque fichier (Figure 6.7 (a)). Pour chaque transformée de Fourier à court terme, les amplitudes sont sommées entre 30 et 70 Hz pour former un nouveau signal temporel avec une fréquence d’échantillonnage de 2,1427 Hz

(Figure 6.7, (b)). La densité spectrale de puissance (PSD) de ce signal est estimée pour chaque heure avec la fonction *pwelch* de MATLAB. Si un pic de plus de 10 dB par rapport à la courbe moyenne est détecté dans la PSD entre 0,05 et 0,2 Hz (périodes équivalentes 5-20 secondes), alors l'heure est marquée comme positive à la présence de tirs sismiques (Figure 6.7 (c)). Un fichier sera retiré de l'analyse des D-calls si au moins une heure est

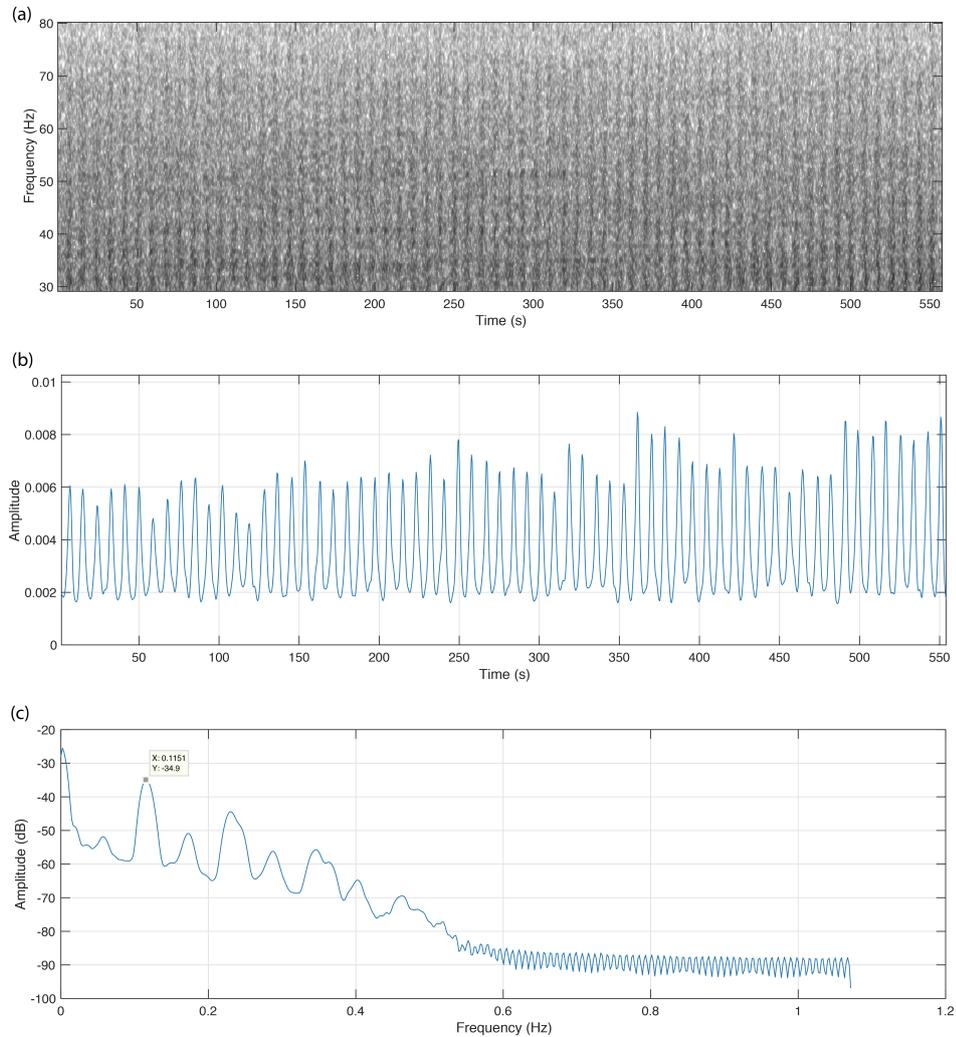


FIGURE 6.7 – Etapes de la procédure de détection de tirs de canons à air dans les enregistrements. (a) Spectrogramme d'un enregistrement de 9 minutes (nfft = 1200 points, fenêtre de 4,66 sec, recouvrement de 90%). (b) Somme des amplitudes du spectrogramme entre 30 et 70 Hz. (c) Densité spectrale de puissance (PSD) du signal (b) calculée avec la fonction *pwelch* de MATLAB (nfft = 1024, fenêtre de 250 échantillons, recouvrement de 50%). Si un pic de plus de 10 dB par rapport à la courbe moyenne est détecté entre 0,05 et 0,2 Hz (périodes équivalentes 5-20 secondes), alors l'heure est marquée comme positive à la présence de tirs sismiques.

testée positive à la présence de tirs. La métrique de présence de tirs sismiques sera donc le nombre de fichiers contenant des tirs par unité de temps. Cet indicateur n'est pas le plus précis, car il a été élaboré principalement pour éliminer automatiquement des fausses alarmes détectées lors du processus de détection automatique de D-calls et ainsi limiter

la tâche laborieuse de vérification manuelle. La Figure 6.8 présente le nombre mensuel de détections de tirs à WKER en 2015 (en vert) avant et après l'application du post-traitement de détection des tirs. La majorité des tirs décelés par le détecteur de D-calls est bien identifiée et éliminée de l'analyse. Il reste cependant quelques fichiers contenant des tirs, notamment en septembre et octobre. La plupart sont dus à des tirs dont la périodicité est supérieure à 20 secondes ou dont le niveau d'énergie est très faible.

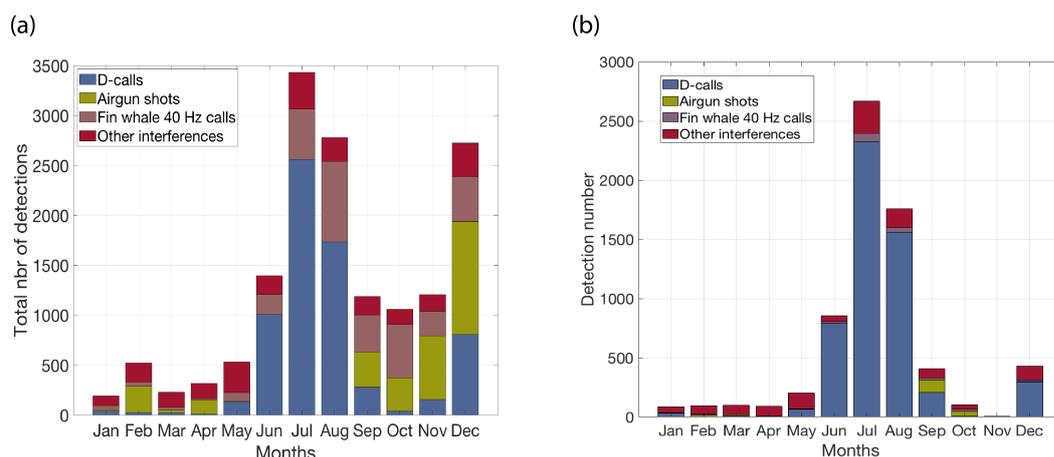


FIGURE 6.8 – Histogrammes du nombre de détections mensuel de D-calls à WKER en 2015 détaillant les faux positifs (a) avant et (b) après le post-traitement de détection des tirs de canons à air.

6.3.2 Résultats

La Figure 6.9 montre la proportion de fichiers dans lesquels ont été détectés des tirs de canons à air sur le nombre total de fichiers enregistrés par an. Les tirs sont détectés à tous les sites et toutes les années d'enregistrement disponibles. Les sites les plus affectés par la présence de tirs sont MAD et NEAMS avec tous les ans, plus de 20% de fichiers testés positifs (sauf à NEAMS en 2018). La plus faible proportion annuelle de présence de tirs a été enregistrée à ELAN, le site le plus au sud du réseau (environ 5% des fichiers). Aucune tendance générale d'évolution ne se dégage quant au pourcentage annuel de tirs. En revanche, à une échelle plus locale, ce pourcentage semble constant (MAD, NEAMS), en augmentation (NCRO, SWAMS) ou en diminution (SSEIR). Des tirs de canons à air sont enregistrés à toutes les périodes de l'année, sans présenter de tendance saisonnière (Figure 6.10). Cependant, il semble que certaines campagnes sismiques insonifient l'ensemble des sites d'écoute (e.g. octobre 2015 - avril 2016 ou février 2017 - avril 2017).

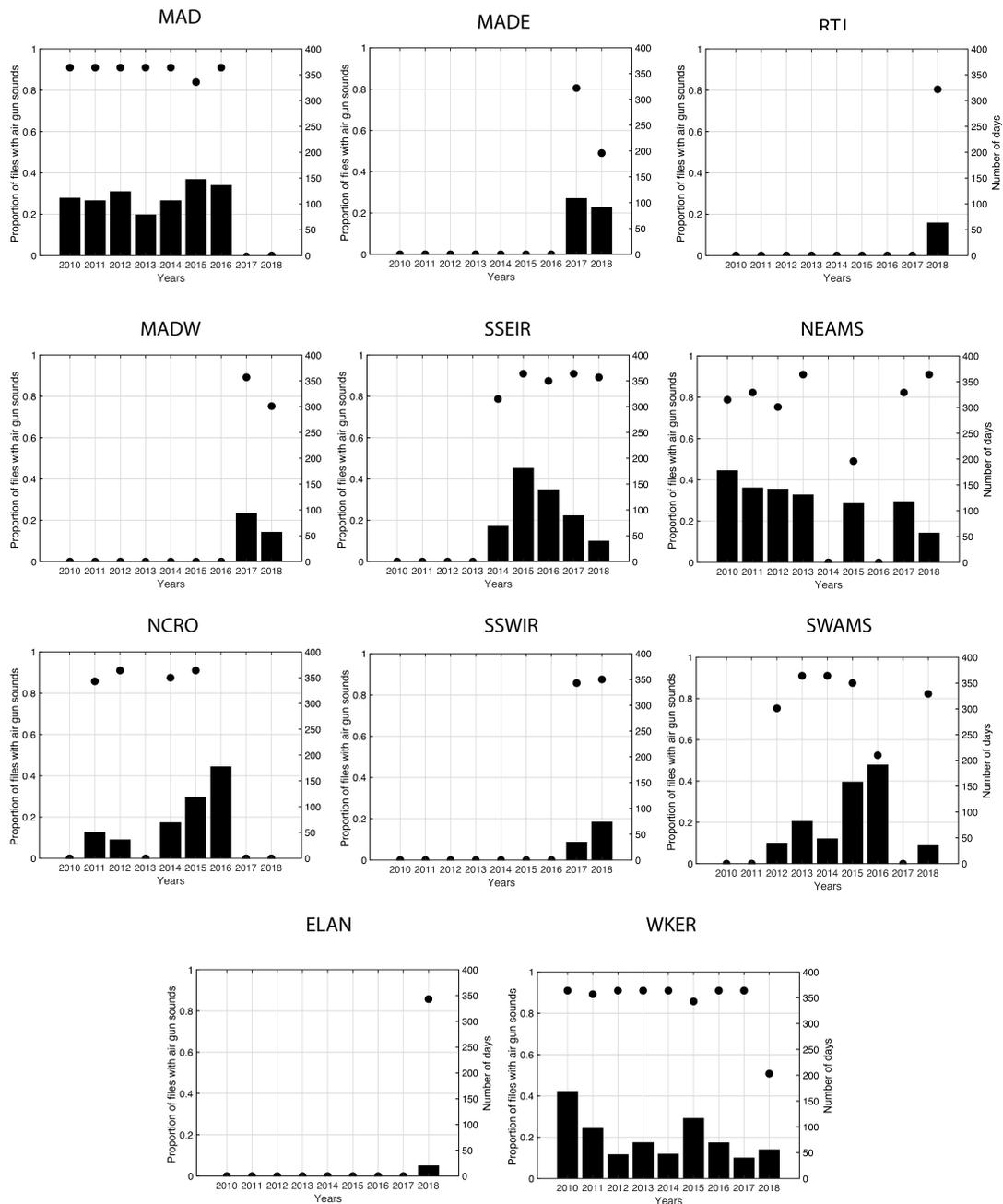


FIGURE 6.9 – Proportion de fichiers avec des signaux acoustiques de tirs sismiques par an pour chaque site du réseau OHASISBIO. Le nombre total de jours d’enregistrement de chaque année est représenté par un rond noir (ordonnées droites)

6.4 Discussion

6.4.1 Evolution du bruit ambiant

Les niveaux élevés enregistrés en 2010 et 2013 à NCRO sont probablement dus à des bruits d’écoulements sur la bouée qui abrite l’instrument de mesure, provoqués par de forts courants dans la région. Le site est situé dans le courant circumpolaire antarctique. Les niveaux de bruit à RAMA, supérieurs à ceux enregistrés aux autres sites du

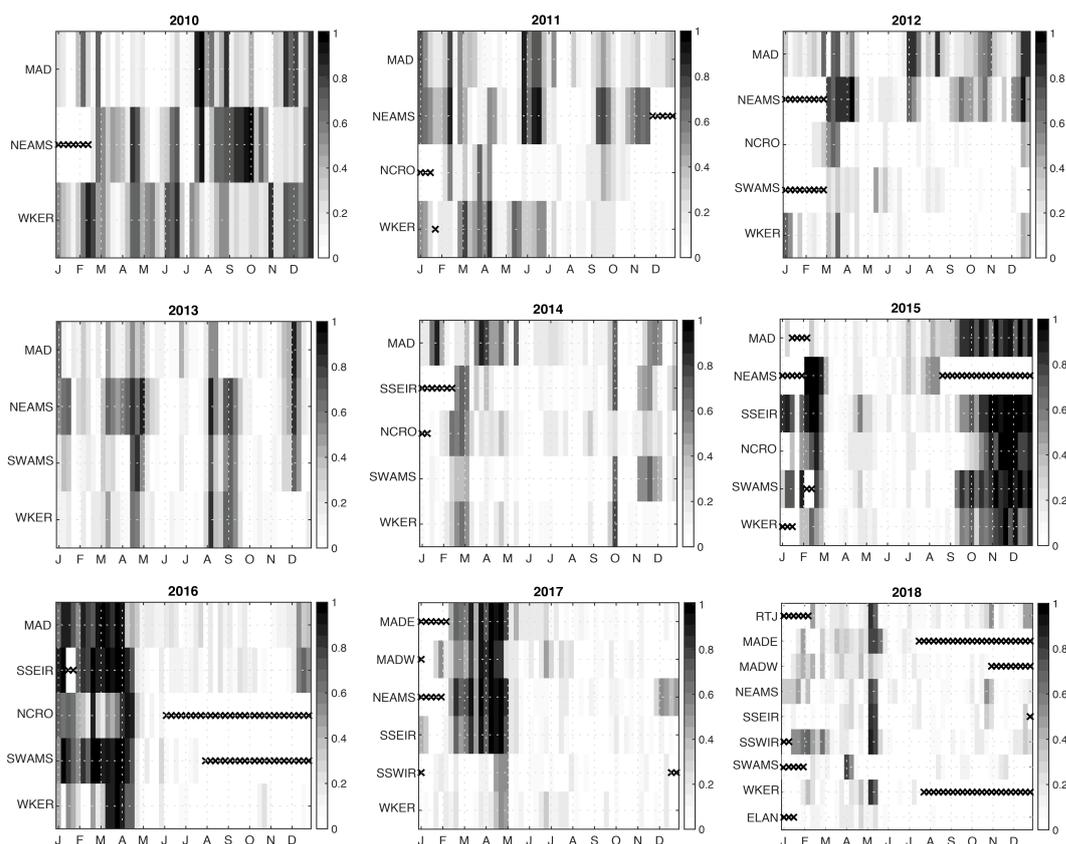


FIGURE 6.10 – Proportion de fichiers contenant des tirs sismiques par semaine pour chaque année d’enregistrement. Les semaines sans enregistrements sont indiquées par des croix noires.

réseau, sont probablement dus à une contribution plus importante du trafic maritime dans cette région située dans le rail maritime entre le cap de Bonne Espérance et le détroit de Malacca. Sur les autres sites, les niveaux sont en général plus élevés dans les zones sub-australes (WKER et ELAN) que dans les régions sub-tropicales (NEAMS, MADE, MADW). Tsang-Hin-Sun et al. (2015) avaient fait le même constat et émis l’hypothèse que les niveaux plus élevés dans le sud viennent des bruits de glace ou encore des bruits liés à l’état de mer, souvent plus agitée dans ces régions sub-antarctiques (Knudsen et al., 1948; Matsumoto et al., 2014).

