



Traitement du signal et acoustique passive pour l'observation des océans : de la lutte sous-marine à l'écologie

Julien Bonnel

► To cite this version:

Julien Bonnel. Traitement du signal et acoustique passive pour l'observation des océans : de la lutte sous-marine à l'écologie. Acoustique [physics.class-ph]. Université de Bretagne Occidentale (UBO), Brest, 2017. tel-01778386

HAL Id: tel-01778386

<https://hal.science/tel-01778386>

Submitted on 25 Apr 2018

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

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

UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

Traitement du signal et acoustique passive pour l'observation des océans : de la lutte sous-marine à l'écologie

Mémoire présenté pour obtenir

l'Habilitation à Diriger des Recherches

par

Julien Bonnel

Maître de Conférences de l'ENSTA Bretagne,
LabSTICC (UMR CNRS 6285)



HDR soutenue publiquement le **12 juin 2017**,
devant le jury composé de :

Christophe GUINET, CEBC - *Rapporteur*

Pascal LARZABAL, SATIE - *Rapporteur*

Philippe ROUX, ISTerre - *Rapporteur*

Laurent CHAUVAUD, LEMAR

Dominique FATTACCIOLI, DGA Tn

René GARELLO, LabSTICC

Jérôme MARS, GIPSA-Lab

Claire PRADA, Institut Langevin

III

-You can't just turn on creativity
like a faucet. You have to be in
the right mood.
-What mood is that ?
-Last-minute panic.

B. Watterson

Remerciements

Cher Lecteur,

Il n'est pas impossible que, comme moi, tu démarres la lecture d'un manuscrit quelconque par la lecture des remerciements. Et que, comme moi, tu en profites pour juger -hâtivement et arbitrairement- l'éventuelle sympathie de l'auteur. Tu pourrais même refermer cet ouvrage si la lecture de ces quelques lignes ne te convient pas, n'est-ce pas ? Tu imagines donc sans mal l'importance de ce qui va suivre.

Merci à tous les étudiants, stagiaires, doctorants et post-doctorants avec qui j'ai eu la chance de travailler. Vous êtes le socle de mon activité de recherche, et c'est bien vous qui avez abattu la majorité du travail présenté dans ce document. Merci !

Merci à tous mes collègues enseignants / chercheurs, à l'ENSTA Bretagne et ailleurs. Nos collaborations ont donné une envergure à mon activité que je n'aurai pu espérer sans vous. Merci !

Merci à mes financeurs récurrents, qui contribuent largement au dynamisme de mon activité. J'aime à croire que je ne travaille ni "pour" vous ni "grâce" à vous, mais que nous travaillons bel et bien "ensemble". Merci !

Merci au jury pour m'avoir offert un peu de son temps précieux. Vos remarques, questions et conseils ont été entendus. Merci !

Merci à tous ceux qu'on oublie trop souvent : services de support, informatique, administratif, technique et direction. Sans vous, la boutique ENSTA Bretagne / LabSTICC aurait mis la clef sous la porte depuis longtemps. Merci !

Merci aux relecteurs non-anonymes, dont les commentaires ont largement amélioré ce manuscrit. Merci !

Merci à ma famille pour son soutien au quotidien, ses encouragements et ses sacrifices. Merci de croire en moi. Votre confiance et votre amour n'a pas de prix. Merci !

Enfin, merci à Romain pour son passage éphémère à l'ENSTA Bretagne. On ne t'oubliera pas.

Ami lecteur, ce document est avant tout pour toi. J'espère qu'il satisfera ta curiosité scientifique. Si ce n'est pas complètement le cas, je suis à ton entière disposition pour répondre à tes questions. Au plaisir de discuter avec toi.

Julien

Table des matières

1	Introduction	1
2	Synthèse quantitative	5
2.1	Curriculum Vitae	6
2.2	Projets de recherche	7
2.2.1	Projets nationaux	7
2.2.2	Etudes DGA MRIS : "Projets Ecoles"	7
2.2.3	Projets internationaux	8
2.2.4	Organisation et expertises	9
2.3	Responsabilités d'encadrement de la recherche	10
2.3.1	Encadrement de thèses soutenues	10
2.3.2	Encadrement de thèses en cours	10
2.3.3	Encadrement de post-doctorants	11
2.3.4	Encadrement de stagiaires	12
2.4	Enseignement	14
2.4.1	2010-2017 : Enseignant-Chercheur à l'ENSTA Bretagne	14
2.4.2	2007-2010 : Moniteur à l'ENSERG, Grenoble	14
2.5	Liste des publications	15
3	Ondes Ultra Basse Fréquence	19
3.1	Introduction	20
3.2	Propagation et traitements classiques	24
3.2.1	Propagation modale	24
3.2.2	Propriétés des modes	26
3.2.3	Filtrage modal et localisation de source	30
3.3	Traitements modaux	34
3.3.1	Mono-capteur	34
3.3.2	Antenne verticale	39
3.3.3	Antenne horizontale	40
3.4	Applications mono-capteurs	43
3.4.1	Signaux transitoires	43

3.4.2	Bruits large bande	45
3.5	Antennes et localisation de sources	46
3.5.1	Milieus incertains	47
3.5.2	Discrimination en immersion	48
3.6	Conclusion et perspectives	51
3.6.1	Conclusion	51
3.6.2	Perspectives	52
4	Océanographie acoustique	55
4.1	Introduction	56
4.2	Bioaoustique des mysticètes	60
4.2.1	Baleines boréales et baleines franches en Arctique . . .	61
4.2.2	Baleines bleues Antarctique dans l'océan Indien	67
4.3	Observation acoustique de l'océanographie physique	73
4.3.1	Elephants de mer océanographes	74
4.3.2	Mer d'Iroise	78
4.4	Conclusion et perspectives	83
4.4.1	Conclusion	83
4.4.2	Perspectives	84
5	Conclusion	87

Chapitre 1

Introduction

Il y a près de 10 ans, j'ai démarré une thèse au GIPSA-Lab (Grenoble) en traitement du signal et en acoustique sous-marine. Si mes études m'avaient donné une bonne vision du traitement du signal, je n'avais pas la moindre idée de ce que pouvait être l'acoustique sous-marine. Le sujet proposé et l'équipe d'encadrement avaient l'air plutôt sympathiques, et l'idée de mélanger signal et physique m'a tout de suite séduit. Une fois le virus attrapé, impossible de m'en défaire. Après ma thèse, je me suis rapproché de la mer, et ai posé mes valises à l'ENSTA Bretagne et au LabSTICC (Brest) en tant qu'enseignant-chercheur. J'y ai découvert l'océanographie acoustique, et notamment le monitoring environnemental par acoustique passive. Et c'est ainsi que, quelques années plus tard, me voilà en train d'écrire le manuscrit de HDR que vous avez entre les mains. J'y synthétise mon activité de recherche, aujourd'hui basée sur une synergie entre traitement du signal, acoustique sous-marine et océanographie.

Mes activités de recherches sont caractérisées par cette approche interdisciplinaire, à l'interface entre les STIC¹ et les Sciences de la Mer. Ces travaux visent à développer et/ou exploiter des méthodes innovantes de traitement du signal, pour répondre à des problématiques environnementales et stratégiques du milieu marin, en particulier en utilisant l'acoustique. On rappelle ici qu'il est impossible pour une onde électromagnétique de se propager dans l'eau sur de grandes distances. Cela rend inapplicables les technologies classiques de télédétection et de communication. Les ondes acoustiques en revanche se propagent particulièrement bien dans l'eau, et sont donc le vecteur privilégié pour sonder les océans. Dans ce contexte, je développe une activité de recherche structurée autour de deux grands axes : l'études et l'utilisation des ondes Ultra Basse Fréquence (UBF), et le monitoring océanique par acoustique passive.

Le terme UBF s'applique aux fréquences inférieures à quelques centaines de Hz. Leur propagation en milieu sous-marin est particulière. En UBF, l'océan se comporte comme un guide d'onde dispersif : différentes fréquences se propagent à différentes vitesses. Les méthodes classiques de l'acoustique sous-marine ne sont plus applicables. Je m'attache à développer des traitements adaptés à la dispersion : caractérisation du signal reçu, et utilisation de l'information de dispersion pour localiser des sources et/ou caractériser l'environnement. Cet axe de recherche sur les UBF possède un large spectre applicatif, allant de la lutte sous-marine à la biologie marine.

L'océanographie acoustique s'intéresse à l'observation et la compréhension des océans en utilisant le vecteur acoustique. Dans ce manuscrit, je me restreins au monitoring environnemental par acoustique passive (PAM : Passive Acoustic Monitoring), contexte au sein duquel on s'interdit toute émission sonore.

1. Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

Il s'agit alors d'écouter le paysage sonore sous-marin, et d'en extraire des informations océanographiques. Dans cet axe de recherche, je m'intéresse moins aux développements des traitements qu'aux réponses apportées aux questions environnementales. Il s'agit donc d'utiliser des méthodes, développées par ailleurs, pour répondre à des problématiques propres aux sciences de la mer.

Globalement, j'essaie de présenter mes travaux de recherche dans ces deux axes de façon équilibrée. Ma maturité scientifique est toutefois différente pour ces deux thèmes. Le premier thème sur les UBF constitue mon axe de recherche historique, et correspond à une activité de recherche établie. Le second thème sur le PAM est plus récent, et correspond à une activité de recherche en cours de développement.

Je prends le parti dans ce manuscrit de présenter de façon concise la quasi intégralité de mon activité de recherche. J'insiste autant sur la façon dont se sont déroulées les choses (qui a fait quoi, comment, pourquoi) que sur la technique. On supposera que cette dernière est validée par mes publications, dont la liste est disponible dans le chapitre suivant. Il s'agit donc ici de mettre en avant autant ma capacité à *diriger* des recherches qu'à les réaliser techniquement. Dans ce contexte, je souhaite différencier les recherches pour lesquelles j'ai personnellement effectué le travail technique, des recherches où mon rôle tient de l'encadrement scientifique. Dans la suite, j'utiliserai la première personne du singulier "je" pour dénoter un travail personnel (pilotage et réalisation technique). A contrario, j'utiliserai la première personne du pluriel "nous" pour dénoter un travail collaboratif, dont j'ai effectué l'encadrement scientifique, mais sur lequel je ne suis pas au premier plan de la réalisation technique. La contribution relative des différents acteurs est implicitement retranscrite par mes diverses publications sur les sujets concernés. J'encourage autant que possible les doctorants et post-doctorants à publier leurs travaux. Dans ce cas, ils sont systématiquement premier auteur. Lorsque je suis premier auteur, cela dénote un travail personnel (pilotage et réalisation technique).

Une activité de recherche à l'interface des sciences de l'ingénieur et des sciences de la mer ne peut être que collaborative. Il est aujourd'hui important que ces collaborations dépassent nos frontières nationales. Je m'attache donc à donner une vision internationale à ma recherche, et à retranscrire cela dans ce manuscrit. J'essaie également de faire profiter de mon réseau aux étudiants que je supervise et qui souhaitent en bénéficier. Leurs éventuelles mobilités seront rappelées au cours du manuscrit.

La suite de ce manuscrit est organisée de la manière suivante. Le chapitre 2 effectue une synthèse quantitative de mes activités de recherche. Il liste les indicateurs classiques caractérisant mon activité : projets, encadrements,

enseignements et publications. Le chapitre 3 présente mon axe de recherche sur les ondes Ultra Basse Fréquence. Le chapitre 4 présente mon axe de recherche sur le monitoring océanique par acoustique passive. Enfin, le chapitre 5 conclut le manuscrit et une annexe fournit une sélection de mes articles.

Le document est construit de façon à ce que les chapitres 2, 3 et 4 soient indépendants. L'idée est de permettre au lecteur de ne lire qu'un seul de ces chapitres s'il le souhaite. Cela induit une légère redondance inter-chapitre. Je demanderai au lecteur minutieux de bien vouloir m'en excuser.

Avant de rentrer dans le vif du sujet, je souhaite conclure cette introduction par une confession. Je me suis permis dans ce manuscrit de réutiliser certains passages choisis de documents existants. Cela a été fait uniquement dans des cas où j'étais personnellement impliqué en tant qu'auteur, co-auteur ou encadrant. Si cette pratique est répandue, il me paraissait toutefois important de la rendre ici transparente.

Chapitre 2

Synthèse quantitative

Je serre la science et c'est ma
joie.

Basile Landouye [B. de Groot]

2.1 Curriculum Vitae

Experience professionnelle

2010 - ... : Maître de Conférence de l'ENSTA Bretagne, Lab-STICC (Brest) France

* Recherche : Traitement du signal et acoustique sous-marine pour le monitoring des environnements marins

— Mots clefs : signal non stationnaire, analyse temps-fréquence, localisation de source, bioacoustique, inversion géoacoustique, tomographie

— Publications : 28 articles dans des journaux internationaux et 46 conférences

* Enseignement : traitement du signal, acoustique sous-marine, capteurs

— Public : élèves ingénieurs, charge $\simeq 80$ heures par an

* Responsable de l'équipe Acoustique Passive de l'ENSTA Bretagne

2007 - 2010 : Doctorant, GIPSA-Lab, Grenoble INP, France

* Développement de nouvelles méthodes de localisation de source et d'inversion géoacoustique en Ultra Basse Fréquence

* Mise à disposition du Marine Physical Lab (University of California, San Diego) : février à aout 2009

2007 - 2010 : Moniteur, ENSERG, Grenoble INP, France

* Enseignement : $\simeq 90$ h par an (Traitement du Signal, Electronique)

2007 : Stage M2R, Signal Analysis Research group, Ryerson University (Toronto), Canada

* Classification automatique d'images biomédicales

Formation et titres universitaires

* 2007 - 2010 : Thèse en Traitement du Signal, GIPSA-Lab, Grenoble INP (Financement DGA/CNRS)

* 2006 - 2007 : Master Recherche, Grenoble INP, Spécialité Signal, Images, Paroles, Télécoms (mention bien)

* 2004 - 2007 : Diplôme d'ingénieur, Grenoble INP, Option Traitement du Signal et des Images (mention bien)

* 2002 - 2004 : Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles, Lycée Buffon, Paris

Expériences internationales

* 2011 - ... : Canada, University of Victoria, plusieurs séjours, 6 mois cumulés

* 2009 : Etats-Unis, University of California San Diego, 1 séjour de 6 mois

* 2007 : Canada, Ryerson University (Toronto), 1 séjour de 6 mois

2.2 Implications et responsabilités dans des programmes de recherche

2.2.1 Projets nationaux

Mer Calme [2013-2015] : Caractérisation Acoustique de Littoraux Marins et de leurs Ecosystèmes

- Implication dans le projet : responsable de la tâche "Inversion"
- Financement : ANR Astrid
- Partenaires : GIPSA-Lab (porteur), LEMAR, ENSTA Bretagne
- Le projet a notamment financé 12 mois de post-doc à l'ENSTA Bretagne (B. Kinda)

Localisation UBF [2014-2017] : Localisation de signaux acoustiques Ultra Basse Fréquence (UBF) en milieu marin

- Implication dans le projet : porteur
- Financement : contrat DGA Techniques navales
- Le projet a notamment financé 12 mois de post-doc (A. Korakas) et une thèse (E. Conan) à l'ENSTA Bretagne

GIS [2015-2016] : Mobilité internationale vers l'University of Victoria (UVic, Canada)

- Implication dans le projet : porteur
- Financement : Europôle Mer
- Le projet a financé diverses mobilités vers l'UVic

ORCA Depred [2016-2017] : Déprédation des palangres par les cétacés

- Implication dans le projet : responsable de l'expérimentation acoustique
- Financement : Fondation d'Entreprises des Mers Australes
- Partenaires : CEBC, ENSTA Bretagne et SARPC (Syndicat des Armements Réunionnais Palangriers Congélateurs)
- Le projet a notamment financé du matériel acoustique pour l'ENSTA Bretagne

2.2.2 Etudes DGA MRIS : "Projets Ecoles"

La Mission pour la Recherche et l'Innovation Scientifique (MRIS) de la Délégation Générale de l'Armement (DGA) finance des "*Projets Ecoles*" pour les écoles d'ingénieurs sous tutelle du ministère de la défense (dont l'ENSTA Bretagne fait partie). Le financement de ces projets est sélectif et donne lieu à un appel à projet annuel.

PACO [2009-2012] : Acoustique Passive pour l’océanographie côtière

- Implication dans le projet : devenu porteur en 2011 (projet monté et porté par C. Gervaise en 2009-2010)
- Le projet a financé 3 ans de post-doc à l’ENSTA Bretagne (C. Chailloux puis L. Di Iorio)

TS-UBF [2012-2015] : Traitements adaptés à l’acoustique passive Ultra Basse Fréquence

- Implication dans le projet : porteur
- Le projet a financé 3 ans de post-doc à l’ENSTA Bretagne (F. Le Courtois)

PAM Mobile [2015-2018] : Acoustique Passive sur porteurs mobiles d’opportunités

- Valorisation : publications, post-doctorat de D. Cazau
- Implication dans le projet : porteur
- Le projet finance notamment 3 ans de post-doc à l’ENSTA Bretagne (D. Cazau)

2.2.3 Projets internationaux

NPRB1 [2012-2014] : Extending marine mammal acoustic tracking ranges in the Beaufort Sea using a vertical array

- Implication dans le projet : co-Principal Investigator
- Financement : NPRB (North Pacific Research Board, USA)
- Partenaires : Scripps Institution of Oceanography (UCSD, San Diego, USA), ENSTA Bretagne
- Le projet a notamment financé 3 mois de post-doc à l’ENSTA Bretagne (A. Komaty) et une mobilité vers Scripps

NPRB2 [2014-2016] : Determining bulk distribution of calling depths of bowhead and northern right whales using non-linear signal processing methods

- Implication dans le projet : co-Principal Investigator
- Financement : NPRB (North Pacific Research Board, USA)
- Partenaires : Scripps Institution of Oceanography (UCSD, San Diego, USA), National Marine Mammal Laboratory (NOAA, Seattle, USA), ENSTA Bretagne
- Le projet a notamment financé 9 mois de post-doc à l’ENSTA Bretagne (A. Komaty)

ONRG [2017-2019] : Seabed Characterization Experiment

- Implication dans le projet : Principal Investigator
- Financement : ONRG (Office of Naval Research Global, USA)
- Le projet finance notamment 12 mois de post-doc à l'ENSTA Bretagne (D. Eleftherakis)

2.2.4 Organisation et expertises

Co-organisation des workshops SERENADE : Surveillance, Etude et Reconnaissance de l'Environnement mariN par Acoustique DiscretE

- Co-organisation des workshops de 2012 (Grenoble), 2014 (Grenoble) et 2016 (Brest)
- Site-internet : <http://serenade.ensta-bretagne.fr/>
- 60 à 80 participants durant 2 jours et demi

Evaluation d'articles de revues nationales et internationales : environ 5 articles par an, notamment dans les revues suivantes :

- IEEE Transactions on Signal Processing
- IEEE Journal of Oceanic Engineering
- Journal of the Acoustical Society of America

Evaluation de projets pour des appels à projets français et étrangers : 1 ou 2 projets par an, notamment pour les agences suivantes :

- Agence Nationale de la Recherche (France)
- National Science Foundation (USA)
- North Pacific Research Board (USA)

2.3 Responsabilités d'encadrement de la recherche

2.3.1 Encadrement de thèses soutenues

Y. Le Gall : Problèmes inverses en acoustique sous-marine : prédiction de performances et localisation de source en environnement incertain.

- Thèse démarrée le 1er octobre 2012 et soutenue le 5 octobre 2015.
- ENSTA Bretagne, Lab-STICC (UMR CNRS 6285)
- Directeur de thèse : Ronan Fablet (Telecom Bretagne)
- Taux d'encadrement 40% (co-encadrement avec FX Socheleau, Telecom Bretagne)
- Séjour de recherche de six mois à University of Victoria (BC, Canada)
- Aujourd'hui, Yann Le Gall est ingénieur chez Thales Underwater Systems (Brest)

O. Le Bot : Détection, localisation, caractérisation de transitoires acoustiques sous-marins.

- Thèse démarrée le 1er octobre 2011 et soutenue le 9 octobre 2014.
- Université de Grenoble, GIPSA-Lab (UMR CNRS 5216)
- Directeurs de thèse : J.I. Mars (Grenoble INP), C. Gervaise (Chaine Chorus)
- Taux d'encadrement : 30%
- Séjour de recherche de six mois à l'Université du Québec à Rimouski (QC, Canada)
- Aujourd'hui, Olivier Le Bot est ingénieur à WSP Canada Inc. (Canada)

2.3.2 Encadrement de thèses en cours

E. Leroy : Traitement et analyse des signaux bioacoustiques dans l'océan Indien austral.

- Thèse démarrée le 1er octobre 2014, soutenance prévue à l'automne 2017
- Institut Universitaire Européen de la Mer, LDO (UMR CNRS 6538)
- Directeur de thèse : J-Y Royer (LDO)
- Taux d'encadrement 50%
- Séjour de recherche de trois mois à Alfred Wegener Institute (Bremenhaven, Allemagne)

E. Conan : Traitements adaptés aux antennes linéaires tractées pour la discrimination en immersion de sources Ultra Basse Fréquence (0-300 Hz)

- Thèse démarrée le 1er octobre 2014, soutenance prévue à l'automne 2017
- ENSTA Bretagne, Lab-STICC (UMR CNRS 6285)
- Directeur de thèse : T. Chonavel (Telecom Bretagne)
- Taux d'encadrement 40% (co-encadrement avec B. Nicolas, CREATIS)

G. Richard : Comportement de recherche alimentaire des orques et des cachalots dans un contexte de déprédation autour des îles Crozet et Kerguelen, Océan Austral.

- Thèse démarrée le 1er novembre 2015
- Université de La Rochelle, CEBC (UMR CNRS 7372)
- Directeurs de thèse : C. Guinet (CEBC), J. Bonnel
- Taux de co-direction : 50%

R. Emmetière : Invariant océanique et traitements adaptés à la propagation acoustique Ultra Basse Fréquence (0-300 Hz) pour la localisation de sources sur une antenne linéaire.

- Thèse démarrée le 1er décembre 2015
- Telecom Bretagne, Lab-STICC (UMR CNRS 6285) & Thales Underwater Systems (thèse CIFRE Défense)
- Directeur de thèse : T. Chonavel (Telecom Bretagne)
- Taux d'encadrement 40% (co-encadrement avec M. Géhant, TUS)

M. Meillour : Couplage de l'acoustique passive in situ et de la télédétection satellitaire pour l'analyse haute-résolution de dynamiques géophysiques 3D+t de l'océan.

- Thèse démarrée le 1er octobre 2016
- Telecom Bretagne, Lab-STICC (UMR CNRS 6285)
- Directeurs de thèse : R. Fablet (Telecom Bretagne), J. Bonnel
- Taux de co-direction : 50%

2.3.3 Encadrement de post-doctorants

F. Le Courtois : Estimation des nombres d'onde dans un guide d'onde océanique dispersif

- post-doctorat d'Octobre 2012 à Octobre 2015
- financement DGA/MRIS
- Séjour de recherche de deux mois à University of Victoria (BC, Canada)
- F. Le Courtois est aujourd'hui ingénieur au SHOM (Brest)

A. Korakas : Filtrage modal sur antenne linéaire horizontale tractée

- Post-doctorat d'Octobre 2013 à Octobre 2014

- Financement sur contrat DGA Techniques navales
- A. Korakas est aujourd’hui enseignant dans le secondaire (Lyon)

B. Kinda : Suivi de phénomènes océanographiques dynamiques par acoustique passive

- Post-doctorat de Novembre 2013 à Novembre 2014
- Financement ANR
- B. Kinda est aujourd’hui ingénieur au SHOM (Brest)

A. Komaty : Localisation en distance/profondeur de signaux transitoires Ultra Basse Fréquence

- Post-doctorat de Mars 2015 à Mai 2016
- Financement NPRB (USA)
- A. Komaty est aujourd’hui post-doctorant à l’EPFL (Suisse)

D. Cazau : Monitoring environnemental par Acoustique Passive sur porteur mobile d’opportunité

- Post-doctorat en cours, démarré le 1er novembre 2015
- Financement DGA/MRIS

D. Eleftherakis : Caractérisation géoacoustique des sédiments boueux

- Post-doctorat en cours, démarré le 9 janvier 2017
- Financement ONRG (USA)

2.3.4 Encadrement de stagiaires : Masters Recherche (M2R) et Projets de Fin d’Etude (PFE) ingénieur

- Y. Le Gall, PFE (Grenoble INP) de février à juin 2012, Etude du bruit rayonné par les navires. Après son stage, Y. Le Gall a effectué une thèse à l’ENSTA Bretagne (que j’ai co-encadrée).
- B. Ollivier, M2R (UBO) de mars à juillet 2013, Localisation de baleines bleues antarctiques par acoustique sous-marine passive. Après son stage, B. Ollivier a démarré une thèse à Telecom Bretagne.
- M. Vidal, PFE (ENSIM) de mars à septembre 2014, Discrimination en immersion en acoustique sous marine passive à l’aide d’une antenne horizontale. Après son stage, M. Vidal est devenu ingénieur dans l’industrie.
- G. Richard, M2R (ENS Lyon) de février à mai 2015, Etude de la déprédation des orques et des cachalots sur la légine australe : simulation d’un observatoire acoustique. Après son stage, G. Richard a démarré une thèse à l’Université de la Rochelle (que je co-dirige).