Durant la fin du 20ème siècle et le début du 21ème siècle, les niveaux de bruits basses fréquences ont augmenté dans le nord-est de l’océan Pacifique (Ross, 1993; Andrew et al., 2002; McDonald et al., 2006) et dans l’océan Indien (Miksis-Olds et al., 2013). Ces tendances coïncident avec une augmentation du trafic maritime (Miksis-Olds et al., 2013). Cependant, d’autres observations ont montré que de 2004 à 2016, les niveaux de bruit basse-fréquence ont diminué d’intensité dans le Pacifique équatorial, dans l’océan Atlantique sud et équatorial et dans le nord de l’océan Indien (Matsumoto et al., 2014; Miksis-Olds and Nichols, 2016). Cette diminution est aussi observée sur les sites NEAMS et WKER du réseau OHASISBIO, situés respectivement en zones subtropicale et sub-

antarctique. Ces observations indiquent que la diminution des niveaux de bruit s'applique à une très large zone de l'océan Indien. Matsumoto et al. (2014) expliquent cette diminution de bruit basse-fréquence par une diminution du volume d'icebergs dérivants dans les eaux sub-antarctiques.

L'augmentation saisonnière des niveaux de bruit à WKER et SSEIR entre décembre et avril (été et automne austral) coïncide avec la période à laquelle le nombre d'iceberg augmente (Tsang-Hin-Sun et al., 2015). Le craquement de la glace de ces icebergs, pouvant émettre jusqu'à 400 Hz (Dziak et al., 2013) insonifierait alors une grande partie des océans (Matsumoto et al., 2014; Leroy et al., 2018a). Cette variation saisonnière pourrait aussi être liée à la présence acoustique saisonnière d'autres espèces de grandes baleines, telles que le rorqual commun, qui émet des sons pulsés à 20 Hz, mais avec parfois des harmoniques présentes entre 40 et 60 Hz. Néanmoins, Leroy et al. (2018b) observent la présence acoustique de cette espèce à tous les sites du réseau OHASISBIO, et pas seulement à WKER et SSEIR. De plus, leur présence est principalement enregistrée d'avril à octobre, à l'opposé de la période de hausse du bruit ambiant. Les D-calls des baleines bleues sont aussi émis dans cette bande de fréquences. Cependant, ils sont peu nombreux, courts et de faible intensité acoustique et ne pourraient pas augmenter significativement le niveau de bruit à eux seuls.

L'évolution des niveaux de bruit enregistrés par le réseau OHASISBIO a guidé notre analyse des données. Les enregistrements de NCRO en 2010 et 2013 sont extrêmement bruités à des fréquences et des niveaux masquant tous les signaux des baleines bleues. Ces deux années d'enregistrements sur ce site n'ont ainsi pas pu être exploitées dans nos analyses. Les niveaux de bruit des enregistrements du CTBTO à Crozet sont aussi très élevés, particulièrement au sud de l'archipel (Samaran, 2008). Ces valeurs élevées sont essentiellement générées par les conditions météorologiques et leurs conséquences sur l'état de mer. La comparaison des niveaux de bruit enregistrés sur les triplets d'hydrophones a aidé à choisir quel hydrophone du triplet garder pour l'analyse des résultats. Sur le site WKER en 2010 (Figure 6.11), les niveaux de bruit sont par exemple plus élevés sur les hydrophones 2 et 3 (probablement en raison des bruits de mouillage) que sur l'hydrophone 1, sélectionné pour l'analyse des vocalisations de grandes baleines. L'analyse des niveaux de bruit a aussi permis de détecter des anomalies de fonctionnement des hydrophones (*e.g.* à MAD de 2011 à 2016). Il est important dans le cadre d'un réseau d'observation à long terme d'avoir des mesures fiables, et détecter de telles anomalies permet de les corriger et de repartir sur un système de mesure robuste. Enfin, le niveau de bruit ambiant peut avoir un effet sur les détections de vocalisations de baleines bleues analysées dans les chapitres précédents. En effet, une augmentation du nombre de détections peut à la fois signifier une augmentation du nombre de baleines autour de l'hydrophone ou une augmentation de leur rythme d'émission, ou tout aussi bien traduire une diminution du bruit ambiant.

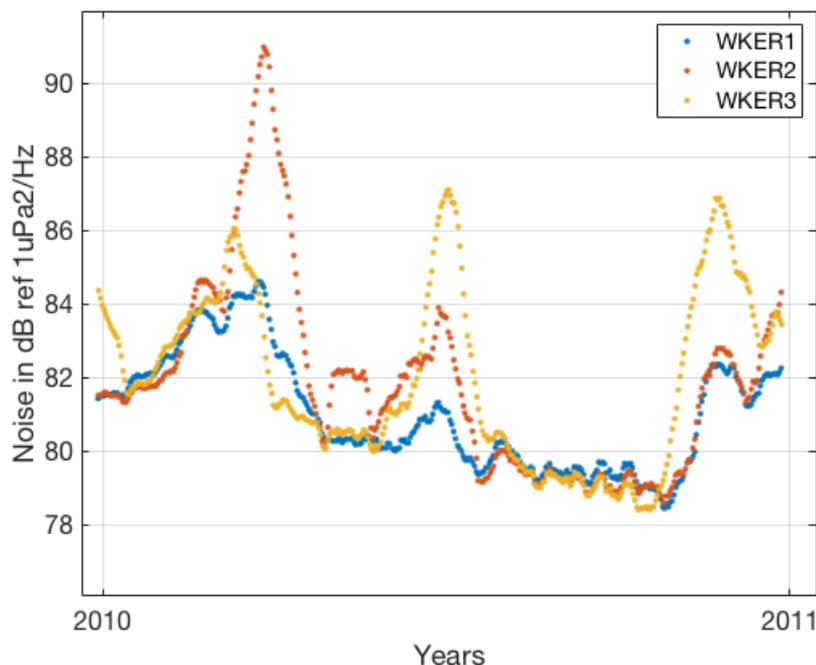


FIGURE 6.11 – Niveaux de bruit moyens dans la bande 40-60 Hz des trois triplets installés à WKER en 2010.

Cette diminution aura pour effet d'augmenter le rayon de détection de l'hydrophone et donc potentiellement d'augmenter le nombre de détections. Par exemple, il est important de vérifier que la diminution inter-annuelle du niveau de bruit à WKER et NEAMS n'est pas à l'origine d'une augmentation du nombre de détections, ou encore de se demander si l'augmentation saisonnière du bruit ambiant à WKER et SSEIR ne masque pas des vocalisations dans les enregistrements. A NEAMS, le nombre de vocalisations de baleines bleues Antarctique augmente de 2010 à 2013, puis semble se stabiliser. Le nombre de détections semble en revanche assez stable à WKER. Une légère augmentation du nombre de vocalisations de baleines bleues pygmées de Madagascar est aussi observée à NEAMS ainsi qu'à WKER, particulièrement en 2017 et 2018. Ces augmentations sont alors peut-être uniquement le reflet de la diminution du niveau de bruit ambiant à ces deux sites. Enfin, l'augmentation saisonnière synchrone du bruit ambiant et du nombre de vocalisations à WKER et SSEIR indique que le bruit ambiant ne masque pas forcément la présence de ces vocalisations. En revanche, les tirs de canons à air, constituent une source importante du bruit ambiant dans les données OHASISBIO, et recouvrent la bande de fréquence dans laquelle sont émis les vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées des baleines bleues.

6.4.2 Contribution des tirs sismiques

Les résultats montrent que des tirs de canons à air sont présents dans tous les enregistrements du réseau OHASISBIO, et insonifient une grande partie de l'océan Indien, de 24

à 56° S et de 52° à 83° E. Les sites les plus affectés par la présence de tirs sismiques sont situés au nord du réseau, dans la région sub-tropicale. Aux deux sites MAD et NEAMS, chaque année, près de 40% des fichiers contiennent des tirs sismiques. Parmi les zones d'intérêt pour la recherche pétrolière, (Figure 6.12), où des gisements marins resteraient à découvrir, figurent le canal du Mozambique, toute la bordure ouest de l'océan Indien et la région située entre l'Australie et l'Asie du Sud-Est (McCauley et al., 2017). De nombreuses exploitations pétrolières sont déjà implantées au large des côtes nord-ouest de l'Australie, le long de l'archipel Indonésien, du Brunei, de la Malaisie et du Myanmar.

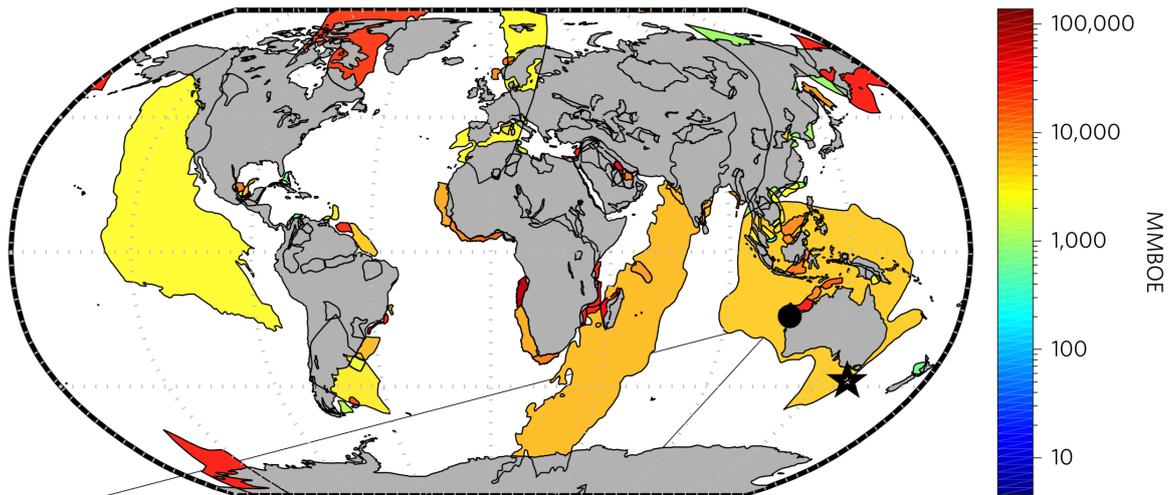


FIGURE 6.12 – Zones géographiques probables de gisements pétroliers marins non découverts. L'échelle de couleur est logarithmique, en millions de barils équivalents pétrole. (D'après McCauley et al. (2017))

Dans l'océan Atlantique, les tirs sismiques contribuent de façon importante au paysage sonore sous-marin. Ils ont été aussi bien détectés au détroit de Fram et en baie de Baffin en Arctique, qu'au détroit de Bransfield en Antarctique, ou encore dans les régions équatoriales et hauturières (Nieukirk et al., 2012; Haver et al., 2017; Kyhn et al., 2019). A l'île de l'Ascension (7°56' S, 14°21' O), des tirs sont enregistrés en continu (24 heures par jour) tout au long de l'année, alors que dans les régions polaires, la présence des tirs est plus saisonnière (Haver et al., 2017). Dans les données OHASISBIO, les tirs ne sont pas enregistrés en continu. En général sur les sites du sud du réseau, moins de tirs sont enregistrés durant l'hiver austral de mai à septembre. Cette région sub-antarctique est peu accessible durant cette période de l'année, à cause d'une météo peu clémente. Cependant, en mars 2014, des tirs enregistrés aux sites SSEIR et SWAMS ont pu être localisés au large du Myanmar, soit à plus de 6 100 et 7 000 km de distance (resp. ; J-Y Royer, comm. personnelle 2016). En Atlantique, des tirs ont aussi été détectés à plus de 4 000 km de leur source (Nieukirk et al., 2012) et à plus de 6 000 km sur des sismomètres terrestres (Okal and Talandier, 1986). Ces exemples témoignent de la puissance des sources sismiques utilisées. Même si l'origine des tirs enregistrés par le réseau OHASISBIO n'a pas encore été

systématiquement localisée, on note des périodes durant lesquelles de nombreux tirs sont simultanément détectés à tous les sites et donc insonifient l'ensemble de l'océan Indien central. Toutes ces observations soulignent aussi les propriétés exceptionnelles de l'océan pour propager les signaux acoustiques basse-fréquence, d'autant plus quand les récepteurs sont placés dans l'axe du canal SOFAR, qui agit comme un guide d'ondes à très grandes distances (Lurton, 2002). Il est donc vraisemblable que les sources des tirs enregistrés sont toutes distantes de plusieurs milliers de kilomètres du réseau OHASISBIO.

Il arrive que plusieurs campagnes de tirs aient lieu en même temps, dans une même région, comme par exemple dans la baie de Baffin, où 3 campagnes ont été menées simultanément entre août et octobre 2012 (Kyhn et al., 2019). Durant ces épisodes, les signaux de tirs sismiques deviennent la composante prévalente du bruit ambiant (Figure 6.6). Cette augmentation du bruit ambiant peut avoir un effet sur la distance de détection d'autres sons sous-marins, notamment les vocalisations de mammifères marins (cf. Figure 6.6 (b)). Ces dernières peuvent alors se retrouver masquer par le bruit ambiant, là où elles étaient précédemment audibles. Ce phénomène de masquage se traduit en fait par une augmentation du seuil d'audition due à la présence d'un autre bruit (Clark et al., 2009). Par exemple, Sills et al. (2017) mesurent une baisse de sensibilité auditive d'un phoque tacheté (*Phoca largha*) et d'un phoque annelé (*Phoca hispida*) en présence de bruit sismique anthropique. L'espace de communication des baleines franches de l'Atlantique nord-est aussi sérieusement diminué par le bruit anthropique (Hatch et al., 2012). Il est fort probable que les distances de communication entre baleines bleues aient aussi diminuées avec la hausse globale du bruit ambiant (Southall, 2005). Les effets de ce masquage sont encore mal connus, mais il est probable que s'il diminue les distances de communication, il dégrade les interactions inter-individus. Enfin, cet effet de masquage a aussi un impact sur le suivi par acoustique passive des grandes baleines en altérant les résultats de la détection automatique des vocalisations et par conséquent, l'interprétation des patrons de présences.