- R. Emmetiere, PFE (Grenoble INP) de février à juillet 2015, Localisation de baleines bleues Antarctiques par acoustique sous-marine passive. Après son stage, R. Emmetiere a démarré une thèse à l'ENSTA Bretagne (que je co-encadre).
- M. Meillour, PFE (ENSTA Bretagne) de mars à juillet 2016, Estimation du niveau source des vocalises de baleines bleues antarctiques. Après son stage, M. Meillour a démarré une thèse à l'ENSTA Bretagne (que je co-dirige).
- M. Thieury, M2R (UPMC) de mars à juillet 2016, Localisation de signaux transitoires en guide d'onde dispersif : application à l'étude des baleines boréales en Alaska. Après son stage, M. Thieury a démarré une thèse à l'UPMC.
- Y. Jezequel, M2R (IUEM), stage en cours entre l'ENSTA Bretagne et l'IUEM (Brest), Caractérisation sonore de trois espèces de crustacés à intérêts commerciaux en Bretagne.

2.4 Enseignement

Liste des abréviations utilisées dans cette section

- CM/TD/TP : Cours Magistral / Travaux Dirigés / Travaux Pratiques
- FC : Formation Continue, i.e. formation payante pour professionnels
- ingé 1A : première année du cycle ingénieur (bac+3)
- ingé 2A : deuxième année du cycle ingénieur (bac+4)
- ingé 3A : troisième année du cycle ingénieur (bac+5)
- M2R : Master Recherche (bac+5)

2.4.1 2010-2017 : Enseignant-Chercheur à l'ENSTA Bretagne ($\simeq 80$ h/an)

- Intervenant (CM/TP/TD) en formation continue Acoustique Sous Marine (FC)
- Responsable du cours (CM/TP/TD) de Propagation Acoustique Sous-Marine (ingé 2A)
- Chargé de TD/TP en traitement du signal (ingé 1A/2A)
- Chargé de TD en probabilités et statistiques (ingé 1A)
- Chargé de TD en capteurs (ingé 1A)
- Chargé de TP en initiation Matlab (ingé 1A)
- Encadrant de projets bibliographiques (ingé 1A)

2.4.2 2007-2010 : Doctorant au GIPSA-Lab et Moniteur à l'ENSERG, Grenoble ($\simeq 90$ h/an)

- Chargé de TP en instrumentation (ingé 1A)
- Chargé de TP en électronique (ingé 1A/2A)
- Chargé de TP/TD en traitement du signal et des images (ingé 1A/2A)
- Chargé de TD/TP en sismique et compression d'images/vidéo (M2R et ingé 3A)

2.5 Liste des publications

Bilan quantitatif :

- 28 articles publiés dans des revues scientifiques à comité de lecture
 - premier auteur : 7 articles
 - collaborations internationales : 9 articles
- 46 présentations effectuées dans des conférences scientifiques

Une caractéristique de mon activité de recherche est de s'étendre du développement méthodologique des traitements à la réponse environnementale, en passant par les problématiques acoustiques. Cela se traduit par une liste de revues cibles variées. A titre d'exemple, voici quelques journaux dans lesquels j'ai publié :

- traitement du signal : IEEE Signal Processing Magazine, IEEE Transactions on Signal Processing ;
- acoustique sous-marine : Journal of the Acoustical Society of America, IEEE Journal of Oceanic Engineering ;
- environnement : Journal of Experimental Biology, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.

Aujourd'hui ma contribution principale reste en acoustique sous-marine, à l'interface entre les traitements et les réponses environnementales. Ma liste complète de publications est donnée à partir de la page suivante.

ARTICLES DANS DES REVUES SCIENTIFIQUES A COMITE DE LECTURE

- [1] Bonnel, J., Caporale, S. & Thode, A. [Waveguide mode amplitude estimation using warping and phase compensation](#). *Journal of the Acoustical Society of America*, 141, 2017., (in press).
- [2] Cazau, D., Bonnel, J., Jouma'a, J., le Bras, Y. & Guinet, C. [Measuring the marine soundscape of the Indian Ocean with Southern Elephant Seals used as acoustic gliders of opportunity](#). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* pages 207-223, 2017.
- [3] Day, L., Jouma'a, J., Bonnel, J. & Guinet, C. [Acoustic measurements of post-dive cardiac responses in southern elephant seals \(*Mirounga leonina*\) during surfacing at sea](#). *Journal of Experimental Biology*, pages jeb-146928, 2017 (in press, available online)
- [4] Drémeau, A., Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Reconstruction of Dispersion Curves in the Frequency-Wavenumber Domain Using Compressed Sensing on a Random Array](#). *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017 (in press, available online)
- [5] Conan, E., Bonnel, J., Chonavel, T. & Nicolas, B. [Source depth discrimination with a vertical line array](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(5):EL434-EL440, 2016.
- [6] Le Gall, Y., Dosso, S., Socheleau, F. & Bonnel, J. [Bayesian source localization with uncertain Green's function in an uncertain shallow water ocean](#). *Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3):993-1004, 2016.
- [7] Le Gall, Y., Socheleau, F. & Bonnel, J. [Matched-Field Performance Prediction with Model Mismatch](#). *IEEE Signal Processing Letters*, 23(4):409-413, 2016.
- [8] Leroy, E.C., Samaran, F., Bonnel, J. & Royer, J.Y. [Seasonal and Diel Vocalization Patterns of Antarctic Blue Whale \(*Balaenoptera musculus intermedia*\) in the Southern Indian Ocean: A Multi-Year and Multi-Site Study](#). *PLOS ONE*, 11(11):e0163587, 2016.
- [9] Crance, J.L., Berchok, C.L., Bonnel, J. & Thode, A.M. [Northeasternmost record of a North Pacific fin whale \(*Balaenoptera physalus*\) in the Alaskan Chukchi Sea](#). *Polar Biology*, pages 1-7, 2015.
- [10] Kinda, B. & Bonnel, J. [Passive acoustic observations of tide height in the Iroise Sea using ambient noise](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3):EL299-EL304, 2015.
- [11] Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Compressed sensing for wideband wavenumber tracking in dispersive shallow water](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(2):575-583, 2015.
- [12] Socheleau, F., Leroy, E., Carvallo Pecci, A., Samaran, F., Bonnel, J. & Royer, J. [Automated detection of Antarctic blue whale calls](#). *Journal of the Acoustical Society of America*, 138(5):3105-3117, 2015.
- [13] Sturm, F. & Bonnel, J. [Time-Frequency features of three-dimensional sound propagation in wedge-shaped oceanic waveguides](#). *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 41(3):731-739, 2015.
- [14] Bonnel, J., Thode, A., Blackwell, S., Kim, K. & Macrander, M. [Range estimation of bowhead whale \(*Balaena mysticetus*\) calls in the Arctic using a single hydrophone](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1):145-155, 2014.
- [15] Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Autoregressive model for high-resolution wavenumber estimation in a shallow water environment using a broadband source](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(4):EL199-EL205, 2014.
- [16] Le Gall, Y., Socheleau, F. & Bonnel, J. [Matched-Field Processing Performance Under the Stochastic and Deterministic Signal Models](#). *IEEE Transactions on Signal Processing*, 62(22):5825-5838, 2014.
- [17] Bonnel, J., Dosso, S. & Chapman, R. [Bayesian geoacoustic inversion of single hydrophone light bulb data using warping dispersion analysis](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1):120-130, 2013.
- [18] Bonnel, J., Le Touzé, G., Nicolas, B. & Mars, J. [Physics-Based Time-Frequency Representations for Underwater Acoustics: Power Class Utilization with Waveguide-Invariant Approximation](#). *IEEE Signal Processing Magazine*, 30(6):120-129, 2013.
- [19] Le Bot, O., Gervaise, C., Bonnel, J. & Mars, J. [Désentrelacement de clics par analyse du rythme](#). *Traitement du signal*, 30:196-218, 2013.
- [20] Le Gall, Y. & Bonnel, J. [Débruitage et separation dans le plan temps-frequence des contributions sonores de navires en mouvement](#). *Traitement du signal*, 30(3-4-5):149-168, 2013.
- [21] Le Gall, Y. & Bonnel, J. [Passive estimation of the waveguide invariant per pair of modes](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(2):EL230-EL236, 2013.
- [22] Zeng, J., Chapman, R. & Bonnel, J. [Inversion of seabed attenuation using time-warping of close range data](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5):EL394-EL399, 2013.
- [23] Bonnel, J., Gervaise, C., Nicolas, B. & Mars, J. [Single-receiver geoacoustic inversion using modal reversal](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1):119-128, 2012.
- [24] Gervaise, C., Kinda, B., Bonnel, J., Stéphan, Y. & Vallez, S. [Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3):1999-2010, 2012.

- [25] Bonnel, J. & Chapman, N. [Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(2):EL101-EL107, 2011.
- [26] Bonnel, J., Gervaise, C., Roux, P., Nicolas, B. & Mars, J. [Modal depth function estimation using time-frequency analysis](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(1):61-71, 2011.
- [27] Bonnel, J., Nicolas, B., Mars, J. & Walker, S. [Estimation of modal group velocities with a single receiver for geoacoustic inversion in shallow water](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128:719-727, 2010.
- [28] Bonnel, J., Khademi, A., Krishnan, S. & Ioana, C. [Small bowel image classification using cross-co-occurrence matrices on wavelet domain](#). *Biomedical Signal Processing and Control*, 4(1):7-15, Elsevier, 2009.

PRESENTATIONS EN CONFERENCE

- [1] Cazau, D., Bonnel, J., Le Bras, Y. & Guinet, C. [Soundscape analysis in the Southern Ocean using elephant seals as acoustic glider of opportunity](#). In *ASA meeting, Salt Lake City (USA)*, 139(4):2226-2226, 2016.
- [2] Dreameau, A., Bonnel, J. & Le Courtois, F. [Modal wavenumber estimation using a Bayesian compressed sensing algorithm](#). In *ASA meeting, Salt Lake City (USA)*, 139(4):2167-2167, 2016.
- [3] Potty, G., Miller, J., Dosso, S., Dettmer, J. & Bonnel, J. [Geoacoustic inversions in the East China Sea for a 3D sediment model](#). In *ASA meeting, Honolulu (USA)*, 140(4):3065-3065, 2016.
- [4] Thode, A., Bonnel, J., Verlinden, C., Thieury, M. & Fagan, A. [Deducing environmental mismatch from matched-mode processing ambiguity surface sidelobes](#). In *ASA meeting, Honolulu (USA)*, 140(4):30133-3133, 2016.
- [5] Bonnel, J., Chapman, R. & Dosso, S. [Single receiver geoacoustic inversion using warping and matched mode processing](#). In *Seabed and Sediment Acoustics: Measurements and Modelling*, 2015.
- [6] Bonnel, J., Thode, A., Blackwell, S., Kim, K. & Macrander, M. [Range estimation of bowhead whales in shallow Arctic waters using a single hydrophone](#). In *The 7th international DCLDE (San Diego, USA)*, 2015.
- [7] Conan, E., Bonnel, J., Chonavel, T. & Nicolas, B. [Source depth discrimination: An evaluation and comparison of several classifiers](#). In *ASA Meeting, Jacksonville (USA)*, 138(3):1927-1927, 2015.
- [8] Dreameau, A., Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Reconstruction des modes de propagation en acoustique sous-marine par acquisition compressée](#). In *GRETSI, Lyon, France*, 2015.
- [9] Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Reconstruction des diagrammes f-k par acquisition compressée avec une petite antenne d'hydrophones](#). In *Journées Acoustique et Applications Navales (Paris)*, 2015.
- [10] Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Wideband wavenumber tracking in a dispersive environment](#). In *Seabed and Sediment Acoustics: Measurements and Modelling*, 2015.
- [11] Le Gall, Y., Dosso, S.E., Socheleau, F.X. & Bonnel, J. [Bayesian source localization with uncertain Green's function](#). In *OCEANS 2015, Genova (Italy)*, pages 1-6, 2015.
- [12] Leroy, E., Socheleau, F.X., A., C.P., F., S., Bonnel, J. & Royer, J.Y. [Robus detection of Antarctic blue whale calls and comparison with classical spectrogram correlation](#). In *The 7th international DCLDE (San Diego, USA)*, 2015.
- [13] Thode, A., Arisdakessian, C. & Bonnel, J. [Inversion of normal mode functions and seabed properties using non-linear time sampling of low-frequency bowhead whale calls on a vertical array](#). In *ASA Meeting, Jacksonville (USA)*, 138(3):1794-1794, 2015.
- [14] Thode, A.M. & Bonnel, J. [Experimental demonstration of time warping to invert for array tilt and mode shape on a vertical array in a shallow arctic environment](#). In *OCEANS 2015, Genova (Italy)*, pages 1-7, 2015.
- [15] Bonnel, J. & Thode, A. [Bowhead whale calls localization using a single receiver and warping processing](#). In *2nd Underwater Acoustic International Conference (Rhodes)*, 2014.
- [16] Bonnel, J. & Thode, A. [Range and depth estimation of bowhead whale calls in the Arctic using a single hydrophone](#). In *Sensor Systems for a Changing Ocean (SSCO), IEEE*, pages 1-4, 2014.
- [17] Kinda, B. & Bonnel, J. [Passive acoustic monitoring of coastal dynamical oceanographic phenomena using single hydrophone](#). In *Sensor Systems for a Changing Ocean (SSCO), IEEE*, pages 1-5, 2014.
- [18] Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Wavenumber tracking in a low resolution frequency-wavenumber representation using particle filtering](#). In *ICASSP, Florence, Italie*, 2014.
- [19] Le Gall, Y., Socheleau, F. & Bonnel, J. [Performance analysis of single receiver Matched-Mode processing for source localization](#). In *2nd Underwater Acoustic International Conference (Rhodes)*, 2014.
- [20] Sturm, F. & Bonnel, J. [Slope inversion in a single-receiver context for three-dimensional wedge-like environments](#). In *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(4):2119-2120, 2014.
- [21] Thode, A. & Bonnel, J. [Using Nonlinear Time Sampling Of Bowhead Whale Calls To Extract Acoustic Mode Shape And Array Tilt](#). In *Alaska Marine Science Symposium (Anchorage)*, 2014.
- [22] Bonnel, J., Le Touzé, G., B., N. & Mars, J. [Représentations Temps-Fréquence de la classe de puissance basées sur l'invariant océanique](#). In *GRETSI, Brest, France*, 2013.