De manière plus directe, la présence de tirs sismiques engendre des comportements d'évitement chez des rorquals communs (Castellote et al., 2012), des baleines à bosse (Dunlop et al., 2018) ou encore des orques (Stone and Tasker, 2006). L'intensité sonore des canons à air peut même entraîner des lésions physiologiques allant jusqu'à une surdité temporaire ou définitive (Southall et al., 2009). Southall et al. (2009) ont initié des travaux de recherche sur l'exposition des mammifères marins au bruit anthropique. Ils définissent des zones autour de la source, correspondant à divers niveaux de risque (voir Figure 6.13). Ces espaces couvrent en général quelques kilomètres carrés seulement. Dans les enregistrements OHASISBIO, les vocalisations des mammifères marins ne proviennent probablement pas d'animaux situés à proximité des zones de tir, situées principalement sur les marges et plateaux continentaux, mais plutôt d'animaux proches de l'hydrophone (< 200

km). De plus, les hydrophones sont placés dans l'axe du canal SOFAR, soit à environ 1000 mètres de profondeur, une zone non fréquentée par les baleines bleues. Il n'est donc pas possible d'extrapoler et de conclure que les baleines bleues présentes dans l'océan Indien perçoivent les tirs sismiques enregistrés par les hydrophones. En revanche, d'autres organismes sensibles au son vivent à ces profondeurs. C'est le cas de certaines espèces de poissons ou de plancton. Fewtrell and McCauley (2012) ont par exemple observé que des espèces de poissons réagissaient au bruit généré par des tirs sismiques en se réfugiant au fond de la colonne d'eau et en augmentant leur vitesse de nage et la cohésion de leur groupe. Des expositions à des tirs de canons à air expérimentaux ont eu pour effets de diminuer l'abondance de zooplancton et de multiplier les décès d'adultes et de larves dans un rayon de 1.2 km (McCauley et al., 2017). A long terme, les effets de la pollution acoustique sur les petits organismes, sources de nourriture principale des baleines bleues, sont susceptibles de se répercuter sur ces grandes baleines.

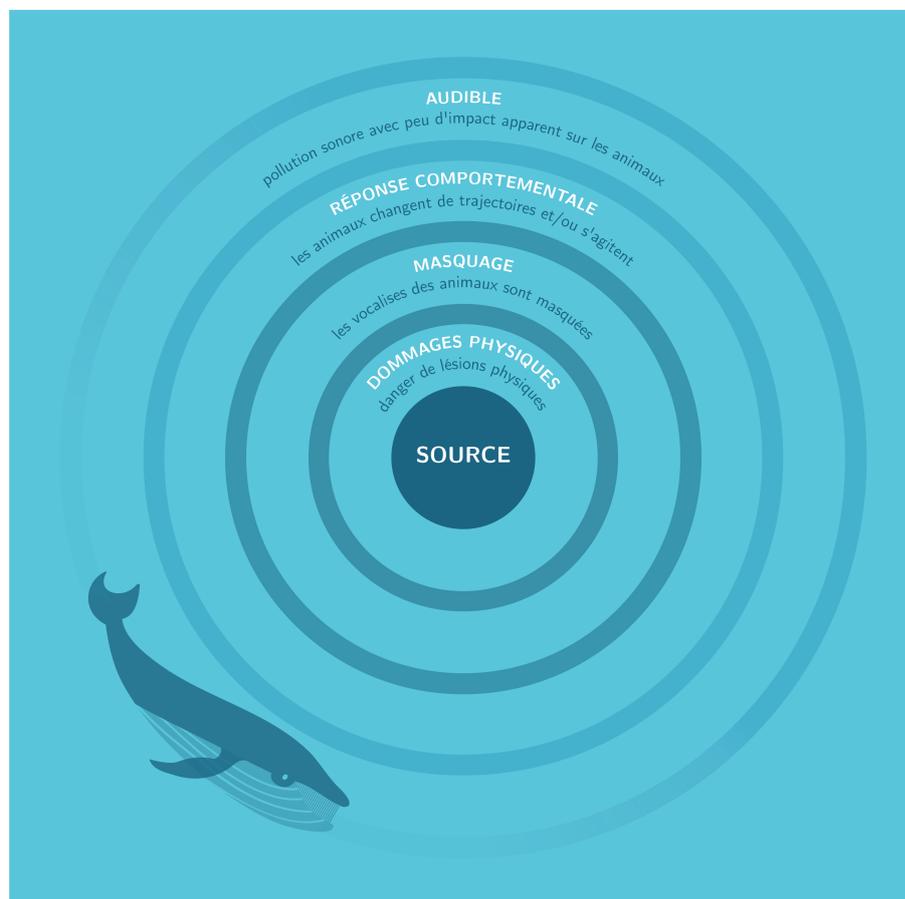


FIGURE 6.13 – Les différentes zones de risques autour d'une source sonore d'origine anthropique, d'après Southall et al. (2009, 2019)

Des protocoles de mitigation sont maintenant mis en place lors des campagnes de prospection sismique. Il n'existe cependant pas de standard international sur le sujet et chaque pays est seul responsable de la réglementation dans ses eaux territoriales. Les travaux de Southall et al. (2009), réactualisés en 2019 (Southall et al., 2019), posent une

base de connaissance pour aider à établir une réglementation sensée. Pour cela, ils ont défini pour plusieurs espèces de mammifères marins les niveaux de bruit au-dessus desquels des lésions auditives risquent de survenir. Ils inventorient aussi toutes les observations de changements comportementaux en présence de sources anthropiques. Puis à partir de là, ils définissent des indices de risques physiologiques, allant de la perte irréversible à la perte temporaire de l'audition et des critères de risques de perturbation du comportement en fonction de la distance à la source et de sa puissance. En pratique, les protocoles de mitigation impliquent généralement des observateurs visuels et acoustiques. Les hydrophones des flutes sismiques servent de capteurs pour les opérateurs acoustiques. Les animaux observés sont localisés (soit visuellement soit acoustiquement) et quand ils se situent dans la zone de risque, les tirs sont arrêtés immédiatement. Il existe aussi des procédures de montée en puissance progressive des canons à air (*ramp-up* ou *soft start*). Cette procédure est utilisée pour alerter la faune marine de la présence des sources sismiques et leur laisser le temps de s'éloigner avant que la puissance acoustique maximale ne soit atteinte. Le *Guide de préconisation pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine* publié en juin 2020 présente en détail les procédures ou technologies disponibles pour éviter, réduire ou compenser les impacts des émissions sonore sur la faune marine (Persohn et al., 2020).

6.5 Conclusion

Ce chapitre présente l'évolution du niveau de bruit ambiant dans la région de l'océan Indien austral. La bande de fréquence étudiée pour illustrer cette évolution se situe entre les bandes de fréquences des vocalisations de baleines bleue, afin que les résultats ne soient pas faussés par la présence acoustique saisonnière des baleines. A l'instar d'autres océans et depuis quelques années, le niveau de bruit basse-fréquence diminue d'années en années dans l'océan Indien austral. A cette décroissance long-terme du bruit ambiant, s'ajoute, pour certains sites, une importante variation saisonnière. L'étude du bruit ambiant est aussi un premier indicateur du bon fonctionnement des instruments de mesure. Par exemple, en cas d'anomalie dans les niveaux de bruit (ne pouvant pas s'expliquer par un phénomène physique), des corrections peuvent être rapidement mises en place. Ces observations soulignent l'intérêt de disposer d'outils de post-traitement standardisés et faciles d'utilisation pour traiter rapidement les données venant de grands observatoires acoustiques tels qu'OHASISBIO. Cette étude a aussi permis de quantifier la présence de tirs de canon à air dans les enregistrements. Cette source de bruit est omniprésente dans la région de l'océan Indien, avec des tirs détectés sur tous les sites d'écoute et toutes les années depuis 2010. D'autres sources de bruit d'origine anthropique (*e.g.* trafic maritime, travaux sous-marins, etc) peuvent augmenter significativement le niveau de bruit

ambiant et masquer les vocalisations produites par les animaux pour communiquer. Ce phénomène pose problème, en particulier dans les régions où les individus ont besoin d'interagir (zones de reproduction par exemple). Cependant, il est important de préciser que cette étude n'est pas une étude d'impact du bruit sur les baleines bleues. Elle cherche seulement à montrer que les tirs sismiques sont une source préminente de bruit anthropique dans l'océan Indien, à la profondeur des hydrophones du réseau OHASISBIO, c'est à dire vers 1 000 mètres de profondeur. En effet, il n'est pas certain que le paysage acoustique en surface, là où vivent principalement les baleines bleues, soit autant pollué par les tirs sismiques en surface, là où vivent les baleines bleues.

L'une des principales limites de cette étude est que la méthode de détection des tirs sismiques a été développée avant tout pour éliminer les fausses alarmes de l'analyse des D-calls présentée dans le chapitre 4. En conséquence, les performances de ce post-traitement sont mal connues, notamment sa précision et son rappel n'ont pas été formellement évalués. La Figure 6.8 montre toutefois que la plupart des faux positifs à la détection de D-calls qui étaient des tirs sismiques ont bien été détectés par l'algorithme de post-traitement, ce qui suggère que sa précision est correcte. En outre, la détection simultanée de tirs sismiques par plusieurs hydrophones, vérifiée manuellement (*e.g.* fin 2015-début 2016 et début 2017), confirme la fiabilité de l'algorithme.

Dans le futur, il serait important de continuer à surveiller l'évolution du bruit ambiant dans cette région de l'océan Indien. Cela permettra, entre autres, d'observer si la diminution du niveau de bruit se confirme et de poursuivre les comparaisons avec les autres régions du monde. A ce titre, le contexte actuel de la pandémie de COVID-19 suscite de nombreuses questions quant à ses effets acoustiques. Par exemple, dans le port de Vancouver, Thomson and Barclay (2020) ont observé une réduction du bruit proportionnelle au ralentissement économique provoqué par cet événement mondial au premier trimestre 2020. La mesure du bruit ambiant des enregistrements de 2020 permettra d'observer les effets de cette crise sanitaire et économique sur le paysage sonore sous-marin de l'océan Indien. Ensuite, maintenant que la contribution des tirs sismiques au paysage acoustique ambiant a été décrite sur une série temporelle de 9 ans, il serait intéressant de quantifier la hausse du niveau de bruit provoquée par la présence de tirs sismiques. Enfin, localiser la source de ces tirs permettrait de connaître la portée de leur propagation.

Discussion générale et conclusion

Étudier les mammifères marins par acoustique passive nécessite des méthodes de traitement de données performantes et standardisées. C'est pourquoi ces travaux de thèse se sont intéressés à la standardisation des protocoles d'évaluation des performances de détection des vocalisations de baleines bleues, que celle-ci soit automatique ou manuelle. Ensuite, grâce à la détection automatique des vocalisations stéréotypées de baleines bleues dans une base de données comprenant presque 10 années d'enregistrements continus, les distributions géographique et saisonnière de trois populations présentes dans l'océan Indien ont pu être précisées. Pour la première fois, les vocalisations non-stéréotypées de baleines bleues, aussi appelées D-calls, ont fait l'objet d'une détection systématique. L'analyse du répertoire acoustique complet des baleines bleues (vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées) apporte des informations inédites sur leur utilisation de l'océan Indien comme habitat et confirme l'importance de la région pour cette espèce. Les faibles variations du rythme journalier d'émission des vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées n'ont pas permis d'apporter des informations complémentaires sur la stratégie d'alimentation des baleines bleues. Enfin, la méthode de détection automatique des D-calls a révélé la contribution majeure de signaux d'origine anthropique, les tirs sismiques, au paysage sonore sous-marin de l'océan Indien. Cette discussion générale reprend les chapitres de la thèse, pour en souligner les résultats et leurs limites, et à partir de là, dresser de nouvelles perspectives d'une part pour la recherche en acoustique passive et d'autre part pour la valorisation de l'observatoire OHASISBIO.

Sur le traitement des données

Deux problématiques méthodologiques ont été abordées dans cette thèse. Elles ont en commun le développement de protocoles et de méthodes de traitement standardisés et optimisés, notamment pour permettre la comparaison de résultats entre plusieurs études d'acoustique passive. Une première partie a traité plus particulièrement l'évaluation des performances d'un détecteur automatique de vocalisations appliqué aux baleines bleues. Un protocole a été mis en place pour valider les performances du détecteur sur 4 tâches

de détection différentes. Cette étape est primordiale, et permet à la fois de s'assurer que la proportion de bonnes détections est optimale tandis que la proportion d'interférences détectées reste minimale. Ce protocole assez complet pourra être repris pour évaluer les performances de nouveaux détecteurs. Une deuxième partie a présenté les travaux du groupe d'intérêt scientifique "OSmOSE" concernant le développement d'outils communs pour le traitement des données d'acoustique passive sous-marine. Ces outils sont libres d'accès, optimisés, et permettent de travailler collectivement et de façon reproductible. Ce genre d'initiative est particulièrement bienvenu pour traiter des enregistrements couvrant de larges échelles temporelles et géographiques, comme ceux de OHASISBIO. En effet, traiter les données de façon uniforme et standardisée est essentiel pour garantir la fiabilité, l'homogénéité et la reproductibilité des analyses.

Comment évaluer les performances d'un détecteur automatique ?

Bien que de nombreuses études soulignent l'importance de connaître les performances de détection pour obtenir des résultats significatifs (*e.g.* (Širović, 2016; Leroy et al., 2018c)), il n'existe aucune norme sur la façon de procéder. Pour évaluer les performances du détecteur utilisé dans cette thèse, un protocole d'évaluation complet, comprenant trois sous-ensembles de données a été mis en place. Le premier sous-ensemble a servi à définir des seuils de détection appropriés à chaque type de vocalisation, conciliant un taux élevé de bonnes détections et un faible taux de fausses détections. Le second sous-ensemble a permis de tester la variabilité des performances en fonction de l'annotation manuelle de référence. Le troisième sous-ensemble a servi à valider les seuils de détection et à vérifier si d'éventuelles interférences déclenchaient des fausses détections. Ce protocole a prouvé l'efficacité du détecteur pour la détection des vocalisations stéréotypées, mais a aussi révélé ses limites, notamment pour la détection des vocalisations non-stéréotypées. Certaines ont pu être corrigées par des post-traitements complémentaires, par exemple pour éliminer les nombreux tirs sismiques détectés comme D-calls, et d'autres ont été prises en compte en amont dans la stratégie de détection, comme l'adaptation des dictionnaires à la diminution fréquentielle des vocalisations stéréotypées (Torterotot et al., 2019). Contrairement au Z-detector (Socheleau et al., 2015), précédemment utilisé pour identifier les vocalisations stéréotypées de baleines bleues Antarctique sur les données OHASISBIO, le SRD est polyvalent et s'adapte facilement à la détection de nombreuses vocalisations, stéréotypées ou non. Il a notamment été adapté et utilisé récemment pour détecter les signaux basse-fréquence émis par des grandes baleines dans les enregistrements long terme autour des îles Diego Garcia, au nord de notre zone d'étude (Leroy et al., 2020).

Si le SRD s'est avéré adapté à la détection de vocalisations des baleines bleues, il

présente néanmoins des inconvénients qui limitent sa mise en œuvre systématique (*e.g.* la création d'un nouveau dictionnaire de vocalisations stéréotypées chaque année pour tenir compte de la variation inter-annuelle de la fréquence; la nécessité de traitements complémentaires pour éliminer les fausses détections de tirs sismiques). Plusieurs pistes d'amélioration sont toutefois envisageables; citons par exemple, l'utilisation de modèles paramétriques plutôt que de données réelles pour créer les dictionnaires, ou encore la création d'un algorithme de classification plus robuste pour les D-calls. Dans le contexte d'un observatoire long-terme nécessitant une analyse systématique des données, il serait intéressant de transcrire le détecteur dans un langage standard et libre de droit (*e.g.* Python) pour l'intégrer à la plateforme de traitement de données *ODE*, présentée dans le chapitre 2. Actuellement, de nombreuses équipes de recherche tentent d'élaborer des détecteurs plus performants, en termes de détection et de temps de calcul. Par exemple, le projet initié par Microsoft AI for Earth et l'université de Washington (évoqué au chapitre 2) cherche à développer un détecteur automatique de vocalisations de baleines bleues, facilement adaptable à différents jeux de données.