- [23] Bonnel, J., Le Touzé, G., Nicolas, B. & Mars, J. [Waveguide invariant-based spectrogram for modal dispersion analysis with perspective for low-frequency geoacoustic inversion at short-range](#). In *1st Underwater Acoustic International Conference (Corfu)*, 2013.
- [24] Bonnel, J. & Thode, A. [Using warping processing to range bowhead whale sounds from a single receiver](#). In *proc. of the 21st International Conference of Acoustics (Montreal)*, 19(1):070066, 2013.
- [25] Le Bot, O., Bonnel, J., Mars, J. & Gervaise, C. [Odontocete click train deinterleaving using a single hydrophone and rhythm analysis](#). In *proc. of the 21st International Conference of Acoustics (Montreal)*, 19(1):010019, 2013.
- [26] Le Bot, O., Bonnel, J., Mars, J. & Gervaise, C. [Séparation d'impulsions bio-acoustique par analyse du rythme](#). In *GRETSI, Brest, France*, 2013.
- [27] Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Autoregressive model for high-resolution wavenumber estimation in a shallow water environment using a broadband source](#). In *1st Underwater Acoustic International Conference (Corfu)*, 2013.
- [28] Le Courtois, F. & Bonnel, J. [Estimation haute résolution des nombres d'onde dans un guide d'onde océanique dispersif](#). In *GRETSI, Brest, France*, 2013.
- [29] Le Gall, Y. & Bonnel, J. [Méthode d'estimation de l'invariant océanique par couple de modes en acoustique sous-marine passive](#). In *GRETSI, Brest, France*, 2013.
- [30] Le Gall, Y. & Bonnel, J. [Separation of moving ship striation patterns using physics-based filtering](#). In *proc. of the 21st International Conference of Acoustics (Montreal)*, 19(1):070073, 2013.
- [31] Sturm, F. & Bonnel, J. [Bottom slope inversion in a single-receiver context for 3-D wedge-shaped oceanic environments](#). In *1st Underwater Acoustic International Conference (Corfu)*, 2013.
- [32] Zeng, J., Chapman, R., Bonnel, J., Ma, L. & Chen, Y. [Inversion of seabed acoustic parameters in shallow water using the warping transform](#). In *proc. of the 21st International Conference of Acoustics (Montreal)*, 19(1):070016, 2013.
- [33] Bonnel, J., Chapman, R. & Dosso, S. [Single receiver bayesian inversion in a dispersive waveguide](#). In *European Conference on Underwater Acoustics, Edinburgh, Scotland*, 2012.
- [34] Sturm, F. & Bonnel, J. [Time-frequency analysis of broadband sound pulse propagation in 3-D oceanic waveguides](#). In *European Conference on Underwater Acoustics, Edinburgh, Scotland*, 2012.
- [35] Bonnel, J., Gervaise, C., B., N. & Mars, J. [Passive geoacoustic inversion in a dispersive waveguide](#). In *162nd Meeting of the Acoustical Society of America, San Diego, USA*, 2011.
- [36] Bonnel, J., Nicolas, B. & Mars, J. [Modal depth function estimation over a partial spanning VLA](#). In *Underwater Acoustics Measurements, Kos, Greece*, 2011.
- [37] Chailloux, C., Kinda, B., Gervaise, C., Bonnel, J., Stéphan, Y., Mars, J. & Hermand, J. [Modelling of ambient noise created by a shipping lane to prepare passive inversion, application to Ushant case](#). In *Underwater Acoustics Measurements, Kos, Greece*, 2011.
- [38] Chapman, N. & Bonnel, J. [Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators](#). In *Pacific Rim Underwater Acoustics Conference, Jeju Island, Korea*, 2011.
- [39] Bonnel, J., Nicolas, B., Mars, J. & Fattaccioli, D. [Signal processing tools for geoacoustic inversion in shallow water](#). In *IEEE Passive 2010 (Brest, France)*, 2010.
- [40] Bonnel, J., Nicolas, B., Mars, J. & Fattaccioli, D. [Single receiver inversion in shallow water](#). In *European Conference on Underwater Acoustics, Istanbul, Turkey*, 2010.
- [41] Bonnel, J., Nicolas, B., Mars, J. & Fattaccioli, D. [Source localisation in deep water using waveguide invariant](#). In *European Conference on Underwater Acoustics, Istanbul, Turkey*, 2010.
- [42] Bonnel, J., Nicolas, B., Fattaccioli, D. & Mars, J. [Warping fréquentiel pour l'estimation du temps d'arrivée des modes en acoustiques sous-marines](#). In *GRETSI, Dijon, France*, 2009.
- [43] Bonnel, J., Nicolas, B., Mars, J. & Fattaccioli, D. [Frequency warping for waveguide characterization with a single hydrophone](#). In *IEEE/MTS Oceans'09, Biloxi, USA*, 2009.
- [44] Bonnel, J., Nicolas, B., Mars, J. & Fattaccioli, D. [Rapid inversion in shallow water with a single receiver using modal time-frequency pattern extraction](#). In *IEEE/MTS Oceans'09, Biloxi, USA*, 2009.
- [45] Bonnel, J., Nicolas, B., Mars, J., Le Touze, G. & Fattaccioli, D. [Mode characterization in shallow water using warping tools](#). In *Acoustical Society of America Meeting, Portland, USA The Journal of the Acoustical Society of America*, 125:2541, 2009.
- [46] Bonnel, J., Le Touzé, G., Nicolas, B., Mars, J. & Gervaise, C. [Automatic and passive whale localization in shallow water using gunshots](#). In *IEEE/MTS, Oceans'08, Quebec, Canada*, pages 1-6, 2008.

Chapitre 3

Ondes Ultra Basse Fréquence

[Science] works ! Planes fly. Cars drive. Computers compute. If you base medicine on science, you cure people. If you base the design of planes on science, they fly. If you base the design of rockets on science, they reach the moon. It works...

R. Dawkins

3.1 Introduction

Contexte

Ce chapitre focalise sur le traitement de signaux dans la gamme dite *Ultra Basse Fréquence*, soit des fréquences inférieures à quelques centaines de Hertz. La bande UBF présente un intérêt particulier, tant d'un point de vue académique qu'applicatif. En effet, l'océan recèle de nombreuses sources UBF, qu'elles soient naturelles ou d'origine humaine. A titre d'exemple, tous les mysticètes (i.e. les grosses baleines à fanon) émettent des signaux transitoires UBF (que l'on appelle souvent vocalises). D'autre part, les navires et sous-marins émettent naturellement des UBF. Ce bruit rayonné contient une composante large bande et de diverses composantes monochromatiques. Le paysage acoustique sous-marin UBF est donc riche et diversifié, tant d'un point de vue traitement du signal que des phénomènes biologiques et/ou physiques mis en jeu.

Les sources citées plus haut créent des ondes UBF qui se propagent sur de grandes distances et pénètrent profondément dans les sous-sols. La propagation des ondes UBF dans les milieux marins est dispersive : différentes fréquences se propagent à différentes vitesses. Cette propagation est décrite par la théorie des modes. Physiquement, divers modes se propagent, et chaque mode est différemment impacté par la dispersion. En terme de traitement du signal, le signal reçu est multicomposante. De plus, chaque composant (i.e. mode) possède un retard de groupe non-linéaire (dont la loi dépend du numéro du mode).

La dispersion est ambivalente. D'une part, la dispersion déforme les signaux lors de la propagation et rend leur étude plus compliquée. D'autre part, une fois caractérisée, la dispersion permet de remonter aux informations sur le milieu de propagation et sur la source. Les ondes UBF, étudiées avec des outils de traitement du signal adaptés, sont donc d'excellents vecteurs d'information. Elles peuvent être utilisées aussi bien pour des thématiques de localisation de sources que de caractérisation de l'environnement.

Dans ce chapitre, on présentera les UBF d'un point de vue acoustique et traitement du signal. Toutefois, l'application des méthodes proposées dépasse largement ce cadre. Le spectre applicatif couvre diverses thématiques, allant de la biologie à la lutte sous-marine. Nous verrons quelques applications bioacoustiques dans le chapitre suivant.

Objectifs

L'objectif de mes travaux est de proposer des méthodes passives de localisation de sources et de caractérisation de l'environnement¹. Je m'intéresse tout particulièrement à l'interception de signaux transitoires inconnus (impulsions et/ou modulations de fréquence) à partir d'un unique hydrophone en milieu petit fond (<200 m). Ce contexte est évidemment particulièrement défavorable, puisque les méthodes classiques de localisation basées sur l'utilisation d'un réseau de capteurs (e.g. traitement d'antenne, triangulation) sont proscrites. L'objectif est donc de proposer des méthodes novatrices permettant (1) d'estimer la distance entre la source et l'hydrophone, (2) d'estimer la profondeur de la source et/ou (3) de caractériser l'environnement entre la source et le récepteur.

Je m'intéresse également à l'utilisation d'antennes réceptrices, qu'elles soient horizontales ou verticales. Cela permet notamment d'étendre l'étude aux sources continues, qu'elles soient larges bandes ou monochromatiques. Dans le contexte UBF, les méthodes classiques de formation de voies (basées sur un modèle physique simple de type onde plane) sont mises en défaut par la dispersion du milieu. L'objectif est alors de proposer des traitements innovants prenant en compte la dispersion, et permettant de localiser les sources et/ou caractériser le milieu marin.

Méthodes

Quelque soit le contexte d'étude, les méthodes proposées suivent globalement la même procédure :

1. Extraction de l'information modale : souvent, il s'agit de filtrage modal (i.e. séparation des modes)
2. Prise de décision basée sur l'étape précédente : souvent, il s'agit de résoudre un problème inverse basé sur les modes filtrés.

La difficulté principale est que les modes ne sont pas séparés dans les espaces de représentation classique (e.g. temps-fréquence pour le contexte mono-capteur, sortie de filtre spatial pour le contexte multi-capteur). Les solutions proposées contournent ce problème via une synergie entre méthodes de traitements et physique des ondes. On s'attache ainsi à modifier les traitements existants via l'intégration d'un *a priori* physique, que l'on souhaite simple mais robuste. On obtient ainsi des traitements adaptés à la propagation modale.

Notons que l'acoustique sous-marine est un contexte applicatif difficile. En effet, l'océan est un milieu variable dans le temps et l'espace, et ce à

1. La problématique de la détection des signaux n'est pas traitée.

diverses échelles. De nombreuses méthodes génériques fonctionnant dans divers domaines (e.g. sismologie, radar, ...) sont mises en défaut². Dans ce chapitre, les méthodes proposées seront (autant que possible) validées sur des données expérimentales marines.