Comment construire une base de données annotées de référence fiable et objective ?

De plus en plus d'algorithmes de détection ou de classification automatique des sons (sous-marins ou non) font appel à des techniques d'intelligence artificielle, ayant généralement besoin de données annotées de référence, tant pour l'apprentissage que pour l'évaluation des performances. Créer une base de référence complète et objective est une problématique en soi, tant sa qualité est dépendante de nombreux facteurs. La mise en place de la plateforme d'annotation gratuite, en ligne et en développement *open source* *Aplose* est un premier pas vers l'annotation collaborative et standardisée des données. La campagne d'annotation collaborative des enregistrements DCLDE 2015, à disposition de la communauté pour tester des outils de traitement, a montré que le type de vocalisation était un facteur très influent sur l'accord entre annotateurs. Le rapport signal à bruit des vocalisations et le profil de l'annotateur influencent aussi cet accord. En outre, cette étude insiste sur l'importance de faire annoter plusieurs personnes, afin de vérifier que la tâche d'annotation est compatible avec un apprentissage ou un test de performance d'algorithmes de détection. Par exemple, l'accord inter-annotateurs quasi nul pour les vocalisations à 40 Hz de rorquals communs indique que ces annotations ne sont pas fiables et ne devraient donc pas être utilisées pour les tâches mentionnées précédemment. Il serait maintenant intéressant d'étudier l'influence de l'annotation manuelle sur les performances de détections des algorithmes.

L'originalité de cette approche collaborative est aussi que la campagne est toujours

ouverte et que quiconque peut ajouter ses annotations, qui seront ensuite prises en compte automatiquement dans l'actualisation des résultats. C'est une première étape importante vers la création de bases de données annotées et validées collectivement, qui rendront plus pertinents les tests d'algorithmes de détections ou de classification automatique et la comparaison de leurs performances. A l'instar du groupe de travail OSmOSE, d'autres initiatives internationales réfléchissent à la standardisation du traitement des données en acoustique passive. Le compte-rendu du séminaire qui s'est tenu en décembre 2019 à Victoria, Canada, et dont le thème portait sur les *Standards for Annotating and Storing Marine Passive Acoustic Data and Metadata* expose clairement les attentes de la communauté bioacoustique sous-marine en matière de standardisation des protocoles (Kanes, 2019). La rédaction de recommandations pour une meilleure pratique d'annotation a aussi été initiée. Elle comprend la création d'une nomenclature et d'une base de données commune de vocalisations (Kanes, 2019).

A terme, l'objectif serait que la communauté bioacoustique dispose de plusieurs jeux de données (basses et hautes fréquences) annotés collectivement pour tester ses algorithmes de traitement des données. Une comparaison des méthodes de détection et de classification faciliterait la confrontation de différentes études de suivi des mammifères marins par acoustique passive. Simuler des jeux de données (*i.e.* modéliser des signaux sonores de cétacé dans du bruit ambiant sous-marin) pourrait répondre à la problématique de la vérité terrain inconnue, et donc évaluer les performances des algorithmes de façon plus fiable.

Analyse des résultats

Qu'avons-nous appris sur la distribution géographique et saisonnière des baleines bleues dans l'océan Indien austral ?

L'analyse présentée au chapitre 3 apporte de nouvelles informations spatiales et temporelles sur la présence de deux sous-espèces de baleines bleues : la baleine bleue Antarctique et deux populations de baleines bleues pygmées, dans le sud-ouest de l'océan Indien. Les premières sont présentes sur l'ensemble du réseau, y compris aux nouveaux sites les plus au nord RTJ (24°S), et principalement MADW (29°S). Les secondes sont séparées géographiquement en deux populations : les baleines bleues pygmées de Madagascar, principalement enregistrées à l'ouest du réseau, de MADE à ELAN, et parfois jusqu'à SWAMS et NEAMS ; les baleines bleues pygmées d'Australie sont, à l'inverse, enregistrées uniquement à l'est du réseau, principalement à SWAMS et NEAMS. L'occurrence saisonnière des deux sous-espèces de baleines bleues dans l'océan Indien est

totale­ment diffé­rente. Les vocalisations des baleines bleues Antarc­tique sont détec­tées pres­que toute l’année sur l’ensem­ble ré­seau, mais se font plus rares durant l’été austral (décembre à février) alors que les vocalisations de baleines bleues pygmées sont gé­né­ra­le­ment en­re­gis­trées exclu­sive­ment pen­dant l’automne austral (mars à mai). De plus, la présence acoustique des baleines bleues pygmées dans nos en­re­gis­tre­ments est stable d’une année à l’autre, reflétant soit un com­por­te­ment migra­toire très ré­gu­lier ou un com­por­te­ment vocal très saisonnier, proba­ble­ment lié à la repro­duc­tion de cette sous-espèce. Les baleines bleues Antarc­tique semblent avoir un patron de présence saisonnier plus variable. De fait, leur distribution spatiale est bien plus étendue que celle des baleines bleues pygmées, avec une unique population présente dans tout l’océan Austral. Leurs vocalisations ont été détec­tées dans les hautes et les basses latitudes avec des patrons saisonniers de présence remettant parfois en question le paradigme de migration (Thomisch et al., 2019). Cette étude révèle clairement que le sud-ouest de l’océan Indien est une zone extrêmement importante pour ces deux sous-espèces qui semblent toutefois utiliser cette région différemment. On notera qu’il existe tout de même quelques zones où elles sont en­re­gis­trées simultanément, comme au sud de Madagascar ou autour des îles St Paul et Amsterdam, d’avril à juillet. Il est possible que ces régions servent d’aires de repro­duc­tion à plusieurs sous-espèces simultanément, ou alors qu’elles l’utilisent de différentes façons, à l’instar des baleines bleues Antarc­tique et pygmées d’Australie, qui migrent et se nourrissent respectivement de mars à mai au sud de l’Australie.

Des vocalisations de baleines bleues pygmées du Sri Lanka, résidentes au nord-est de l’océan Indien, ont été détec­tée à l’archipel de Crozet (Samaran et al., 2010a), au sites NEAMS et SWAMS du ré­seau OHASISBIO (Samaran et al., 2013; Leroy et al., 2018b) et vers les îles Diego Garcia (Stafford et al., 2011). De nouvelles vocalisations, encore non-attribuées à des espèces de cétacés spécifiques, mais très certainement produites par des grandes baleines, ont aussi été en­re­gis­trées dans l’océan Indien (Leroy et al., 2017; Cerchio et al., 2018). Enfin, les vocalisations à 20 Hz et à 40 Hz de rorquals communs sont omniprésentes sur tout le ré­seau (Leroy et al., 2018b). Rechercher systématiquement toutes ces vocalisations dans les données OHASISBIO complèterait les connaissances sur la présence saisonnière et géographique des grandes baleines dans l’océan Indien austral. Ces informations s’avèreraient notamment utiles pour cibler des campagnes d’observation visuelle et acoustique conjointe pour identifier les espèces à l’origine des vocalisations non-attribuées.

Il reste encore à franchir l’étape complexe d’estimer la densité de baleines bleues présentes autour d’un hydrophone à partir du nombre de vocalisations détec­tées. Cela faciliterait la comparaison entre sites et années d’en­re­gis­tre­ment et surtout, permettrait d’avoir une meilleure idée de la taille des populations et de confirmer leur accroissement Branch et al. (2007, 2009). Marques et al. (2013) proposent une équation pour calculer la

densité d'animaux D à partir d'enregistrements acoustiques :

$$D = \frac{n_u(1 - \hat{f}_p)}{\alpha_c \hat{P} \tau \hat{r}}, \quad (7.1)$$

avec α_c la taille de l'aire de détection, \hat{r} le taux d'émission de vocalisation (ou nombre de vocalisations par heure), \hat{P} la probabilité de détection d'une vocalisation, \hat{f}_p la proportion de fausses détection, τ la durée d'enregistrement, et n_u le nombre de vocalisations détectées. Parmi ces variables, la taille de l'aire de détection et le taux d'émission de vocalisations sont encore difficiles à établir. La première inconnue demande des efforts de modélisation pour estimer le rayon de détection des hydrophones. Celui-ci dépend lui aussi de nombreux paramètres mal connus tels que la puissance d'émission des vocalisations à la source ou bien les propriétés physico-chimiques du milieu, qui influent localement et de façon saisonnière sur la propagation du son. Le taux d'émission des vocalisations de baleines bleues est la deuxième inconnue de l'équation. En effet, les vocalisations stéréotypées étant probablement produites dans un contexte de reproduction, il est probable que leur rythme d'émission augmente lors de la période d'accouplement. De plus, bien que les vocalisations de baleines bleues soient généralement émises de façon régulière, des modifications de la structure des chants de baleines bleues pygmées d'Australie ont été observées ; certaines vocalisations sont raccourcies d'une ou deux unités et leur répétition régulière modifie le nombre de vocalisations émises dans le temps (Joliffe et al., 2019).

Quels sont les patrons de présence géographiques et saisonniers des vocalisations non-stéréotypées de baleines bleues dans l'océan Indien austral ?

Le chapitre 3 a présenté la première étude sur la présence des D-calls dans les enregistrements OHASISBIO. Ces vocalisations sont majoritairement détectées au sud du réseau (ELAN et WKER). Les quelques vocalisations détectées au nord du réseau le sont généralement pendant l'hiver austral (juin à août), alors qu'à ELAN, la moitié des vocalisations est détectée durant le printemps austral (septembre à novembre), au début de la fonte des glaces. De plus, au nord du réseau, les D-calls sont principalement détectés en association avec des vocalisations stéréotypées alors qu'au sud, ils sont principalement enregistrés seuls. La détection de quelques D-calls aux latitudes sub-antarctiques durant l'été suggère une migration partielle vers les hautes latitudes à cette période. Cependant, ces vocalisations ne peuvent pas être associées avec certitude à une seule population de baleines bleues, et celles enregistrées en été à WKER peuvent tout aussi bien avoir été émises par des baleines bleues pygmées. Dans le golfe de Californie, Oleson et al. (2007a) ont observé que le nombre de D-calls détectés était proportionnel au nombre de baleines

observées, contrairement aux vocalisations stéréotypées. De plus, ce type de vocalisation est émis par les individus des deux sexes (Oleson et al., 2007b). D'après ces auteurs, la présence de D-calls dans les enregistrements serait ainsi un indicateur de présence des baleines plus fiable que celle des vocalisations stéréotypées. Cette étude ne prend cependant en compte qu'une toute petite région du Pacifique, connue pour être une aire d'alimentation fréquentée par une unique population de baleines bleues. Le réseau OHASISBIO lui, couvre une vaste partie de l'océan Indien et abrite probablement des aires d'alimentation, mais aussi de reproduction et de simples routes migratoires. Il paraît donc plus fiable d'utiliser les vocalisations stéréotypées pour décrire la présence des baleines bleues dans cette région.

Cette étude est fondée sur des données discontinues, du fait du retrait des fichiers contenant des tirs sismiques. Il est toutefois probable que ces signaux, émis très régulièrement dans la bande de fréquence dans laquelle sont émis les D-calls, masquent de nombreux D-calls. De même, des D-calls bien distincts et détectés ont pu être éliminés avec les fichiers écartés. Si un algorithme de détection des D-calls plus discriminant venait à être créé, il faudrait l'appliquer sur les données OHASISBIO pour confirmer les patrons de présence établis dans cette thèse.

Qu'indique le comportement acoustique des baleines bleues sur leur usage de l'océan Indien comme lieu de reproduction et/ou d'alimentation ?

L'interprétation des détections obtenues apporte un éclairage nouveau sur l'utilisation du sud-ouest de l'océan Indien par les baleines bleues. Les régions sub-tropicales de l'océan Indien, particulièrement au large de Madagascar ou de l'île de la Réunion, sont bien connues pour être des aires de reproduction privilégiées des baleines à bosse (Trudelle et al., 2018). Les baleines bleues sont, elles, rarement observées près des côtes et leurs aires de reproduction dans le nord de l'océan Indien sont mal connues. La présence intensive de chants de baleines bleues Antarctique et pygmées de Madagascar au site MADW indique une zone d'intérêt pour la reproduction de ces deux populations. En revanche, le faible nombre de D-calls détectés suggère que les activités d'alimentation et de socialisation sont limitées dans cette région. En effet, ces vocalisations ont été majoritairement décrites dans des zones d'alimentation dans le Pacifique, dans l'Atlantique et au large de l'Antarctique (Oleson et al., 2007c; Schall et al., 2019; Miller et al., 2019). Dans les zones sub-antarctiques de l'océan Indien, le nombre de chant diminue et le nombre de D-calls augmente, reflétant un potentiel changement de comportement (acoustique et non-acoustique) des baleines bleues. Le sud-ouest de l'océan Indien est traversée par de nombreuses frontières océanographiques, telles que le front sub-antarctique et le front

polaire, et présente une forte production primaire estivale associées à une biomasse zooplanctonique conséquente (Pakhomov and McQuaid, 1996). Cette région est connue pour être une zone d'alimentation privilégiée de plusieurs mammifères marins tels que les éléphants de mer (Dragon et al., 2010), les orques (Guinet, 1992) ou encore des rorquals boréals (Kawamura, 1980). Les D-calls sont majoritairement détectés au printemps au site ELAN, situé à 56° S, une saison pendant laquelle la production primaire, mesurée par la concentration de chlorophylle A, est à son maximum dans les régions sub-antarctiques, dû à la fonte récente de la banquise (cf. Figure 7.14). Ces indicateurs suggèrent que cette région est principalement une aire d'alimentation pour les baleines bleues.

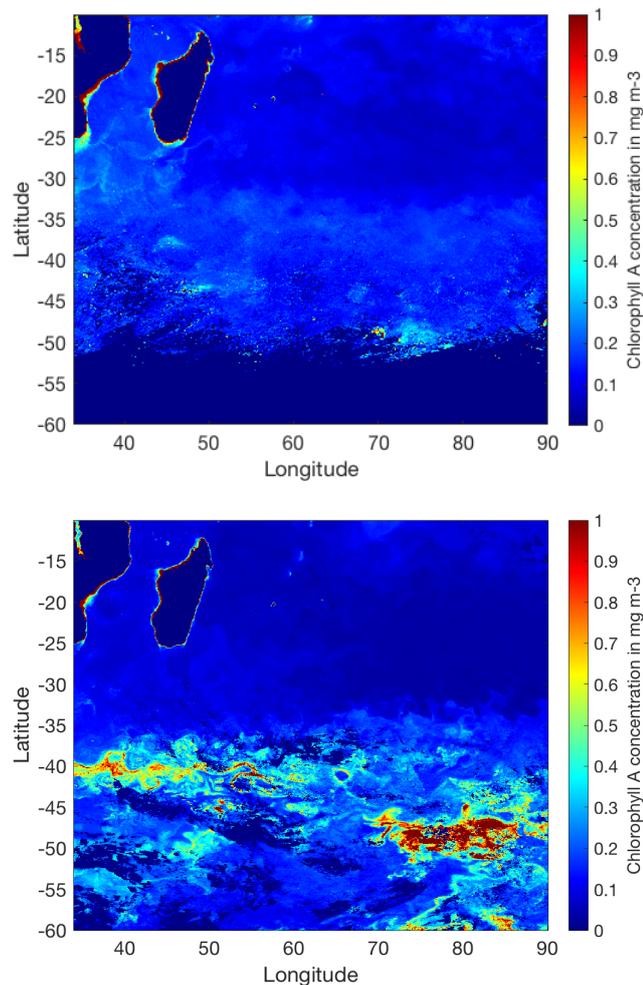


FIGURE 7.14 – Concentrations de chlorophyll A dans l’océan Indien (haut) en hiver et (bas) au printemps 2014, mesurée par satellite. Données téléchargées sur le site Copernicus, Global Ocean Biogeochemistry Hindcast dataset.