Encadrement, collaboration et projets

Sur le plan national, la thématique UBF est très largement portée, animée (et financée) par la DGA. Les études académiques associées sont historiquement réalisées à Grenoble, tout d'abord au CEPHAG, devenu LIS puis GIPSA-Lab. Une série de thèses s'attache à comprendre la propagation UBF à la fin des années 1990 [Le Roux, 1996, Pignot, 1997, Nardin, 1998]³. La mise en place des traitements adaptés a démarré il y a 15 ans. Elle donna lieu à 3 thèses consécutives [Nicolas, 2004, Le Touzé, 2007, Bonnel, 2010], dont la dernière n'est autre que la mienne. La majorité des travaux que j'ai réalisés depuis a été financée par la DGA. Pour certains de ces travaux, j'ai poursuivi la collaboration avec mes encadrants de thèse grenoblois, J.I. Mars (GIPSA-Lab) et B. Nicolas (GIPSA-Lab puis CREATIS). J'ai également exploré de nouvelles pistes sur le sujet. Cela m'a permis de devenir l'interlocuteur principal de la DGA sur la thématique UBF, et de monter des collaborations internationales, notamment avec R. Chapman et S. Dosso de l'Université de Victoria (UVic, Canada). Cette ouverture a drastiquement augmenté la visibilité de mes recherches, et me permet aujourd'hui de porter des projets internationaux.

Pour les travaux présentés dans ce chapitre, il est intéressant de distinguer les recherches que j'effectue personnellement des recherches que j'encadre. Je m'efforce en effet de trouver un équilibre sain entre "faire" et "faire faire" (à des stagiaires, des doctorants, ou des post-doctorants). Globalement, la recherche autour des méthodes mono-capteur est un travail que je mène personnellement. Le développement méthodologique est principalement réalisé en collaboration avec J. Mars (GIPSA-Lab) et B. Nicolas (CREATIS). Ce travail est largement financé par la DGA, et plus récemment par l'ONRG (Office of Naval Research Global, USA). L'application des méthodes mono-capteurs pour l'inversion géoacoustique est également un travail de recherche largement personnel.

2. A titre d'exemple, on pourra remarquer que les communications acoustiques sous-marines ont un débit dépassant péniblement la dizaine de kbits/s pour des distances de l'ordre du kilomètre.

3. Je ne peux m'empêcher de conseiller la lecture de [Pignot, 1997] qui effectue une brillante analyse de la propagation UBF en sortie de formation de voie, s'appuyant implicitement sur des concepts qui ne seront clairement formalisés que bien plus tard (tel que l'invariant d'antenne [Sostrand, 2005, Lee and Makris, 2006]).

Il est réalisé en collaboration avec R. Chapman et S. Dosso (UVic). Mes mobilités vers l'UVic ont été financées par le GIS Europole Mer ainsi que par l'UVic. Cette thématique bénéficie aujourd'hui de la contribution de D. Eleftherakis, post-doctorant financé par l'ONRG. D'autre part, les travaux orientés "antenne" sont plutôt des travaux que je supervise. Ils ont notamment bénéficié des contributions de :

- E. Conan, doctorant financé par un contrat avec DGA Techniques navales,
- R. Emmetière, stagiaire de M2R puis doctorant financé par Thalès Underwater Systems (TUS) et par la DGA (bourse CIFRE Défense),
- F. Le Courtois, post-doctorant financé par un projet DGA/MRIS,
- Y. Le Gall, stagiaire de M2R puis doctorant financé par une bourse DGA/MRIS,
- A. Korakas, post-doctorant financé par un contrat avec DGA Techniques navales,
- M. Vidal, élève M2R ayant effectué son stage à l'ENSTA Bretagne.

J'encourage autant que possible les doctorants et post-doctorants à donner une dimension internationale à leurs recherches. Dans le cadre de leurs projets de recherche, Y. Le Gall et F. Le Courtois ont tous deux effectué un séjour à l'UVic, respectivement de 6 et 2 mois. Notons enfin que certains travaux autour des antennes verticales ont été réalisés en collaboration avec A. Thode, chercheur à l'University of California San Diego (USA). La collaboration avec A. Thode sera détaillée plus largement dans le chapitre suivant.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La section 3.2 effectue une rapide présentation de la propagation modale, insiste sur quelques propriétés physiques d'intérêt particulier pour la suite, et rappelle les traitements classiques adaptés à la propagation. Après ce rappel de la littérature, la section 3.3 présente mes développements personnels en terme de traitements adaptés à la propagation modale, tant dans un contexte mono-capteur que pour des antennes verticales ou horizontales. Les sections 3.4 et 3.5 présentent des applications concrètes de ces traitements (localisation de source et caractérisation environnementale), respectivement dans un contexte mono-capteur puis dans un contexte antenne. La section 3.6 conclut ce chapitre, et insiste sur les perspectives envisagées.

3.2 Propagation et traitements classiques

3.2.1 Propagation modale

Théorie

Dans le contexte UBF, la propagation acoustique est aisément décrite en utilisant la théorie des modes normaux. On se place dans un repère cylindrique que l'on suppose invariant par rotation. L'espace est donc décrit par deux coordonnées, la distance r et la profondeur z , tel qu'illustré sur la figure 3.1. On suppose également que l'environnement est invariant en distance : les variables environnementales dépendent de z mais pas de r . En considérant une source à une profondeur z_s émettant un signal (fréquentiel) $S(f)$, le signal reçu sur un récepteur à la distance r et à la profondeur z_r est [Jensen et al., 2011] :

$$Y(f) \approx QS(f) \sum_{m=1}^M \psi_m(f, z_s) \psi_m(f, z_r) \frac{e^{jrk_{rm}(f)}}{\sqrt{k_{rm}(f)r}}, \quad (3.1)$$

où M est le nombre de modes propagatifs, $k_{rm}(f)$ et ψ_m sont respectivement le nombre d'onde et la fonction modale du mode m à la fréquence f . La variable Q est une constante, qu'on se permet d'inclure dans $S(f)$ dans la suite pour alléger les notations. Notons que k_{rm} et ψ_m dépendent exclusivement de l'environnement, et non de la configuration source/récepteur. Notons également que $\psi_m(f, z)$ dépend relativement peu de f , alors que c'est une fonction oscillante en z (le mode m oscille m fois dans la colonne d'eau, voir la figure 3.2 pour un exemple).

Chaque terme de l'équation (3.1) donne la contribution $Y_m(f)$ du mode m au champ acoustique total. Dans la suite, on adopte les notations suivantes :

$$Y_m(f) = A_m(f) e^{j[\phi_m(f) + \phi_s(f)]}, \quad (3.2)$$

avec

$$A_m(f) = |S(f)| \frac{\psi_m(f, z_s) \psi_m(f, z_r)}{\sqrt{k_{rm}(f)r}}, \quad (3.3a)$$

$$\phi_m(f) = k_{rm}(f)r, \quad (3.3b)$$

$$\phi_s(f) = \arg S(f). \quad (3.3c)$$

Les amplitudes modales $A_m(f)$ dépendent essentiellement de l'environnement et des profondeurs de source/récepteur z_s et z_r . Les phases modales quant à elles dépendent de l'environnement et de la distance source/récepteur r .

Les notations utilisées supposent que le nombre d'onde $k_{rm}(f)$ est un nombre réel, ce qui revient à négliger l'atténuation dans les sédiments. Si

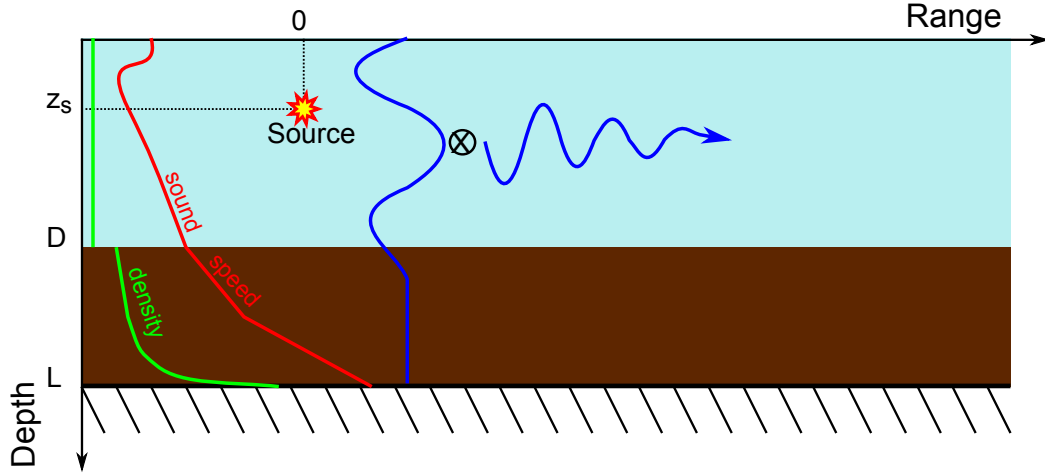


FIGURE 3.1 – Illustration de la configuration étudiée. Figure tirée de [Bonnell, 2010].

l'on souhaite prendre en compte cette atténuation, il faut prendre en compte $\Im[k_{rm}(f)]$, partie imaginaire du nombre d'onde, et inclure un terme multiplicatif $e^{-\Im[k_{rm}(f)]r}$ dans $A_m(f)$. La modélisation suppose également un milieu invariant en distance. Aux fréquences considérées, les longueurs d'onde sont suffisamment grandes pour que cette hypothèse soit souvent valide. Il est toutefois possible de prendre en compte des variations lentes du milieu grâce à la théorie des modes adiabatiques [Jensen et al., 2011]. Dans ce cas, il suffit d'adapter légèrement les équations (3.1) à (3.3), et toutes les méthodes proposées dans ce chapitre restent valides. Si le milieu varie brutalement, cela met en défaut l'hypothèse adiabatique. Il reste toutefois possible de modéliser la propagation avec une solution modale (e.g. modes couplés). En revanche, les traitements proposés ici ne sont plus directement applicables. Cette situation, qui peut arriver en cas de changements bathymétriques brusques et/ou de phénomènes dynamiques dans la colonne d'eau (front thermique, onde interne, ...), n'est pas considérée dans ce manuscrit.

Dispersion

La dispersion est une notion permettant de traduire le fait que différentes fréquences ne se propagent pas à la même vitesse. C'est le phénomène que nous analyserons et exploiterons par la suite. Dans les limites de l'acoustique linéaire, la vitesse du son ne dépend pas de la fréquence. Dans un espace libre infini, la propagation acoustique n'est donc pas dispersive. Cependant les guides d'ondes, de par leur géométrie, provoquent la dispersion. Cela se traduit ici par la dépendance fréquentielle des nombres d'ondes et des

fonctions modales. De manière générale, on appelle *relation de dispersion* la relation entre k_{rm} et f . Cela nous amène à introduire les concepts de vitesse de phase et de groupe.

La vitesse de phase $v_{pm}(f)$ d'un mode est la vitesse horizontale d'un front d'onde. Elle est définie par :

$$v_{pm}(f) = \frac{2\pi f}{k_{rm}(f)}. \quad (3.4)$$

La vitesse de groupe $v_{gm}(f)$ est, quant à elle, la vitesse horizontale à laquelle se propage l'énergie d'un mode m . Elle est définie par :

$$v_{gm}(f) = 2\pi \frac{df}{dk_{rm}}. \quad (3.5)$$

3.2.2 Propriétés des modes

Les modes possèdent diverses propriétés physiques intéressantes, ayant un impact important sur les traitements adaptés. Nous en listons quelques unes ici.

Propriétés des fonctions modales

En tant que solutions d'un problème de Sturm-Liouville, les fonctions modales ψ_m sont orthonormales [Jensen et al., 2011] :

$$\int \frac{\psi_m(z)\psi_n(z)}{\rho(z)} dz = \delta_{n,m} \quad (3.6)$$

où $\delta_{n,m}$ désigne le symbole de Kronecker. Cette propriété est largement utilisée dans un contexte de type antenne verticale.

Le comportement oscillatoire des fonctions modales est largement dicté par l'environnement, notamment par le profil de célérité dans la colonne d'eau. En présence d'un profil de célérité relativement constant, le champ acoustique interagit largement avec les interfaces (surface de l'eau, plancher océanique). Les fonctions modales sont alors oscillantes sur toute la colonne d'eau. On dit alors que les modes sont *libres*. En présence d'un profil de célérité avec des variations franches, une partie d'un champ acoustique devient dominée par la réfraction. La propagation est alors guidée dans le (ou les) minimum(s) du profil de célérité, sans interaction avec la surface et/ou le fond. Les modes correspondants à ce type de propagation sont dits *piégés* : leur comportement n'est oscillatoire que sur une partie de la colonne d'eau. De manière plus formelle, on définit comme piégés les modes dont la vitesse de phase est

inférieure au maximum de la célérité du milieu [Premus and Helfrick, 2013]. A titre d'exemple, la figure 3.2 illustre le cas d'un profil de célérité petit fond avec un gradient négatif de célérité à la surface. Lorsque la célérité est supérieure à la vitesse de phase, les modes piégés (ici 1 et 3) affichent une décroissance exponentielle à l'approche de la surface. On verra plus tard que ce phénomène permet de faire la différence entre une source à la surface et une source dans la colonne d'eau.

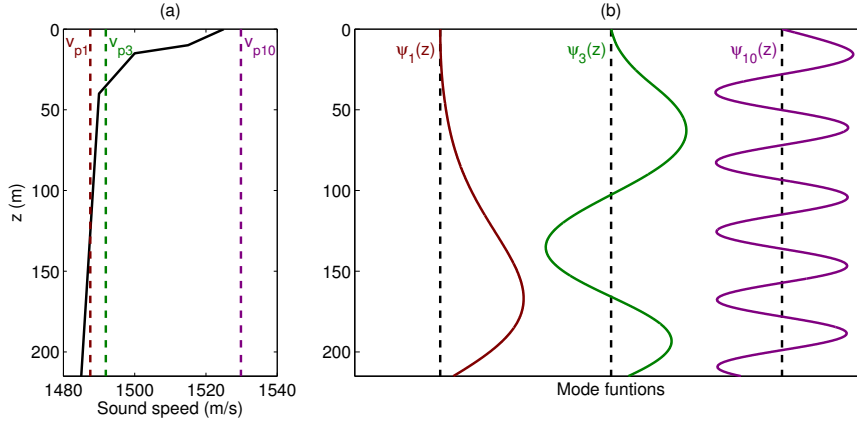


FIGURE 3.2 – Modes piégés et modes libres. (a) Profil de célérité (trait plein) et vitesses de phase des modes 1, 3, 10 (pointillés). (b) Fonctions modales des modes 1, 3, 10. Les fonctions modales ont un comportement oscillatoire tant que la vitesse de phase est supérieure à la célérité du son. Lorsque la célérité est supérieure à la vitesse de phase, les modes piégés (ici 1 et 3) affichent une décroissance exponentielle à l'approche de la surface, limitant le couplage avec les sources proches de celle-ci. Les modes libres (ici 10) oscillent sur toute la colonne d'eau. Figure tirée de [Conan et al., 2016].

Invariant océanique

Lorsque l'on considère l'intensité du champ acoustique (i.e. le module carré de la pression), des structures d'interférences entre modes apparaissent naturellement dans le domaine $r - f$ (distance-fréquence). A titre d'exemple, la figure 3.3 présente l'intensité acoustique rayonnée par un bateau. On voit de claires interférences qui suivent un motif de striations. Ce motif peut être décrit par un unique scalaire β appelé invariant océanique [Chuprov, 1982]. Cet invariant est défini comme la pente locale (en r, f) des courbes d'isointensité générées par les interférences modales :

$$\frac{\delta f}{\delta r} = \beta \frac{f}{r}. \quad (3.7)$$

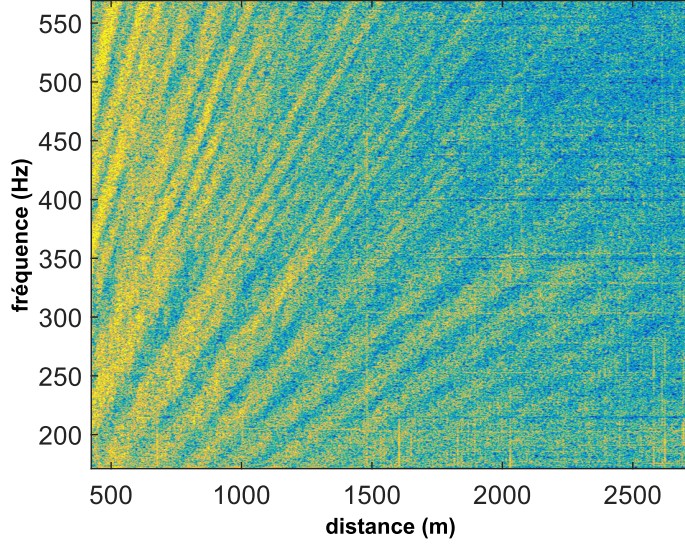


FIGURE 3.3 – Exemple d'intensité acoustique dans le domaine distance-fréquence : bruit rayonné par un navire en mouvement. Figure tirée de [Le Gall and Bonnel, 2013a].

L'invariant océanique n'est réellement invariant que dans des environnements simples (e.g. environnement petit fond avec un profil de célérité relativement constant). En réalité, l'invariant varie [Jensen et al., 2011] et peut être modélisé comme une distribution [Rouseff and Spindel, 2002]. L'invariant dépend alors de l'environnement, de la configuration source/récepteur, ainsi que des modes considérés dans son calcul.

Sans détailler la physique sous-jacente, il est intéressant de noter que dans un environnement complexe, le champ acoustique peut être divisé en contributions émanant de quelques groupes de modes, souvent moins de 3. L'invariant océanique est alors relativement constant au sein d'un groupe de modes. En effet, chaque groupe est composé de modes adjacents, et correspond à un régime de propagation donné (e.g. propagation réfléchie ou réfractée ; modes libres ou piégés ; etc...) [Guthrie, 1974]. Au sein d'un même groupe, il existe une relation fonctionnelle indépendante du numéro du mode, entre les vitesses de groupe (v_g) et les vitesses de phase (v_p) des modes.

La figure 3.4 illustre une telle relation $v_p - v_g$ dans un environnement grand fond. On observe dans le panneau de gauche trois relations $v_p - v_g$ distinctes, traduisant la réfraction ($m < 26$), la réflexion ($26 < m < 58$) et le transfert dans la première couche de sédiment ($m > 58$). En s'intéressant uniquement au mode $m_0 = 25$, panneau de droite, on note les deux mêmes relations $v_p - v_g$, ce qui correspond à une propagation réfléchie ($22 < f < 50$)

ou réfractée ($51 < f < 100$).

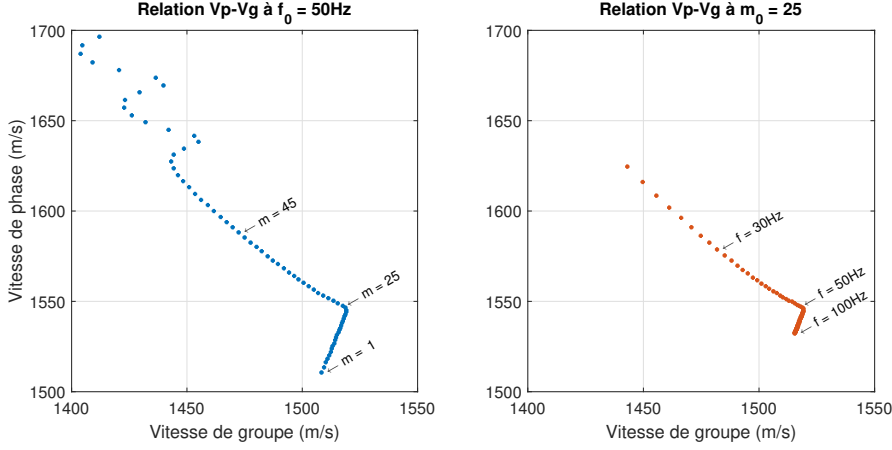


FIGURE 3.4 – Exemple de relation $v_p - v_g$ en grand fond. À gauche : relation $v_p - v_g$ en fonction de l'indice des modes à $f_0 = 50$ Hz. À droite : relation $v_p - v_g$ en fonction de la fréquence ($f \in [22, 100]$ Hz) pour le mode $m_0 = 25$. Figure tirée de [Emmetiere, 2016].

Il existe un lien fort entre l'invariant océanique et les relations $v_p - v_g$. Au sein d'un groupe de modes, on peut montrer que [Chuprov, 1982, Cockrell, 2011]

$$\beta = -\frac{\delta(1/v_g)}{\delta(1/v_p)}. \quad (3.8)$$

Il existe donc des valeurs privilégiées prises par l'invariant océanique. Ces valeurs correspondent aux pentes observées dans le domaine $v_p - v_g$ (c.f. figure 3.4). On retiendra notamment que pour un groupe de modes correspondant à une propagation réfléchie on a $\beta > 0$, alors que pour un groupe de modes correspondant à une propagation réfractée, on a $\beta < 0$.

Ces notions physiques (invariant et/ou groupes de modes) seront utilisées au coeur des traitements UBF. Elles permettront notamment de faire la différence entre une source de surface et une source immergée.

Propriétés temps-fréquence

Outre les notions physiques citées ci-dessus, mes travaux se sont largement appuyés sur l'étude temps-fréquence (TF) des signaux reçus. Il est donc intéressant de faire le lien entre la physique des modes et le domaine TF.

On restreint cette section aux signaux sources modulés en fréquence, dont le retard de groupe est donné par $\tau_s(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{df} \phi_s(f)$ (i.e. la source est un chirp,

éventuellement non-linéaire). On appelle *courbes de dispersion* les positions TF des modes après propagation. Elles sont données par

$$\tau_m(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{df} [\phi_s(f) + \phi_m(f)], \quad (3.9a)$$

$$= \tau_s(f) + \frac{r}{v_{gm}(f)}. \quad (3.9b)$$

Les courbes de dispersion dépendent donc du retard de groupe de la source $\tau_s(f)$, de la distance source/récepteur r , et de l'environnement (à travers les vitesses de groupe v_{gm}). La figure 3.5 illustre ce phénomène.

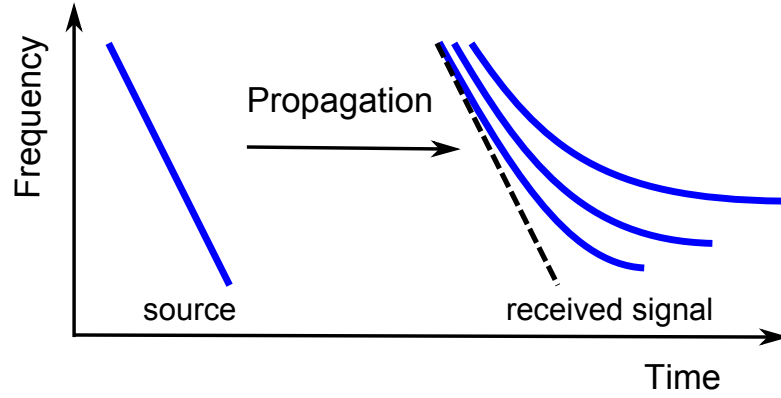


FIGURE 3.5 – Illustration de la propagation dans le domaine TF. Figure tirée de [Bonnell and Thode, 2014a].

3.2.3 Filtrage modal et localisation de source

La plupart des méthodes de localisation de source et/ou de filtrage modal considère l'utilisation d'antennes linéaires d'hydrophones. Dans cette section, on introduit le modèle de signal pour une antenne linéaire, ainsi que les méthodes classiques de filtrage modal et de localisation de source.

Modèle de signal sur une antenne

On considère maintenant que l'on possède N hydrophones, organisés en antenne linéaire. On suppose également un signal source monochromatique.