Chez le petit rorqual, le rythme d’émission des vocalisations présente des variations nyctémérales importantes sur une aire d’alimentation dans la baie du Massachussets alors que ce n’est pas le cas sur une aire de reproduction à Hawaii (Risch et al., 2013). Chez les baleines bleues du Pacifique, le rythme d’émission plus faible durant la journée serait un artefact du comportement de plongée, qui se nourriraient principalement la

journée sur les bancs de krill situés à des profondeurs auxquelles les baleines n'émettent pas de vocalisations (Stafford et al., 2005). On pourrait penser que transposer ce type d'approche aux baleines bleues de l'océan Indien apporterait des informations supplémentaires sur leur comportement. Néanmoins, les résultats présentés au chapitre 5 montrent que même si le rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues Antarctique est plus élevé durant la journée (Leroy et al., 2016), les variations diurnes et nocturnes sont bien plus limitées que chez les petits rorquals (Figure 5.1). Les résultats révèlent aussi l'absence de variations nyctémérales dans le rythme d'émission des vocalisations de baleines bleues pygmées. Interpréter ce rythme nyctéméral quasi uniforme reste difficile, sans plus d'informations sur le contexte d'émission des vocalisations. Au sud du réseau, le rythme d'émission des D-calls plus élevé durant le crépuscule suggère que l'activité d'alimentation des baleines bleues est plus importante durant cette période, qui coïncide avec le moment où le krill remonte à la surface. Des données complémentaires, comme les profils de plongées ou encore le régime alimentaire des baleines bleues sont nécessaires afin de mieux appréhender leur stratégies et leurs aires d'alimentation dans l'océan Indien austral.

Caractériser le comportement des baleines à partir de l'acoustique passive seule nécessite des études préalables associant acoustique passive et observation visuelle. Pour les baleines bleues, ce type d'étude a principalement été mené dans le golfe de Californie, facile d'accès, et où les baleines bleues du Pacifique reviennent se nourrir régulièrement (Oleson et al., 2007c; Lewis and Širović, 2017). Un nouveau projet de recherche sur le comportement (vocal et non-vocal) des populations côtières de baleines bleues pygmées du Chili mesuré par des balises acoustiques de type "Acousonde" a été lancé en février dernier (collaboration ENSTA Bretagne, CEAZA, Université de Conception). Ces balises, directement fixées sur l'animal par des ventouses, permettent de suivre à la fois le comportement de plongée et le comportement acoustique, et ce pendant plusieurs heures. Ce projet permettra d'étudier cette population de baleines bleues pygmées, mal connue mais facilement accessible depuis la côte. Collecter des données similaires sur les baleines bleues Antarctique et pygmées de l'océan Indien serait idéal, si les conditions d'accès à ces populations hauturières n'étaient pas aussi difficiles.

Certaines données environnementales mériteraient aussi d'être examinées en regard des périodes de présence des baleines bleues, afin d'identifier les variables qui influenceraient leur distribution dans l'océan Indien. Par exemple, dans le golfe de Californie, la présence des baleines bleues est fortement conditionnée par la présence de krill. L'augmentation de la température de surface depuis 10 ans a aussi conduit les baleines bleues à prolonger leur séjour dans ces eaux californiennes (Szesciorka et al., 2020). En l'absence d'indicateurs directs de la présence de krill autour des mouillages du réseau OHASISBIO, il est impossible d'y extrapoler ces observations. En revanche, les données de température

de surface, de taux de chlorophylle A ou encore de position des fronts mesurées par satellite, sont disponibles. Il serait donc intéressant de croiser ces variables avec la présence acoustique des baleines bleues et de comparer les résultats avec ceux obtenus dans des zones côtières (Barlow et al., 2020; Szesciorka et al., 2020). Ces questions sont d'autant plus intéressantes dans le contexte actuel de changement climatique, de réchauffement et d'acidification des océans.

Comment évolue le bruit ambiant dans l'océan Indien et quelle est la contribution temporelle des tirs de canon à air ?

Le suivi du bruit ambiant sous-marin a de multiples applications. Caractériser le bruit permet de rendre compte des différentes sources sonores caractérisant le paysage acoustique. Suivre son évolution au cours du temps sert aussi à surveiller des phénomènes globaux tels que l'augmentation ou la diminution du trafic maritime ou encore la présence saisonnière de glace de mer. Enfin, mesurer systématiquement les niveaux de bruit permet de se rendre compte d'éventuels problèmes d'instrumentation, particulièrement dans le cadre d'un observatoire long-terme.

L'étude présentée dans le chapitre 6 montre qu'à l'instar des autres océans, le niveau de bruit dans la bande de fréquence 40-60 Hz diminue depuis quelques années. Ce phénomène, aussi enregistré dans les océans Pacifique et Atlantique, semble global (Matsumoto et al., 2014). Le chapitre 6 souligne aussi la présence importante de tirs sismiques dans les enregistrements, plus particulièrement au nord du réseau OHASISBIO. En effet, aux sites MAD et NEAMS, chaque année, près de 40% des enregistrements, contiennent des signaux sonores de tirs sismiques. Les sons d'origine anthropique sont aujourd'hui considérés comme une pollution à part entière, au même titre que la pollution chimique. Une réglementation est progressivement mise en place pour limiter l'impact du bruit anthropique sur la faune marine. Dans cette démarche, les travaux de Southall et al. (2009), réactualisés en 2019 Southall et al. (2019) posent les bases de protocoles de mitigation pour les campagnes de prospection sismique. En Europe, la Directive Cadre Stratégique pour le Milieu Marin (DCSMM) a pour objectif l'atteinte du bon état écologique des eaux territoriales. C'est l'une des premières politiques internationales à considérer explicitement la pollution sonore sous-marine à travers deux critères : les émissions impulsives (*e.g.* tirs sismiques, explosions sous-marines) et les émissions continues.

Il serait intéressant, pour les 10 ans du réseau OHASISBIO de réactualiser l'étude de Tsang-Hin-Sun et al. (2015) et dresser un bilan plus complet de l'évolution du bruit ambiant et de la contribution des différentes sources, qu'elles soient biologiques (grandes baleines), géophysiques (icebergs, séismes) ou anthropiques (trafic maritime, tirs sismiques). De plus, continuer de suivre l'évolution du bruit ambiant dans cette région per-

mettra aussi de vérifier si la diminution du niveau de bruit ambiant se confirme et de comparer son évolution avec les autres océans. Enfin, observer le paysage acoustique en surface serait utile pour mieux comprendre ce que les baleines bleues perçoivent vraiment et comment les sources anthropiques le perturbent.

Conclusion

Cette thèse souligne l'importance de maintenir des observatoires acoustiques à long-terme pour caractériser les distributions des mammifères marins et révéler de potentielles évolutions de ces distributions. En l'occurrence, la décennie d'enregistrements étudiée dans cette thèse ne montre pas de changements majeurs de distribution des populations de baleines bleues présentes dans l'océan Indien austral. Elle révèle toutefois des variations importantes de fréquentation selon les années à certains sites, probablement liées aux conditions environnementales plus ou moins favorables.

De toute évidence, si la surveillance par acoustique passive a fourni des informations sans précédent sur la présence saisonnière et géographique de multiples populations acoustiques de baleines bleues dans le sud de l'océan Indien, ce n'est qu'en l'inscrivant dans une démarche interdisciplinaire que nous comprendrons pleinement l'écologie de ces animaux. Dans l'approche acoustique, la standardisation des pratiques d'annotation et de détection des vocalisations est essentielle pour obtenir des résultats fiables et reproductibles. La méconnaissance du niveau source des vocalisations et de leur rayon de propagation demeurent des verrous à lever pour répondre à des questions écologiques plus poussées, comme les densités de populations et leur évolution au cours du temps, ou le comportement des populations de baleines bleues dans l'océan Indien austral. Identifier les variables environnementales qui influencent la présence des baleines paraît aussi une question cruciale, particulièrement dans le contexte actuel de changement climatique. Enfin, continuer à surveiller l'évolution du niveau de bruit dans les océans et quantifier les contributions anthropiques sont deux éléments indispensables pour évaluer leur effet sur la faune marine. L'ensemble de ces informations permettra de mieux comprendre comment les baleines utilisent l'océan Indien comme habitat, et, à partir de là, de savoir comment mieux protéger ces grandes baleines et favoriser le rétablissement de leurs populations.

Bibliographie

- Aharon, M., Elad, M., and Bruckstein, A. (2006). K -SVD : An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 54(11) :4311–4322.
- Akamatsu, T., Rasmussen, M. H., Iversen, M., Rasmussen, M. H., and Iversen, M. (2015). Acoustically invisible feeding blue whales in Northern Icelandic waters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 939(2) :939–944.
- Alling, A., Dorsey, E. M., and Gordon, J. C. D. (1991). Blue whales (*Balaenoptera musculus*) off the northeast coast of Sri Lanka : distribution, feeding and individual identification. *UNEP Marine Mammal Technical Report*, 3(January) :247–258.
- Andrew, R. K., Howe, B. M., Mercer, J. A., and Dzieciuch, M. A. (2002). Ocean ambient sound : comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the california coast. *Acoustics Research Letters Online*, 3(2) :65–70.
- Aroyan, J. L., McDonald, M. A., Webb, S. C., Hildebrand, J. A., Clark, D., Laitman, J. T., and Reidenberg, J. S. (2000). Acoustic models of sound production and propagation. In *Hearing by whales and dolphins*, pages 409–469. Springer.
- Atkinson, A., Ward, P., Williams, R., and Poulet, S. (1992). Diel vertical migration and feeding of copepods at an oceanic site near south georgia. *Marine Biology*, 113(4) :583–593.
- Attard, C. R. M., Beheregaray, L. B., Jenner, K. C. S., Gill, P. C., Jenner, M.-n., and Morrice, M. G. (2012). Hybridization of southern Hemisphere blue whale subspecies and a sympatric area off Antarctica : impacts of whaling or climate change ? *Molecular Ecology*, 21 :5715–5727.
- Au, W. W. and Banks, K. (1998). The acoustics of the snapping shrimp (*Synalpheus paraneomeris*) in kaneohe bay. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(1) :41–47.
- Baraff, L. S., Clapham, P. J., Mattila, D. K., and Bowman, R. S. (1991). Feeding behavior of a humpback whale in low-latitude waters. *Marine Mammal Science*, 7(2) :197–202.

- Barlow, D. R., Bernard, K. S., Escobar-flores, P., Palacios, D. M., and Torres, L. G. (2020). Links in the trophic chain : modeling functional relationships between in situ oceanography, krill, and blue whale distribution under different oceanographic regimes. *Marine Ecology Progress Series*, 642 :207–225.
- Barlow, J. (1994). *Recent information on the status of large whales in California waters*, volume 203. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Baumgartner, M. F., Van Parijs, S. M., Wenzel, F. W., Tremblay, C. J., Carter Esch, H., and Warde, A. M. (2008). Low frequency vocalizations attributed to sei whales (*Balaenoptera borealis*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(2) :1339–1349.
- Besseling, E., Foekema, E., Van Franeker, J., Leopold, M., Kühn, S., Rebolledo, E. B., Heße, E., Mielke, L., IJzer, J., Kamminga, P., et al. (2015). Microplastic in a macro filter feeder : humpback whale (*Megaptera novaeangliae*). *Marine pollution bulletin*, 95(1) :248–252.
- Best, P. B., Rademeyer, R. A., Burton, C. L. K., Ljungblad, D., Sekiguchi, K., Shimada, H., Thiele, D., Reeb, D., and Butterworth, D. S. (2003). The abundance of blue whales on the Madagascar Plateau, December 1996. *Journal of Cetacean Research and Management*, 5(3) :253–260.
- Biffard, B., Morley, M., Hoeberechts, M., Rempel, A., Dakin, T., Dewey, R. K., and Jenkins, R. (2018). Adding value to big acoustic data from ocean observatories : Metadata, online processing, and a computing sandbox. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3) :1956–1956.
- Blyth, E. (1859). On the great rorqual of the indian ocean, with notices of other cetals, and of the syrenia or marine pachyderms. *Journal of the Asiatic Society of Bengal*, 28(5) :481–498.
- Bouffaut, L., Dréo, R., Labat, V., Boudraa, A.-O., and Barruol, G. (2018). Passive stochastic matched filter for Antarctic blue whale call detection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(2) :955–965.
- Branch, T., Allison, C., Mikhalev, Y., Tormosov, D., and Brownell Jr, R. (2008). Historical catch series for antarctic and pygmy blue whales. *Report (SC/60/SH9) to the Scientific Committee of the International Whaling Commission*, 135.
- Branch, T. and 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., Monnahan, C., Širović, A., Balcazar, N., Barlow, D., Cerchio, S., Double, M., Gavrilov, A., Gedamke, J., Hodge, K., Jenner, C., McCauley, D., Miksis-Olds, J., Samaran, F., Shabangu, F., Stafford, K., Thomisch, K., Torres, L., and Tripovich, J. (2019). Further analyses to separate pygmy blue whale catches by population. *Report (SC/68A/SH/15) to the Scientific Committee of the International Whaling Commission, available on request from the Secretariat, International Whaling Commission, The Red House.*
- Branch, T. A., Matsuoka, K., and 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. A., and Kato, H. (2009). Separating pygmy and Antarctic blue whales using long-forgotten ovarian data. *Marine Mammal Science*, 25(October) :833–854.
- Branch, T. A., Stafford, K. M., Palacios, D. M., Allison, C., Bannister, J. L., Burton, C., Cabrera, E., Carlson, C. A., Galletti Vernazzani, B., Gill, P. C., Hucke-Gaete, R., Jenner, K. C. S., Jenner, M. N., Matsuoka, K., Mikhalev, Y. A., Miyashita, T., Morrice, M. G., Nishiwaki, S., Sturrock, V. J., Tormosov, D., Anderson, R. C., Baker, A. N., Best, P. B., Borsa, P., Brownell, R. L., Childerhouse, S., Findlay, K. P., Gerrodette, T., Ilangakoon, A. D., Joergensen, M., Kahn, B., Ljungblad, D. K., Maughan, B., McCauley, R. D., McKay, S., Norris, T. F., Rankin, S., Samaran, F., Thiele, D., Van Waerebeek, K., and Warneke, R. M. (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.
- Brinton, E. (1967). Vertical migration and avoidance capability of euphausiids in the california current. *Limnology and Oceanography*, 12(3) :451–483.
- Brueggeman, J., Newby, T., and Grotefendt, R. (1985). Seasonal abundance, distribution and population characteristics of blue whales reported in the 1917 to 1939 catch records of two alaska whaling stations. *Inter.Whal. Commn*, 35 :405–411.
- Calambokidis, J. and Barlow, J. (2004). Abundance of blue and humpback whales in the eastern north pacific estimated by capture-recapture and line-transect methods. *Marine Mammal Science*, 20(1) :63–85.
- Caldwell, J. and Dragoset, W. (2000). A brief overview of seismic air-gun arrays. *The Leading Edge*, pages 898–902.
- Cartwright, M., Dove, G., Méndez Méndez, A. E., Bello, J. P., and Nov, O. (2019). Crowd-sourcing multi-label audio annotation tasks with citizen scientists. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–11.