Dans le cas d'une antenne verticale (VLA, Vertical Line Array), l'équation de propagation (3.1) peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\mathbf{p} = \mathbf{\Psi} \mathbf{d}, \quad (3.10)$$

où

$$\mathbf{p} = [p_1 \dots p_N]^T, \quad (3.11)$$

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \psi_1(z_1) & \dots & \psi_M(z_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \psi_1(z_N) & \dots & \psi_M(z_N) \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{d} = [d_1 \dots d_M]^T, \quad (3.13)$$

où p_i est le champ de pression mesuré sur le capteur i et d_m désigne l'amplitude du mode m :

$$d_m = Q \psi_m(z_s) \frac{e^{j r_0 k_{rm}}}{\sqrt{r_0 k_{rm}}}. \quad (3.14)$$

Dans le cas d'une antenne horizontale (HLA, Horizontal Line Array), si la distance source/récepteur est suffisamment grande, il est également possible d'écrire (3.1) sous forme matricielle :

$$\mathbf{p} = \mathbf{\Phi} \mathbf{b}, \quad (3.15)$$

où

$$\mathbf{p} = [p_1 \dots p_N]^T, \quad (3.16)$$

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} \frac{e^{j r_1 k_{r1}}}{\sqrt{r_1 k_{r1}}} \psi_1(z_r) & \dots & \frac{e^{j r_1 k_{rM}}}{\sqrt{r_1 k_{rM}}} \psi_M(z_r) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{e^{j r_N k_{r1}}}{\sqrt{r_N k_{r1}}} \psi_1(z_r) & \dots & \frac{e^{j r_N k_{rM}}}{\sqrt{r_N k_{rM}}} \psi_M(z_r) \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

$$\mathbf{b} = Q \psi(z_s) = Q [\psi_1(z_s) \dots \psi_M(z_s)]^T. \quad (3.18)$$

Contrairement au cas de l'antenne horizontale, on constate que la matrice $\mathbf{\Phi}$ n'est pas seulement définie par l'environnement, mais aussi par la position de la source dans le plan horizontal.

Cependant, si la source est à l'endfire (i.e. alignée avec l'antenne) et si l'espacement inter-capteur δr est uniforme, l'équation (3.15) devient

$$\mathbf{p} \simeq \mathbf{\Lambda} \mathbf{a}, \quad (3.19)$$

où

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ e^{j\delta r k_{r1}} & \dots & e^{j\delta r k_{rM}} \\ \vdots & & \vdots \\ e^{j(N-1)\delta r k_{r1}} & \dots & e^{j(N-1)\delta r k_{rM}} \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

$$\mathbf{a} = Q [a_1 \dots a_M]^T, \quad (3.21)$$

$$a_m = \frac{Q}{\sqrt{r_1}} \frac{\psi_m(z_s) \psi_m(z_r)}{\sqrt{k_{rm}}} e^{j r k_{rm}}. \quad (3.22)$$

Dans ce cas, la matrice $\mathbf{\Lambda}$ ne dépend plus de la distance source récepteur. Le modèle (3.19) s'étend facilement à des sources proches de l'endfire. Dans ce cas, il suffit de remplacer δr par $\theta \delta r$, où θ est l'azimut de la source, pouvant être estimé par formation de voie classique [Stotts et al., 2010].

On notera que d'après la condition d'orthogonalité des modes (3.6), les colonnes de la matrice $\mathbf{\Psi}$ sont orthogonales si l'antenne verticale échantillonne suffisamment finement la colonne d'eau. Cela ne sera jamais le cas pour les antennes horizontales.

Filtrage modal

L'objectif du filtrage modal est d'extraire chaque mode du champ acoustique. De manière générale, il s'agit donc d'estimer chaque $Y_m(f)$ à partir de $Y(f)$ (voir équations (3.1) et (3.2)). Dans un contexte monochromatique, lorsqu'une antenne est disponible, il s'agit d'estimer $\mathbf{d}$, $\mathbf{b}$ ou $\mathbf{a}$ à partir de la pression observée $\mathbf{p}$. Il s'agit d'un problème d'estimation linéaire classique, la théorie du signal fournit plusieurs outils pour le résoudre. Une étude des filtres linéaires classiques est proposée dans [Buck et al., 1998]. Notons simplement que dans le cas d'une antenne verticale, si l'environnement est parfaitement connu, le problème est (relativement) bien posé grâce à l'orthogonalité des modes. Ce n'est jamais le cas pour les antennes horizontales.

Matched-Field Processing

Le Matched-Field Processing (MFP) permet d'estimer la position d'une source en comparant la pression mesurée sur une antenne $\mathbf{p}$ à une réplique

du champ de pression $\mathbf{p}_{th}(r, z)$ obtenue par simulation pour une position de source donnée. A une fréquence donnée, l'estimation de la position (r_s, z_s) de la source se fait généralement en maximisant le processeur de Bartlett [Baggeroer et al., 1993] :

$$B_{MFP}(r, z) = \frac{|\mathbf{p}^H \mathbf{p}_{th}(r, z)|^2}{\|\mathbf{p}\|^2 \|\mathbf{p}_{th}(r, z)\|^2}. \quad (3.23)$$

La normalisation du produit scalaire permet d'obtenir la même valeur de $B_{MFP}(r, z)$ quelle que soit l'amplitude (complexe) de la source choisie pour calculer $\mathbf{p}_{th}(r, z)$. Si la source est large bande, il suffit de calculer $B_{MFP}(r, z)$ aux fréquences disponibles et de moyenner le résultat.

Le MFP est applicable quelle que soit la forme de l'antenne et ne s'appuie pas sur un modèle de propagation particulier. Toutefois, la maximisation du processeur de Bartlett n'est pas une opération simple, la surface de Bartlett possédant généralement de nombreux lobes secondaires.

Le défaut principal du MFP est sa sensibilité aux incertitudes environnementales. Comme illustré sur la figure 3.6, l'environnement n'est jamais parfaitement connu. Cela entraîne des erreurs sur la simulation de $\mathbf{p}_{th}(r, z)$ qui, bien souvent, empêchent de localiser correctement la source.

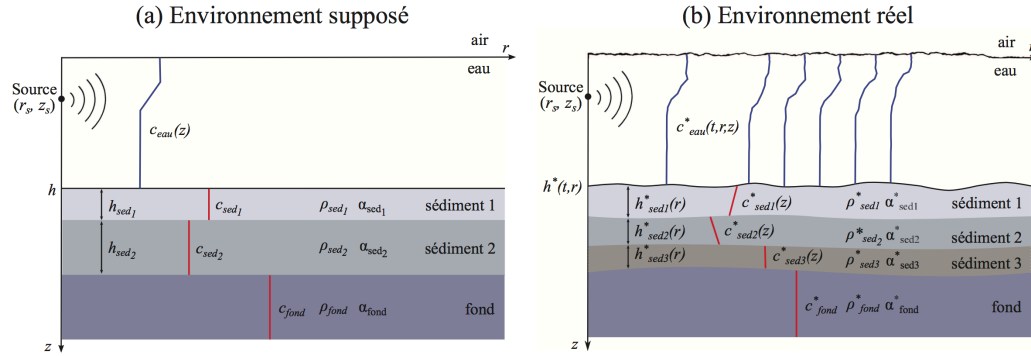


FIGURE 3.6 – Illustration des incertitudes environnementales en acoustique sous-marine. Figure tirée de [Le Gall, 2015].

Matched-Mode Processing

Le Matched-Mode Processing est une alternative au MFP. En supposant que l'on soit capable de filtrer les modes, on possède une estimation des modes $\hat{\mathbf{d}}$. Les méthodes de MMP permettent de localiser une source en comparant $\hat{\mathbf{d}}$ et des répliques simulées $\mathbf{d}_{th}(r, z)$. Cela se fait généralement avec un processeur

de Bartlett, exactement comme pour le MFP. Un des défaut du MMP est sa sensibilité au filtrage des modes (i.e. l'estimation de $\hat{\mathbf{d}}$). Notons également que le MMP reste sensible aux incertitudes environnementales [Yang, 1990].

Que ce soit en MMP ou en MFP, le processeur de Bartlett n'est rien d'autre qu'un produit scalaire normalisé. Comme en formation de voie conventionnelle, ce produit scalaire peut être remplacé par des méthodes plus avancées de type haute résolution (ou autre). Si l'idée est alléchante, elle est en réalité peu efficace dans la pratique. En effet, en milieu océanique, les erreurs associées aux incertitudes environnementales viennent généralement mettre en défaut les méthodes avancées d'estimation. La tendance actuelle pour localiser des sources en milieu incertain n'est pas de modifier le processeur de Bartlett, mais plutôt d'augmenter la dimension du problème inverse en incluant les paramètres environnementaux inconnus dans l'inversion [Dosso and Wilmut, 2009, Yardim et al., 2010].

3.3 Traitements modaux

Dans ce contexte UBF, j'ai proposé des méthodes et traitements adaptés à la propagation modale. Cette section s'intéresse plus particulièrement à l'extraction de l'information modale à partir du signal acoustique, et ce dans trois configurations différentes : mono-capteur (unique hydrophone), antenne linéaire horizontale, et antenne linéaire verticale. La localisation de source et la caractérisation environnementale seront vues dans les sections ultérieures.

3.3.1 Mono-capteur

On s'intéresse ici à l'interception de signaux impulsionnels dans un contexte mono-capteur. Pour étudier de tels signaux transitoires, il est naturel d'avoir recours à l'analyse TF. Lorsque la distance source/récepteur est suffisamment grande, les modes sont naturellement séparés dans le domaine TF (e.g. [Yang, 1984]). Cependant, lorsque cette distance se réduit, il est nécessaire d'utiliser des traitements adaptés. En effet, les courbes de dispersion des modes (i.e. leur position dans le plan TF, cf Eq. (3.9)) sont non-linéaires. Les représentations temps-fréquence (RTF) classiques ne sont donc pas adaptées pour étudier ce genre de signaux. Il est cependant possible de transformer le signal pour linéariser les modes, et/ou de modifier le plan TF pour l'adapter aux signaux modaux non-linéaires. Ces deux opérations peuvent être unifiées d'après le principe de l'équivalence unitaire [Baraniuk and Jones, 1995]

Ces techniques sont basées sur un opérateur de transformation appelé

warping⁴. Le warping a pour but de déformer l'axe temporel (ou fréquentiel) de manière à rendre linéaires les structures non-linéaires. Considérons un signal $y(x) = a(x)e^{j2\pi x_0\Phi(x)}$ où x représente le temps ou la fréquence, et où x_0 est une constante. Par définition, le warping transforme le signal $y(x)$ de la manière suivante :

$$\mathbf{W}y(x) = \sqrt{|h'(x)|}y[h(x)], \quad (3.24)$$

où $\mathbf{W}y(x)$ est le signal warpé, et $h(x)$ la fonction de warping, avec $h'(x)$ sa dérivée par rapport à x . Le warping est adapté au signal y si $h(x) = \Phi^{-1}(x)$ car ainsi, la phase du signal warpé devient linéaire, et $\mathbf{W}y(x)$ est une sinusoïde de fréquence x_0 (éventuellement modulée en amplitude). Une contrainte importante est que la fonction de warping $h(x)$ doit être bijective. Ainsi, le warping est une transformation inversible. Un signal warpé peut être "déwarpé" en utilisant $h^{-1}(x)$ comme fonction de warping. Concrètement, le warping s'implémente en ré-échantillonnant (i.e. interpolant) $y(x)$ avec une nouvelle variable $x_2 = h(x)$. Notons que le terme $\sqrt{|h'(x)|}$ assure la conservation de l'énergie entre $\mathbf{W}y$ et y . Il assure également que le warping est une transformation unitaire [Baraniuk and Jones, 1995].

La théorie sous-jacente au warping est relativement bien connue de la communauté TF. Les bases ont été posées par Altes [Altes, 1990] pour des signaux hyperboliques, et la méthode a depuis été étendue à tous types de signaux non-linéaires [Papandreou-Suppappola et al., 2001]. Son application concrète en acoustique sous-marine est plus récente. Elle a probablement été freinée par deux facteurs importants :

- la littérature TF est malheureusement peu compréhensible pour la communauté d'utilisateurs qui en aurait besoin,
- l'application du warping nécessite la définition d'une fonction de warping adaptée au problème physique sous jacent, ce qui peut être problématique lorsque le signal reçu possède diverses composantes de loi différentes.

Pour inclure la physique dans la fonction de warping, il est nécessaire de disposer de modèles environnementaux. Un des plus simples est le "guide parfait", constitué d'une couche d'eau isocélère entre deux surfaces planes : une parfaitement réfléchissante (la surface de l'eau) et l'autre parfaitement rigide (le plancher océanique). Dans un guide parfait de vitesse c , à une distance r , la phase des modes dans le domaine temporel est donnée par [Tolstoy and Clay, 1987]

$$\phi_{m_{iso}}(t) = 2\pi f_m \sqrt{t^2 - t_r^2}, \quad t > t_r, \quad (3.25)$$

4. Les terme français est anamorphose, mais on s'autorisera l'anglicisme par simplicité.

avec f_m la fréquence de coupure du mode m et $t_r = r/c$. On peut ré-écrire $\phi_{m_{iso}}(t) = 2\pi f_m \phi(t)$ avec $\phi(t) = \sqrt{t^2 - t_r^2}$. Dans un guide parfait, le caractère dispersif est donc le même pour tous les modes, à un facteur multiplicatif prêt. Ce phénomène a été utilisé par Chen et al. [Chen et al., 2003] pour définir des RTF adaptées à la propagation modale en utilisant un algorithme de Matching Pursuit. Il a ensuite été repris par Le Touzé et al. [Le Touzé et al., 2009] pour définir un opérateur de warping de fonction

$$h_{iso}(t) = \sqrt{t^2 + t_r^2}. \quad (3.26)$$

qui permet de transformer tous les modes en une seule fois. Cela permet d'aisément filtrer les modes, mais également de définir des RTF adaptées à la propagation modale (étendant ainsi les résultats de [Chen et al., 2003] grâce au principe de l'équivalence unitaire).