- Cartwright, M., Seals, A., Salamon, J., Williams, A., Mikloska, S., MacConnell, D., Law, E., Bello, J. P., and Nov, O. (2017). Seeing sound : investigating the effects of visualizations and complexity on crowdsourced audio annotations. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 1(CSCW) :1–21.
- Cassoff, R. M., Moore, K. M., McLellan, W. A., Barco, S. G., Rotstein, D. S., and Moore, M. J. (2011). Lethal entanglement in baleen whales. *Diseases of aquatic organisms*, 96(3) :175–185.
- Castellote, M., Clark, C. W., and Lammers, M. O. (2012). Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation*, 147(1) :115–122.
- Cerchio, S., Rasoloarijao, T., and Cholewiak, D. M. (2018). Acoustic monitoring of blue whales (*Balaenoptera musculus*) and other baleen whales in the Mozambique Channel off the northwest coast of Madagascar (SC/67B/SH/14). Technical report, International Whaling Commission.
- Chambault, P., De Thoisy, B., Heerah, K., Conchon, A., Barrioz, S., Dos Reis, V., Berzins, R., Kelle, L., Picard, B., Roquet, F., et al. (2016). The influence of oceanographic features on the foraging behavior of the olive ridley sea turtle (*Lepidochelys olivacea*) along the guiana coast. *Progress in Oceanography*, 142 :58–71.
- Charrier, I., Mathevon, N., and Jouventin, P. (2003). Vocal signature recognition of mothers by fur seal pups. *Animal Behaviour*, 65(3) :543–550.
- Cholewiak, D. (2008). *Evaluating the role of song in the humpback whale (Megaptera novaeangliae) breeding system with respect to intra-sexual interactions*. PhD thesis, Cornell University.
- Clark, C. W. (1982). The acoustic repertoire of the southern right whale, a quantitative analysis. *Animal Behaviour*, 30(4) :1060–1071.
- Clark, C. W. (1990). Acoustic behavior of mysticete whales. In *Sensory abilities of cetaceans*, pages 571–583. Springer.
- Clark, C. W. and Clapham, P. J. (2004). Acoustic monitoring on a humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) feeding ground shows continual singing into late spring. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 271(1543) :1051–1057.
- Clark, C. W., Ellison, W. T., Southall, B. L., Hatch, L., Van Parijs, S. M., Frankel, A., and Ponirakis, D. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems : intuitions, analysis, and implication. *Marine Ecology Progress Series*, 395 :201–222.

-
- Clark, C. W. and Fristrup, K. M. (1997). Whales '95 : A combined visual and acoustic survey of blue and fin whales off southern California. *Report of the International Whaling Commission*, 47 :583–600.
- Clarke, R., Aguayo, L. A., and Del, C. S. B. (1978). Whale observation and whale marking off the coast of Chile in 1964. *Scientific Reports of the Whales Research Institute*, Tokyo(3) :117–178.
- Cooke, J. (2019). *Balaenoptera musculus*, (errata version published in 2019). Technical report, The IUCN Red List of Threatened Species 2018.
- Croll, D. A., Tershy, B. R., Hewitt, R. P., Demer, D. A., Fiedler, P. C., Smith, S. E., Armstrong, W., Popp, J. M., Kiekhefer, T., Lopez, V. R., et al. (1998). An integrated approach to the foraging ecology of marine birds and mammals. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 45(7) :1353–1371.
- Cummings, W. C., Fish, J. F., and Thompson, P. O. (1972). Sound production and other behavior of southern right whales, *Eubalen glacialis*. *Transactions of the San Diego Society of Natural History*, 17 :1–14.
- Cummings, W. C. and Thompson, P. O. (1971). Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 50(4B) :1193.
- Davis, G. E., Baumgartner, M. F., Bonnell, J. M., Bell, J., Berchok, C., Thornton, J. B., Brault, S., Buchanan, G., Charif, R. A., Cholewiak, D., et al. (2017). Long-term passive acoustic recordings track the changing distribution of north atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) from 2004 to 2014. *Scientific reports*, 7(1) :1–12.
- De Vos, A., Brownell, R. L., Tershy, B., and Croll, D. (2016). Anthropogenic Threats and Conservation Needs of Blue Whales, (*Balaenoptera musculus indica*), around Sri Lanka. *Journal of Marine Biology*, 2016.
- Deng, J., Russakovsky, O., Krause, J., Bernstein, M. S., Berg, A., and Fei-Fei, L. (2014). Scalable multi-label annotation. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 3099–3102.
- Di Iorio, L. and Clark, C. W. (2010). Exposure to seismic survey alters blue whale acoustic communication. *Biology Letters*, 6(September 2009) :51–54.
- Dominello, T. and Širović, A. (2016). Seasonality of Antarctic minke whale (*Balaenoptera bonaerensis*) calls off the western Antarctic Peninsula. *Marine Mammal Science*, 32(July) :826–838.

- Double, M. C., Andrews-Goff, V., Jenner, K. C. S., Jenner, M. N., Laverick, S. M., Branch, T. A., and Gales, N. J. (2014). Migratory movements of pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) between Australia and Indonesia as revealed by satellite telemetry. *PLoS ONE*, 9(4) :1–11.
- Dragon, A.-C., Monestiez, P., Bar-Hen, A., and Guinet, C. (2010). Linking foraging behaviour to physical oceanographic structures : Southern elephant seals and mesoscale eddies east of kerguelen islands. *Progress in Oceanography*, 87(1-4) :61–71.
- Duhamel, G., Koubbi, P., and Ravier, C. (2000). Day and night mesopelagic fish assemblages off the kerguelen islands (southern ocean). *Polar Biology*, 23(2) :106–112.
- Dunlop, R. A. (2017). Potential motivational information encoded within humpback whale non-song vocal sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3) :2204–2213.
- Dunlop, R. A., Noad, M. J., Cato, D. H., and Stokes, D. M. (2007). The social vocalization repertoire of east Australian migrating humpback whales (*Megaptera novaeangliae*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(5) :2893.
- Dunlop, R. A., Noad, M. J., McCauley, R. D., Kniest, E., Slade, R., Paton, D., and Cato, D. H. (2018). A behavioural dose-response model for migrating humpback whales and seismic air gun noise. *Marine Pollution Bulletin*, 133(June) :506–516.
- Dziak, R. P., Fowler, M. J., Matsumoto, H., Bohnenstiehl, D. R., Park, M., Warren, K., and Lee, W. S. (2013). Life and death sounds of iceberg a53a. *Oceanography*, 26(2) :10–13.
- Ensor, P., Komiya, H., Beasley, I., Fukutome, K., Olson, P., and Tsuda, Y. (2007). 2006-2007 international whaling commission-southern ocean whale and ecosystem research (iwc-sower) cruise. Technical report, Paper SC/59/IA1, International Whaling Commission (unpubl.).
- Evans, C. S. and Marler, P. (1994). Food calling and audience effects in male chickens, (*Gallus gallus* : their relationships to food availability, courtship and social facilitation. *Animal Behaviour*, 47(5) :1159–1170.
- Evans, C. S., Marler, P., et al. (1995). Language and animal communication : parallels and contrasts. *Comparative approaches to cognitive science*, pages 341–382.
- Fewtrell, J. L. and McCauley, R. D. (2012). Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Marine Pollution Bulletin*, 64(5) :984–993.
- Figueroa, H. and Robbins, M. (2008). Xbat : an open-source extensible platform for bioacoustic research and monitoring. *Computational bioacoustics for assessing biodiversity*, pages 143–155.

-
- Fitzgibbon, Q. P., Day, R. D., McCauley, R. D., Simon, C. J., and Semmens, J. M. (2017). The impact of seismic air gun exposure on the haemolymph physiology and nutritional condition of spiny lobster, *Jasus edwardsii*. *Marine Pollution Bulletin*, 125(1-2) :146–156.
- Fleiss, J. L. (1975). Measuring agreement between two judges on the presence or absence of a trait. *Biometrics*, pages 651–659.
- Fossi, M. C., Panti, C., Guerranti, C., Coppola, D., Giannetti, M., Marsili, L., and Minutoli, R. (2012). Are baleen whales exposed to the threat of microplastics? a case study of the mediterranean fin whale (*Balaenoptera physalus*). *Marine pollution bulletin*, 64(11) :2374–2379.
- Fournet, M. E. H., Matthews, L. P., Gabriele, C. M., Mellinger, D. K., and Klinck, H. (2018). Source levels of foraging humpback whale calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(2) :EL105–EL111.
- Gavrilov, A. N. and 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., and 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. S., and Burton, C. (2011). Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(6) :3651–3660.
- Geissmann, T. (2002). Duet-splitting and the evolution of gibbon songs. *Biological Reviews*, 77(1) :57–76.
- Gendron, D. (1993). Evidence of feeding by humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in the baja california breeding ground, mexico. *Marine Mammal Science*, 9(1) :76–81.
- Genin, A., Hauray, L., and Greenblatt, P. (1988). Interactions of migrating zooplankton with shallow topography : predation by rockfishes and intensification of patchiness. *Deep Sea Research Part 1. Oceanographic Research Papers*, 35(2) :151–175.
- Gill, P. C. (2002). A blue whale (*Balaenoptera musculus*) feeding ground in a southern Australian coastal upwelling zone. *Journal of Cetacean Research and Management*, 4(2) :179–184.
- Goldbogen, J. A., Cade, D. E., Wisniewska, D. M., Potvin, J., Segre, P. S., Savoca, M. S., Hazen, E. L., Czapanskiy, M., Kahane-Rapport, S. R., DeRuiter, S. L., et al. (2019).

- Why whales are big but not bigger : Physiological drivers and ecological limits in the age of ocean giants. *Science*, 366(6471) :1367–1372.
- Guilment, T., Socheleau, F.-X., Pastor, D., and Vallez, S. (2018). Sparse representation-based classification of mysticete calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3) :1550–1563.
- Guinet, C. (1992). Comportement de chasse des orques (*Orcinus orca*) autour des îles crozet. *Canadian Journal of Zoology*, 70(9) :1656–1667.
- Guinet, C., Vacquié-Garcia, J., Picard, B., Bessigneul, G., Lebras, Y., Dragon, A. C., Viviant, M., Arnould, J. P., and Bailleul, F. (2014). Southern elephant seal foraging success in relation to temperature and light conditions : insight into prey distribution. *Marine Ecology Progress Series*, 499 :285–301.
- Hafner, G. W., Hamilton, C. L., Steiner, W. W., Thompson, T. J., and Winn, H. E. (1979). Signature information in the song of the humpback whale. *Journal of the Acoustical Society of America*, 66(1) :1–6.
- Hamame, M. and Antezana, T. (2010). Vertical diel migration and feeding of euphausia vallentini within southern chilean fjords. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 57(7-8) :642–651.
- Hantke, S., Marchi, E., and Schuller, B. (2016). Introducing the weighted trustability evaluator for crowdsourcing exemplified by speaker likability classification. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'16)*, pages 2156–2161.
- Hatch, L. T., Clark, C. W., Van Parijs, S. M., Frankel, A. S., and Ponirakis, D. W. (2012). Quantifying loss of acoustic communication space for right whales in and around a us national marine sanctuary. *Conservation Biology*, 26(6) :983–994.
- Haver, S. M., Klinck, H., Nieukirk, S. L., Matsumoto, H., Dziak, R. P., and Miksis-Olds, J. L. (2017). The not-so-silent world : Measuring Arctic, Equatorial, and Antarctic soundscapes in the Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research Part I*, 122(December 2016) :95–104.
- Helble, T. A., Ierley, G. R., D'Spain, G. L., Roch, M. A., and Hildebrand, J. A. (2012). A generalized power-law detection algorithm for humpback whale vocalizations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4) :2682–2699.
- Helweg, D. A., Frankel, A. S., Mobley, J. R., and Herman, L. M. (1992). Humpback whale song : Our current understanding. In *Marine mammal sensory systems*, pages 459–483. Springer.

-
- Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395 :5–20.
- Ichihara, T. (1966). The pygmy blue whale, *balaenoptera musculus brevicauda*, a new subspecies from the antarctic. *Whales, dolphins, and porpoises*, pages 79–111.
- Indeck, K. L., Girola, E., Torterotot, M., Noad, M. J., and Dunlop, R. A. (2020). Adult female-calf acoustic communication signals in migrating east australian humpback whales. *Bioacoustics*, pages 1–25.
- Ingebrigtsen, A. (1929). Whales caught in the north atlantic and other seas. *Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer. Rapports et Proces-Verbaux des Reunions*, 56 :123–135.
- Jenner, C., Jenner, M., Burton, C., Sturrock, V., Salgado Kent, C., Morrice, M., Attard, C., Moller, L., and Double, M. (2008). Mark recapture analysis of pygmy blue whales from the perth canyon, western australia 2000–2005. paper submitted for consideration by the iwc scientific committee sc/60/sh16. Technical report, SC/60/SH16. pp.
- Joliffe, C. D., McCauley, R. D., Gavrilov, A. N., Jenner, K. C. S., Jenner, M.-N. M., and Duncan, A. J. (2019). Song variation of the South Eastern Indian Ocean pygmy blue whale population in the Perth Canyon , Western Australia. *PLoS ONE*, pages 1–26.
- Kanes, K. S. J. . (2019). Workshop Report : Standards for annotating & storing marine passive acoustic data & metadata standards for annotating & storing marine passive acoustic data and metadata. Technical Report February, Ocean Network Canada.
- Kato, H., Matsuoka, K., Nishiwaki, S., and Bannister, J. (2007). Distributions of abundance of pygmy blue whales and southern right whales in waters off southern coast of australia based on data from the japan/iwc blue whale cruise 1996–96. *Unpublished report (SC/59/SH10) presented to the Scientific Committee of the IWC, Cambridge, UK.*
- Kawaguchi, S., Kurihara, H., King, R., Hale, L., Berli, T., Robinson, J. P., Ishida, A., Wakita, M., Virtue, P., Nicol, S., et al. (2011). Will krill fare well under southern ocean acidification? *Biology Letters*, 7(2) :288–291.
- Kawamura, A. (1980). Food habits of the bryde's whales taken in the south pacific and indian oceans. *Scientific Reports of the Whales Research Institute*, 32 :1–23.
- Kindermann, L., Boebel, O., Bornemann, H., Burkhardt, E., Klinck, H., Opzeeland, I., Plötz, J., and Seibert, A.-M. (2008). A perennial acoustic observatory in the antarctic ocean. In *Computational bioacoustics for assessing biodiversity : proceedings of the international expert meeting on IT-based detection of bioacoustical patterns, December 7th until December 10th, 2007 at the international academy for nature conservation (INA) isle.*

- Knowlton, A. R., Hamilton, P. K., Marx, M. K., Pettis, H. M., and Kraus, S. D. (2012). Monitoring north atlantic right whale *Eubalaena glacialis* entanglement rates : a 30 yr retrospective. *Marine Ecology Progress Series*, 466 :293–302.
- Knudsen, V. O., Alford, R., and Emling, J. (1948). Underwater ambient noise. *J. Mar. Res.*, 7(3) :410–429.
- Kondo, N. and Watanabe, S. (2009). Contact calls : Information and social function. *Japanese Psychological Research*, 51(3) :197–208.
- Krishna, R., Zhu, Y., Groth, O., Johnson, J., Hata, K., Kravitz, J., Chen, S., Kalantidis, Y., Li, L.-J., Shamma, D. A., et al. (2017). Visual genome : Connecting language and vision using crowdsourced dense image annotations. *International Journal of Computer Vision*, 123(1) :32–73.
- Kyhn, L. A., Wisniewska, D. M., Beedholm, K., Tougaard, J., Simon, M., Mosbech, A., and Madsen, P. T. (2019). Basin-wide contributions to the underwater soundscape by multiple seismic surveys with implications for marine mammals in Baffin Bay , Greenland. *Marine Pollution Bulletin*, 138(January 2018) :474–490.
- Lagerquist, B., Stafford, K., and Mate, B. (2000). Dive characteristics of satellite-monitored blue whales (*Balaenoptera musculus*) off the central california coast. *Marine Mammal Science*, 16(2) :375–391.
- Laws, R. M. (1985). The ecology of the southern ocean. *Amer. Scient.*, 73 :26–40.
- Lecoulant, J., Guennou, C., Guillon, L., and Royer, J.-Y. (2019). Three-dimensional modeling of earthquake generated acoustic waves in the ocean in simplified configurations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(3) :2113–2123.
- LeDuc, R., a.G. Dizon, Goto, M., Pastene, L., Kato, H., Nishiwaki, C., LeDuc, C., and Brownell, R. (2007). Patterns of genetic variation in Southern Hemisphere blue whales and the use of assignment test to detect mixing on the feeding grounds. *J. Cetacean Res. Manage*, 9 :73–80.
- LeDuc, R., Archer, F., Lang, A., Martien, K., Hancock-Hanser, B., Torres-Florez, J., Huckle-Gaete, R., Rosenbaum, H., Van Waerebeek, K., Brownell Jr, R., et al. (2017). Genetic variation in blue whales in the eastern pacific : Implication for taxonomy and use of common wintering grounds. *Molecular ecology*, 26(3) :740–751.
- Lee, J. H. (2010). Crowdsourcing music similarity judgments using mechanical turk. In *ISMIR*, pages 183–188.

-
- Leroy, E. C. (2017). *Surveillance acoustique des baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien austral : traitement, analyse et interprétation des signaux*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale.
- Leroy, E. C., Royer, J.-Y., Alling, A., Maslen, B., and Rogers, T. L. (revised in August 2020). Multiple pygmy blue whale acoustic populations in the Indian Ocean : whale song identifies a possible new population. *Science Reports*.
- Leroy, E. C., Royer, J.-Y., Bonnel, J., and Samaran, F. (2018a). Long-term and seasonal changes of large whale call frequency in the Southern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 123 :1–13.
- Leroy, E. C., Samaran, F., Bonnel, J., and Royer, J.-Y. (2016). Seasonal and diel vocalization patterns of Antarctic blue whale (*Balaenoptera musculus intermedia*) in the Southern Indian Ocean : A multi-year and multi-site study. *PLoS ONE*, 11(11).
- Leroy, E. C., Samaran, F., Bonnel, J., and Royer, J.-Y. (2017). Identification of two potential whale calls in the southern Indian Ocean, and their geographic and seasonal occurrence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(3) :1413–1427.
- Leroy, E. C., Samaran, F., Stafford, K. M., Bonnel, J., and Royer, J.-y. (2018b). Broad-scale study of the seasonal and geographic occurrence of blue and fin whales in the Southern Indian Ocean. *Endangered Species Research*, 37 :289–300.
- Leroy, E. C., Thomisch, K., Royer, J.-Y., Boebel, O., and Van Opzeeland, I. (2018c). On the reliability of acoustic annotations and automatic detections of Antarctic blue whale calls under different acoustic conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(2) :740–754.
- Levy, M. (2011). Improving perceptual tempo estimation with crowd-sourced annotations. In *ISMIR*, pages 317–322.
- Lewis, L. A., Calambokidis, J., Stimpert, A. K., Fahlbusch, J., Friedlaender, A. S., McKenna, M. F., Mesnick, S. L., Oleson, E. M., Southall, B. L., Szesciorka, A. R., and Širović, A. (2018). Context-dependent variability in blue whale acoustic behaviour. *Royal Society Open Science*, 5(8) :180241.
- Lewis, L. A. and Širović, A. (2017). Variability in blue whale acoustic behavior off southern California. *Marine Mammal Science*, 34 :311–329.
- Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Land, K., Bamford, S., Thomas, D., Raddick, M. J., Nichol, R. C., Szalay, A., Andreescu, D., et al. (2008). Galaxy zoo : morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 389(3) :1179–1189.

- Ljungblad, D., Clark, C. W., and Shimada, H. (1998). A comparison of sounds attributed to pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) recorded south of the madagascar plateau and those attributed to 'true' blue whales (*Balaenoptera musculus*) recorded off antarctica. *Report-International Whaling Commission*, Sc/49/sh17 :439–442.
- Ljungblad, D. K., Stafford, K. M., Shimada, H., and Matsuoka, K. (1997). Sounds attributed to blue whales recorded off the southwest coast of australia in december 1995. *Report of the International Whaling Commission*, 47 :435–439.
- Ljungblad, D. K., Thompson, P. O., and Moore, S. E. (1982). Underwater sounds recorded from migrating bowhead whales, *Balaena mysticetus*, in 1979. *Journal of the Acoustical Society of America*, 71(2) :477–482.
- Lurton, X. (2002). *An introduction to underwater acoustics : principles and applications*. Springer Science & Business Media.
- Mackintosh, N. (1966). The distribution of southern blue and fin whales. *Whales, dolphins, and porpoises*, pages 125–144.
- Marques, T. A., Thomas, L., Martin, S. W., Mellinger, D. K., Ward, J. A., Moretti, D. J., Harris, D., and 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. A., Fowler, M., and Salo, S. A. (2014). Antarctic icebergs : A significant natural ocean sound source in the Southern Hemisphere. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15 :3448–3458.
- McCauley, R. and Jenner, C. (2010). Migratory patterns and estimated population size of pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) traversing the western australian coast based on passive acoustics. *IWC SC/62/SH26*.
- McCauley, R. D., Day, R. D., Swadling, K. M., Fitzgibbon, Q. P., Watson, R. A., and Semmens, J. M. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Ecology and Evolution*, 1(June) :1–8.
- McCauley, R. D., Gavrilov, A. N., Jolli, C. D., Ward, R., and Gill, P. C. (2018). Pygmy blue and Antarctic blue whale presence, distribution and population parameters in southern Australia based on passive acoustics. *Deep-Sea Research Part II*, 158(October 2017) :154–168.

-
- McCauley, R. D., Jenner, C., Bannister, J. L., Chris, L. K., Cato, D. H., and Duncan, A. (2001). Blue Whale Calling in the Rottnest Trench - 2000 , Western Australia. Technical Report February, Center for Marine Science and Technology, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia.
- McCordic, J. A., Root-Gutteridge, H., Cusano, D. A., Denes, S. L., and Parks, S. E. (2016). Calls of north atlantic right whales *Eubalaena glacialis* contain information on individual identity and age class. *Endangered Species Research*, 30 :157–169.
- McDonald, M. A., Calambokidis, J., Teranishi, A. M., and 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. and Fox, C. G. (1999). Passive acoustic methods applied to fin whale population density estimation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(5) :2643–2651.
- McDonald, M. A., Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M., Thiele, D., Glasgow, D., and Moore, S. E. (2005). Sei whale sounds recorded in the Antarctic. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(6) :3941–3945.
- McDonald, M. A., Mesnick, S. L., and Hildebrand, J. A. (2006). Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide : using song to identify populations. *Journal of Cetacean Research and Management*, 8(1) :55–65.
- Mellinger, D. K. and Clark, C. W. (1997). Methods for automatic detection of mysticete sounds. *Marine Behavioural Physiology*, 29 :163–181.
- Mellinger, D. K. and 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. and Clark, C. W. (2003). Blue whale (*Balaenoptera musculus*) sounds from the North Atlantic. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(2) :1108–1119.
- Mellinger, D. K., Stafford, K. M., and Fox, C. G. (2004a). Seasonal occurrence of sperm whale (*Physeter macrocephalus*) sounds in the gulf of alaska, 1999–2001. *Marine Mammal Science*, 20(1) :48–62.
- Mellinger, D. K., Stafford, K. M., Moore, S., Dziak, R. P., and Matsumoto, H. (2007). An Overview of Fixed Passive Acoustic Observation Methods for Cetaceans. *Oceanography*, 20(4) :36–45.

- Mellinger, K., Stafford, K. M., and Fox, G. (2004b). Seasonal occurrence of sperm whale (*Physeter Macrocephalus*) sounds in the gulf of Alaska, 1999-2001. *Marine Mammal Science*, 20(January) :48–62.
- Merchant, N. D., Fristrup, K. M., Johnson, M. P., Tyack, P. L., Witt, M. J., Blondel, P., and Parks, S. E. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(3) :257–265.
- Miksis-Olds, J. L., Bradley, D. L., Niu, X. M., Miksis-olds, J. L., Bradley, D. L., and Niu, X. M. (2013). Decadal trends in Indian Ocean ambient sound. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(2013).
- Miksis-Olds, J. L. and Nichols, S. M. (2016). Is low frequency ocean sound increasing globally? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(1) :501–511.
- Miller, B. S., Calderan, S., Miller, E. J., Širović, A., Stafford, K. M., Bell, E., and Double, M. C. (2019). A passive acoustic survey for marine mammals conducted during the 2019 antarctic voyage on euphausiids and nutrient recycling in cetacean hotspots. *Proceedings of ACOUSTICS 2019*.
- Miyashita, T., Kato, H., and Kasuya, T. (1995). Worldwide map of cetacean distribution based on japanese sighting data (volume 1). *National Research Institute of Far Seas Fisheries, Shimizu, Shizuoka, Japan*.
- Miyashita, T., Shigemune, H., and Kato, H. (1994). Outline of the sighting strategy of scouting vessels attached to japanese whaling fleets. *Report of the International Whaling Commission*, 44 :273–275.
- Moore, M. J. and Van der Hoop, J. M. (2012). The painful side of trap and fixed net fisheries : chronic entanglement of large whales. *Journal of Marine Biology*, 2012.
- Mouy, X., Bahoura, M., and Simard, Y. (2009). Automatic recognition of fin and blue whale calls for real-time monitoring in the St. Lawrence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(6) :2918–2928.
- Nemoto, T. (1959). Food of baleen whales with reference to whale movements. *Sci Rep Whales Res Inst Tokyo*, 14 :149–291.
- Nemoto, T. (1970). Feeding pattern of baleen whales in the ocean. *Marine food chains*, pages 241–252.
- Nguyen Hong Duc, P., Torterotot, M., Samaran, F., White, P. R., Gérard, O., Adam, O., and Cazau, D. (submitted in July 2020). Assessing inter-annotator agreement from collaborative annotation campaign in marine bioacoustics. *Ecological Informatics*.

-
- Nieukirk, S. L., Mellinger, D. K., Moore, S. E., Klinck, K., Dziak, R. P., and Goslin, J. (2012). Sounds from airguns and fin whales recorded in the mid-Atlantic Ocean, 1999–2009. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2) :1102–1112.
- Nieukirk, S. L., Stafford, K. M., Mellinger, D. K., Dziak, R. P., and Fox, C. G. (2004). Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(4) :1832–1843.
- Nishiwaki, M. (1966). Distribution and migration of the larger cetaceans in the north Pacific as shown by Japanese whaling results. *Whales, dolphins and porpoises*. University of California press, Berkeley, pages 171–191.
- Okal, E. A. and Talandier, J. (1986). T-wave duration, magnitudes and seismic moment of an earthquake-application to tsunami warning. *Journal of Physics of the Earth*, 34(1) :19–42.
- Oleson, E. M., Calambokidis, J., Barlow, J., and 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., and Hildebrand, J. A. (2007b). Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. *Marine Ecology Progress Series*, 330(January) :269–284.
- Oleson, E. M., Wiggins, S. M., and Hildebrand, J. A. (2007c). Temporal separation of blue whale call types on a southern California feeding ground. *Animal Behaviour*, 74(4) :881–894.
- O’Shea, T. J. and Brownell Jr, R. L. (1994). Organochlorine and metal contaminants in baleen whales : a review and evaluation of conservation implications. *Science of the Total Environment*, 154(2-3) :179–200.
- Oswald, J. N., Au, W. W., and Duennebie, F. (2011). Minke whale (balaenoptera acutorostrata) boings detected at the station aloha cabled observatory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(5) :3353–3360.
- Pakhomov, E. and McQuaid, C. (1996). Distribution of surface zooplankton and seabirds across the southern ocean. *Polar Biology*, 16(4) :271–286.
- Pati, Y. C., Rezaiifar, R., and Krishnaprasad, P. S. (1993). Orthogonal matching pursuit : Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition. In *Proceedings of 27th Asilomar conference on signals, systems and computers*, pages 40–44. IEEE.

- Payne, R. S. and McVay, S. (1971). Songs of Humpback Whales. *Science*, 173(3997) :585–597.
- Persohn, C., Helloco, L., Baudinière, E., and Martinez, L. (2020). Guide de préconisation pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d’origine anthropique sur la faune marine. Technical report, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.
- Pinto de sa Alves, L. C., Andriolo, A., Zerbini, A., Altmayer Pizzorno, J. L., and Clapham, P. (2009). Record of feeding by humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in tropical waters off brazil. *Publications, Agencies and Staff of the US Department of Commerce*, page 45.
- Rankin, S. and Barlow, J. (2007). Vocalizations of the sei whale *Balaenoptera borealis* off the hawaiian islands. *Bioacoustics*, 16(2) :137–145.
- Rankin, S., Ljungblad, D. K., and Clark, C. W. (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 Research Management*, 7(1) :13–20.
- Reeves, R. R., Smith, B. D., Crespo, E. A., and Notarbartolo di Sciara, G. (2003). *Dolphins, Whales and Porpoises : 2002–2010 conservation action plan for the world’s cetaceans*. IUCN.
- Reilly, S. (2008). *Balaenoptera musculus ssp*. The IUCN Red List of Threatened Species 2008. Technical report, The IUCN Red list of threatened species.
- Rice, D. W. (1974). Whales and whale research in the eastern north pacific. *The whale problem : A status report*. Harvard Press, Cambridge, MA, pages 170–195.
- Rice, D. W. (1998). *Marine mammals of the world : systematics and distribution*.
- Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I., and Thomson, D. H. (2013). *Marine mammals and noise*. Academic press.
- Risch, D., Clark, C. W., Dugan, P. J., Popescu, M., Siebert, U., and Van Parijs, S. M. (2013). Minke whale acoustic behavior and multi-year seasonal and diel vocalization patterns in. *Marine Ecology Progress Series*, 489 :279–295.
- Robineau, D. (2007). *Histoire de la chasse à la baleine*. Vuibert.
- Robinson, S. P., Lepper, P. A., and Hazelwood, R. A. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. Technical report, National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate.

-
- Rocha, R. C., Clapham, P. J., and Ivashchenko, Y. V. (1982). Emptying the oceans : a summary of industrial whaling catches in the 20th century. *Marine Fisheries Review*, 76(4) :37–48.
- Rockwood, R. C., Calambokidis, J., and Jahncke, J. (2017). High mortality of blue, hump-back and fin whales from modeling of vessel collisions on the us west coast suggests population impacts and insufficient protection. *PLoS One*, 12(8) :e0183052.
- Roemmich, D. and McGowan, J. (1995). Climatic warming and the decline of zooplankton in the california current. *Science*, 267(5202) :1324–1326.
- Rogers, T. L. (2003). Factors influencing the acoustic behaviour of male phocid seals. *Aquatic Mammals*, pages 247–260.
- Rolland, R. M., Graham, K. M., Stimmelmayer, R., Suydam, R. S., and George, J. C. (2019). Chronic stress from fishing gear entanglement is recorded in baleen from a bowhead whale (*Balaena mysticetus*). *Mar. Mam. Sci.* <https://doi.org/10.1111/mms.12596>.
- Romagosa, M., Baumgartner, M., Cascão, I., Lammers, M. O., Marques, T. A., Santos, R. S., and Silva, M. A. (2020). Baleen whale acoustic presence and behaviour at a Mid-Atlantic migratory habitat , the Azores Archipelago. *Scientific Reports*, pages 1–11.
- Ross, D. (1993). On ocean ambient noise. *Acoustics Bulletin*, 18 :5–5.
- Saddler, M. R., Bocconcelli, A., Hickmott, L. S., Chiang, G., Landea-briones, R., Bahamonde, P. A., Howes, G., Segre, P. S., and Sayigh, L. S. (2017). Characterizing Chilean blue whale vocalizations with DTAGs : a test of using tag accelerometers for caller identification. *Journal of Experimental Biology*, 220 :4119–4129.
- Samaran, F. (2008). *Analyse des signaux acoustiques d'origine biologique enregistrés dans l'ocean Indien : implications dans le recensement et le suivi des mouvements saisonniers des cétacés*. PhD thesis, La Rochelle.
- Samaran, F., Adam, O., and Guinet, C. (2010a). Discovery of a mid-latitude sympatric area for two Southern Hemisphere blue whale subspecies. *Endangered Species Research*, 12(2) :157–165.
- Samaran, F., Berne, A., Leroy, E. C., Moreira, S., Stafford, K. M., Maia, M., and Royer, J.-Y. (2019). Antarctic blue whales (*Balaenoptera musculus intermedia*) recorded at the Equator in the Atlantic Ocean. *Marine Mammal Science*, 35(2) :641–648.
- Samaran, F., Guinet, C., Adam, O., Motsch, J.-F., and Cansi, Y. (2010b). 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., and Guinet, C. (2013). Seasonal and geographic variation of southern blue whale subspecies in the Indian Ocean. *PLoS ONE*, 8(8).
- Schall, E., Iorio, L. D., Berchok, C., Filún, D., Bedriñana-romano, L., Buchan, S. J., Opzeeland, I. V., and Hucke-gaete, R. S. R. (2019). Visual and passive acoustic observations of blue whale trios from two distinct populations. *Marine Mammal Science*, pages 1–10.
- Seminoff, J. A., Zárate, P., Coyne, M., Foley, D. G., Parker, D., Lyon, B. N., and Dutton, P. H. (2008). Post-nesting migrations of galapagos green turtles *Chelonia mydas* in relation to oceanographic conditions : integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data. *Endangered Species Research*, 4(1-2) :57–72.
- Shabangu, F. W., Findlay, K. P., Yemane, D., Stafford, K. M., Berg, M. V. D., Blows, B., and Andrew, R. K. (2019). Seasonal occurrence and diel calling behaviour of Antarctic blue whales and fin whales in relation to environmental conditions off the west coast of South Africa. *Journal of Marine Systems*, 190(November 2017) :25–39.
- Shabangu, F. W., Yemane, D., Stafford, K. M., Ensor, P., and Findlay, K. P. (2017). Modelling the effects of environmental conditions on the acoustic occurrence and behaviour of Antarctic blue whales. *PLoS ONE*, 12(2) :1–24.
- Silber, G. K. (1986). The relationship of social vocalizations to surface behavior and aggression in the Hawaiian humpback whale (*Megaptera novaeangliae*). *Canadian Journal of Zoology*, 64(10) :2075–2080.
- Sills, J. M., Southall, B. L., and Reichmuth, C. (2017). The influence of temporally varying noise from seismic air guns on the detection of underwater sounds by seals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 141(2).
- Simmons, S. E., Crocker, D. E., Kudela, R. M., and Costa, D. P. (2007). Linking foraging behaviour of the northern elephant seal with oceanography and bathymetry at mesoscales. *Marine Ecology Progress Series*, 346 :265–275.
- 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., Bassett, H. R., Johnson, S. C., Wiggins, S. M., and Hildebrand, J. A. (2014). Bryde’s whale calls recorded in the Gulf of Mexico. *Marine Mammal Science*, 30(1) :399–409.
- Širović, A., Hildebrand, J. A., and Thiele, D. (2006). Baleen whales in the Scotia Sea during January and February 2003. *Journal of Cetacean Research And Management*, 8(2) :161–171.

-
- Širović, A., Hildebrand, J. A., and 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., and 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(17-19) :2327–2344.
- Širović, A., Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M., and Thiele, D. (2009). Blue and fin whale acoustic presence around Antarctica during 2003 and 2004. *Marine Mammal Science*, 25(January) :125–136.
- Širović, A., Williams, L. N., Kerosky, S. M., Wiggins, S. M., and Hildebrand, J. A. (2013). Temporal separation of two fin whale call types across the eastern North Pacific. *Marine Biology*, 160(1) :47–57.
- Snel, J., Tarasov, A., Cullen, C., and Delany, S. (2012). A crowdsourcing approach to labelling a mood induced speech corpora. In *4th International Workshop on Corpora for Research on Emotion Sentiment & Social Signals (LREC)*, pages 72–76. Citeseer.
- Snow, R., O’connor, B., Jurafsky, D., and Ng, A. Y. (2008). Cheap and fast—but is it good? evaluating non-expert annotations for natural language tasks. In *Proceedings of the 2008 conference on empirical methods in natural language processing*, pages 254–263.
- Socheleau, F.-x., Leroy, E. C., Pecci, A. C., Samaran, F., Bonnel, J., Royer, J.-Y., and Carvallo Pecci, A. (2015). Automated detection of Antarctic blue whale calls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 138(5) :3105–3117.
- Socheleau, F.-X. and Samaran, F. (2018). Detection of Mysticete Calls : a Sparse Representation-Based Approach. Technical report, Institut Mines-Télécom-IMT Atlantique-UBL, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01736178/>.
- Southall, B. L. (2005). Shipping noise and marine mammals : A forum for science, management, and technology. *NOAA Fisheries*, page 40.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene Jr, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., et al. (2009). Marine mammal noise exposure criteria : Initial scientific recommendations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4) :2517–2517.
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., and Tyack, P. L. (2019). Marine mammal noise

- exposure criteria : Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2) :125–232.
- Stafford, K. M., Bohnenstiehl, D. R., Tolstoy, M., Chapp, E., Mellinger, D. K., and 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., and 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., Moore, S. E., and Fox, C. G. (2005). Diel variation in blue whale calls recorded in the eastern tropical Pacific. *Animal Behaviour*, 69(4) :951–958.
- Stafford, K. M., Moore, S. E., Stabeno, P. J., Holliday, D. V., Napp, J. M., and Mellinger, D. K. (2010). Biophysical ocean observation in the southeastern Bering Sea. *Geophysical Research Letters*, 37 :1–4.
- Stafford, K. M., Niekirk, S. L., and 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.
- Stafford, K. M., Niekirk, S. L., and Fox, C. G. (2001). Geographic and seasonal variation of blue whale calls in the North Pacific. *Journal of Cetacean Research and Management*, 3(1) :65–76.
- Stone, C. J. and Tasker, M. L. (2006). The effects of seismic airguns on cetaceans in uk waters. *Journal of Cetacean Research and Management*, 8(3) :255.
- Szesciorka, A. R., Ballance, L. T., Širovi, A., Rice, A., Ohman, M. D., Hildebrand, J. A., and Franks, P. J. S. (2020). Timing is everything : Drivers of inter-annual variability in blue whale migration. *Scientific Reports*, pages 1–9.
- Tavolga, W. (2012). Listening backward : early days of marine bioacoustics. *Advances in experimental medicine and biology*, 730 :11–14.
- Thiebot, J.-B. and Weimerskirch, H. (2013). Contrasted associations between seabirds and marine mammals across four biomes of the southern indian ocean. *Journal of Ornithology*, 154(2) :441–453.
- Thode, A. M., D'Spain, G., and 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.

-
- Thomas, P. O., Reeves, R. R., and Brownell, R. L. (2016). Status of the world ' s baleen whales. *Marine Mammal Science*, 32(April) :682–734.
- Thomisch, K. (2017). *Distribution patterns and migratory behavior of Antarctic blue whales*. PhD thesis, Alfred Wegener Institut.
- Thomisch, K., Boebel, O., Bachmann, J., Filun, D., Neumann, S., Spiesecke, S., and Opzeeland, I. V. (2019). Temporal patterns in the acoustic presence of baleen whale species in a presumed breeding area off Namibia. *Marine Ecology Progress Series*, 620(June) :201–214.
- Thomisch, K., Boebel, O., Clark, C. W., Hagen, W., Spiesecke, S., Zitterbart, D. P., and 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(1) :239–253.
- Thompson, P. O. (1965). Marine biological sounds west of san clemente island : diurnal distributions and effects of ambient noise during july 1963. *San Diego : US Navy Electronics Laboratory*.
- Thompson, P. O. (1996). Underwater Sounds of Blue Whales, *Balaenoptera musculus*, in the Gulf of California, Mexico. *Marine Mammal Science*, 12(April) :288–293.
- Thompson, P. O., Cummings, W., and Kennison, S. (1977). Sound production of humpback whales, *Megaptera novaeangliae*, in alaskan waters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(S1) :S89–S89.
- Thomson, D. J. and Barclay, D. R. (2020). Real-time observations of the impact of covid-19 on underwater noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(5) :3390–3396.
- Torterotot, M., Royer, J.-Y., and Samaran, F. (2019). Detection strategy for long-term acoustic monitoring of blue whale stereotyped and non-stereotyped calls in the Southern Indian Ocean. In *IEEE OCEANS*, pages 1–10. IEEE.
- Torterotot, M., Samaran, F., Stafford, K., and Jean-Yves, R. (revised in August 2020). Distribution of blue whale populations in the southern indian ocean based on a decade of acoustic monitoring. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*.
- Tremblay, C. J., Parijs, S. M. V., Cholewiak, D., and Tremblay, C. J. (2019). 50 to 30-Hz triplet and singlet down sweep vocalizations produced by sei whales (*Balaenoptera borealis*) in the western North Atlantic Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(6) :3351–3358.

- Tripovich, J. S., Klinck, H., Nieukirk, S. L., Adams, T., Mellinger, D. K., Balcazar, N. E., Klinck, K., Hall, E. J. S., and Rogers, T. L. (2015). Temporal Segregation of the Australian and Antarctic Blue Whale Call Types (*Balaenoptera musculus spp.*). *Journal of Mammalogy*, 96(3) :603–610.
- Trudelle, L., Charrassin, J.-B., Saloma, A., Pous, S., Kretzschmar, A., and Adam, O. (2018). First insights on spatial and temporal distribution patterns of humpback whales in the breeding ground at sainte marie channel, madagascar. *African Journal of Marine Science*, 40(1) :75–86.
- Tsang-Hin-Sun, E. (2017). *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., and 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. (1997). Development and social functions of signature whistles in bottlenose dolphins *Tursiops truncatus*. *Bioacoustics*, 8(1-2) :21–46.
- Van der Hoop, J., Corkeron, P., and Moore, M. (2017). Entanglement is a costly life-history stage in large whales. *Ecology and evolution*, 7(1) :92–106.
- Van Opzeeland, I., Samaran, F., Stafford, K. M., Findlay, K., Gedamke, J., Harris, D., and Miller, B. S. (2014). Towards collective circum-antarctic passive acoustic monitoring : The southern ocean hydrophone network (sohn). *Polarforschung*, 83(2) :47–61.
- Wanker, R. and Fischer, J. (2001). Intra- and interindividual variation in the contact calls of spectacled parrotlets (*Forpus conspicillatus*). *Behaviour*, 138(6) :709–726.
- Watkins, W. A. (1981). Activities and underwater sounds of fin whales. *Scientific Report of Whale Research Institute*, 33 :83–117.
- Watkins, W. A., Tyack, P. L., Moore, K. E., and 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.
- Webster, T. A., Dawson, S. M., Rayment, W. J., Parks, S. E., and Van Parijs, S. M. (2016). Quantitative analysis of the acoustic repertoire of southern right whales in new zealand. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1) :322–333.
- Weilgart, L. S. (2007). The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Canadian journal of zoology*, 85(11) :1091–1116.

-
- Wiggins, S. M., Oleson, E. M., McDonald, M. A., and Hildebrand, J. A. (2005). Blue whale (*balaenoptera musculus*) diel call patterns offshore of southern california. *Aquatic Mammals*, 31(2) :161.
- Williams, R., Hedley, S. L., Branch, T. A., Bravington, M. V., Zerbini, A. N., and Findlay, K. P. (2011). Chilean blue whales as a case study to illustrate methods to estimate abundance and evaluate conservation status of rare species. *Conservation Biology*, 25(3) :526–535.
- Zemsky, V. and Sazhinov, E. (1994). Distribution and abundance of the pygmy blue whale. *Translated by VS Gurevich, edited by MA Donahue and RL Brownell Jr., National Marine Fisheries Service, Southwest Fisheries Science Center, Administrative Report LJ-94-02*, pages 1–17.
- Zhong, M., Castellote, M., Dodhia, R., Lavista Ferres, J., Keogh, M., and Brewer, A. (2020). Beluga whale acoustic signal classification using deep learning neural network models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(3) :1834–1841.
- Zimmer, W. M. (2011). *Passive acoustic monitoring of cetaceans*. Cambridge University Press.
- Zoidis, A. M., Smultea, M. A., Frankel, A. S., Hopkins, J. L., Day, A., McFarland, A. S., Whitt, A. D., and Fertl, D. (2008). Vocalizations produced by humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) calves recorded in Hawaii. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3) :1737–1746.

Titre : Traitement et analyse de signaux bioacoustiques dans l'océan Indien austral

Mots clés : baleine bleue, océan Indien austral, bioacoustique, surveillance acoustique passive

Résumé : La baleine bleue (*Balaenoptera musculus ssp*) a été menée au bord de l'extinction durant la chasse baleinière et est aujourd'hui toujours en danger. Dans l'océan Indien austral, une région reculée et soumise à des conditions météorologiques extrêmes, l'utilisation de l'acoustique passive s'est rapidement imposée pour le suivi de ces grands mammifères marins. Cette thèse repose sur des enregistrements acoustiques acquis de 2010 à 2018 par un réseau d'hydrophones de grande envergure situé dans l'océan Indien austral. Un algorithme de détection automatique, dont les performances sont préalablement évaluées, est appliqué pour détecter les vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées (D-calls) des baleines bleues Antarctique et des baleines

bleues pygmées d'Australie et de Madagascar. Les détections des vocalisations stéréotypées précisent les distributions spatiales et saisonnières décrites précédemment dans l'océan Indien austral et révèlent que les baleines bleues Antarctique et pygmées habitent cette région de façon très différente. La comparaison entre la présence géographique des vocalisations stéréotypées et non-stéréotypées suggère un changement de comportement acoustique des baleines bleues entre les régions subtropicales et subantarctiques. Enfin, la caractérisation du paysage sonore dans l'océan Indien austral indique que les signaux d'origine anthropique y sont prévalents, y compris dans les régions les plus reculées.

Title : Processing and analysis of bioacoustic signals in the southern Indian Ocean

Keywords : blue whale, southern Indian Ocean, bioacoustics, passive acoustic monitoring

Abstract : Blue whales (*Balaenoptera musculus ssp*) were brought to the brink of extinction during whaling and are still endangered today. In the southern Indian Ocean, a remote region subject to extreme weather conditions, passive acoustics quickly became the preferred method for monitoring these large marine mammals. This thesis is based on acoustic data recorded from 2010 to 2018 by a large hydrophone network in the southern Indian Ocean. An automatic detection algorithm, whose performance was thoroughly evaluated beforehand, is applied to detect the stereotyped and non-stereotyped calls (D-calls) of Antarctic blue whales and Australian and Madagascan pygmy blue whales.

Detections of stereotyped calls refine the spatial and seasonal distributions previously described in the southern Indian Ocean and reveal that Antarctic and pygmy blue whales use this region in very different ways. Comparison between the geographical presence of stereotyped and non-stereotyped calls suggests a change in the acoustic behavior of blue whales between subtropical and subantarctic regions. Finally, the characterization of the southern Indian Ocean soundscape indicates that anthropogenic signals are prevalent, even in remote areas.