Après les travaux de Le Touzé et al. [Le Touzé et al., 2009], ma contribution principale a été d'utiliser la capacité de filtrage modale offerte par le warping pour répondre à divers problèmes concrets en acoustique sous-marine. J'ai tout d'abord proposé une méthode d'estimation des courbes de dispersion des modes [Bonnell et al., 2010]. Cette méthode est illustrée sur la figure 3.7 qui présente le spectrogramme d'une implosion d'ampoule enregistrée durant l'expérience Shallow Water 2006 (SW06), le spectrogramme du signal warpé ainsi que les courbes de dispersion estimées pour les 7 premiers modes. J'ai également proposé de remplacer le modèle du guide parfait par un modèle basé sur l'invariant océanique. Ce modèle -plus souple- permet de prendre en compte une plus grande variabilité environnementale. Il permet toutefois de warper tous les modes en une fois, et ainsi d'obtenir des RTF adaptées à la propagation modale [Bonnell et al., 2013c]. A titre d'exemple, la figure 3.8 présente le spectrogramme d'une explosion enregistrée en mer Jaune (océan Pacifique), ainsi que la RTF adaptée basée sur l'invariant océanique. Cette dernière permet de résoudre plus de 8 modes sur une large bande de fréquences, alors que le spectrogramme classique ne permet d'en voir que 4 sur une bande de fréquence plus réduite.

Une des limitations du warping est sa restriction aux sources impulsionnelles. J'ai cependant démontré qu'on pouvait aisément étendre le filtrage modal mono-capteur à tout signal transitoire de type "modulation de fréquence", à condition que la fréquence instantanée de la source soit monotone. Il suffit alors de compenser la phase instantanée de la source pour se rapporter au cas impulsionnel. Cette compensation de phase peut être effectuée à l'aveugle lorsque la source est inconnue. Aujourd'hui, cette opération n'est pas automatique et requiert l'intervention d'un opérateur. Elle permet toutefois d'appliquer le filtrage mono-capteur à une myriade

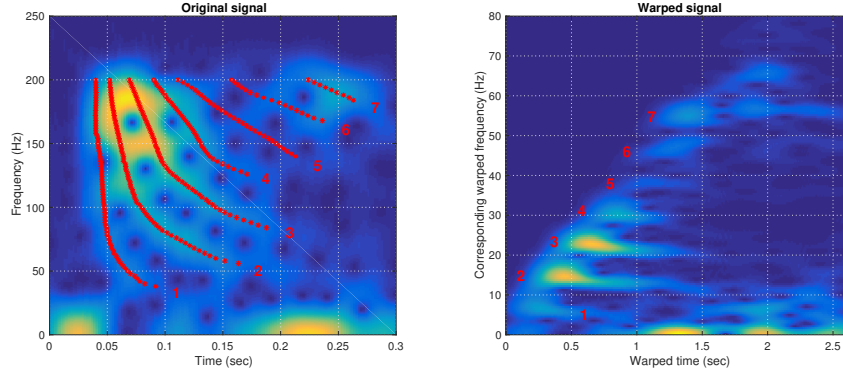


FIGURE 3.7 – Données SW06 : a) spectrogramme du signal reçu et courbes de dispersion estimées (points rouges), b) spectrogramme du signal warpé. Sur chaque figure, les modes sont numérotés pour faciliter la lecture. Figure obtenue lors d’une ré-analyse récente des données SW06 (collaboration avec l’UVic, février 2017).

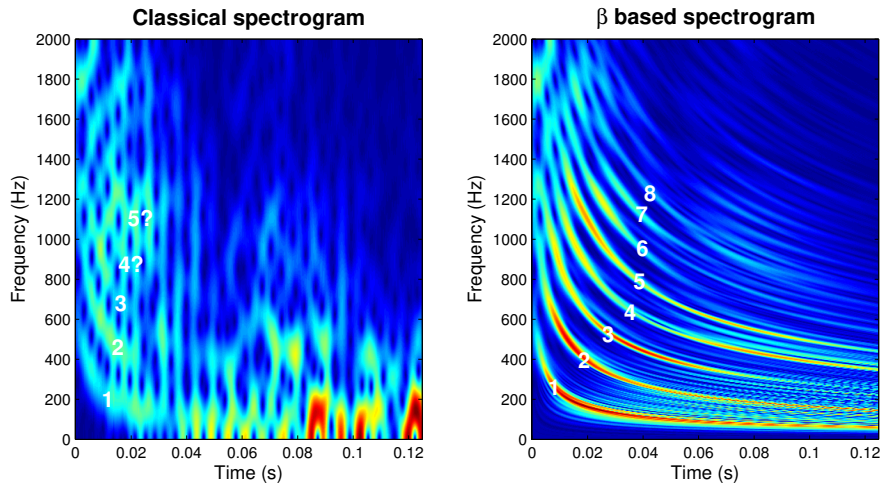


FIGURE 3.8 – Explosion enregistrée en mer Jaune : a) spectrogramme du signal reçu, b) spectrogramme adapté basé sur l’invariant océanique. Sur chaque figure, les modes sont numérotés pour faciliter la lecture. Figure extraite d’une présentation effectuée au GRETSI 2013 [Bonnell et al., 2013b]

de sources naturellement présentes dans les océans, et permet notamment l'étude des vocalises de mammifères marins avec un unique hydrophone (e.g. [Bonnell et al., 2014, Crance et al., 2015]). Ce dernier point sera traité en détail dans le chapitre suivant. Toutefois, la figure 3.9 illustre ici le warping tel qu'appliqué à une vocalise de baleine boréale (i.e. un chirp non linéaire inconnu) enregistrée en Arctique.

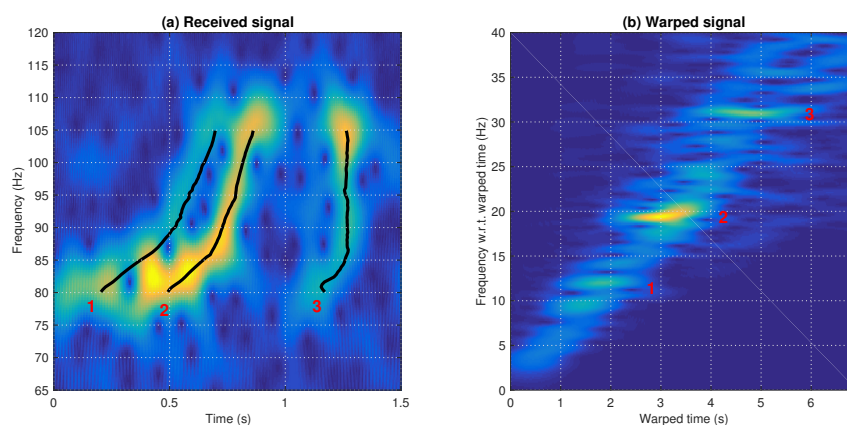


FIGURE 3.9 – Vocalise de baleine boréale : a) spectrogramme du signal reçu et courbes de dispersion estimées grâce au warping (lignes noires), b) spectrogramme du signal après warping. Sur les sous figures, les modes sont numérotés pour faciliter la lecture. Figure adaptée de [Bonnell et al., 2014]

Une lecture attentive de la littérature met en avant une seconde limitation du warping. Même si cela n'est jamais clairement précisé, l'estimation du premier mode est toujours moins bonne que les autres. A titre d'exemple, l'amplitude du premier mode est clairement biaisée dans [Bonnell et al., 2011] (figure 9) et dans [Duan et al., 2016] (figure 8). Egalement, la courbe de dispersion (et donc la phase) du mode 1 est mal estimée dans [Ballard et al., 2014] (Figure 4a) ou dans [Petrov, 2014] (figure 3). J'ai récemment mis ce phénomène en exergue, expliqué son origine, et proposé une méthode pour le contrecarrer [Bonnell et al., 2017]. Le problème émane de la difficulté à définir l'origine des temps de la fonction de warping dans un contexte expérimental, et peut se résoudre en jouant sur ce paramètre.

3.3.2 Antenne verticale

Comme cela a été mentionné précédemment, lorsqu'un VLA est disponible, le filtrage modal devient un problème d'estimation linéaire. Grâce à l'orthogonalité des fonctions modales, ce problème est bien posé lorsque le VLA échantillonne correctement l'intégralité de la colonne d'eau. Cela représente évidemment une contrainte expérimentale forte, parfois irréalisable en pratique. Pour contourner ce problème, j'ai proposé l'estimation des fonctions modales à partir de signaux transitoires UBF. Il est en effet possible de filtrer les modes capteur par capteur grâce au warping, et ce sans avoir recours à l'orthogonalité des modes [Bonnell et al., 2011] :

- l'amplitude des fonctions modales est donnée par le module des modes filtrés ;
- le signe des fonctions modales est donné par le suivi de la phase des modes le long du VLA.

La méthode est donc fonctionnelle même sur de petites antennes, mais restreinte aux profondeurs échantillonnées par l'antenne. Notons toutefois que l'estimation du signe des fonctions modales est mise en défaut si l'antenne est inclinée (puisque l'inclinaison modifie la phase des modes filtrés). Pour estimer correctement ce signe, il est alors possible de normaliser la phase de chaque mode par rapport au mode 1 (qui lui ne change pas de signe le long du VLA).

Dans le cas où le VLA n'est pas parfaitement vertical, il est possible d'estimer l'inclinaison de l'antenne avec la même méthode. En effet, cette estimation est triviale dans un contexte où un unique mode m se propage. Il suffit alors de suivre la phase $\phi_m(f)$ de ce mode le long de l'antenne. L'offset horizontal entre deux capteurs i et j est alors donné par

$$\Delta r_i - \Delta r_j = \frac{\phi_m^i(f) - \phi_m^j(f)}{k_{rm}(f)}, \quad (3.27)$$

avec Δr_i l'offset au niveau du capteur i et $\phi_m^i(f)$ la phase du mode m estimée au niveau du capteur i . En pratique, dans un contexte passif, il est très rare d'avoir un unique mode propagatif. Grâce au warping, on peut cependant filtrer les modes et appliquer l'équation (3.27) pour estimer l'inclinaison de l'antenne. Cette méthode a été appliquée avec succès sur un observatoire acoustique en Arctique, en utilisant comme source UBF une vocalise de baleine boréale [Thode and Bonnell, 2015]. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.10. On voit que la partie supérieure de l'antenne ($15 < z < 35$ m) est relativement verticale, alors que la partie inférieure ($z > 40$ m) est largement incliné. Ces résultats sont cohérents avec des mesures indépendantes obtenues avec un inclinomètre.

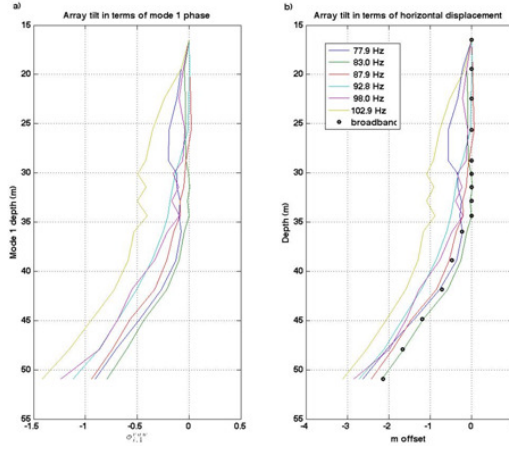


FIGURE 3.10 – Estimation passive de l'inclinaison de l'antenne : a) déphasage du mode 1 le long de l'antenne, b) déplacement horizontal des capteurs (projection dans la direction source/récepteur). Figure extraite de [Thode and Bonnel, 2015].

3.3.3 Antenne horizontale

Dans le cas d'un HLA, il est possible de faire comme avec un VLA et d'appliquer le warping capteur par capteur pour filtrer les modes. On peut cependant mettre en place d'autres types de méthodes. Lorsque la source et l'antenne sont alignées, le filtrage modal revient à estimer $\mathbf{a}$ dans l'équation (3.19), ce qui est un classique problème d'estimation spectrale. Cependant, notons que pour des tailles d'antennes réalistes, le conditionnement du problème est particulièrement mauvais. A titre d'exemple, il dépasse largement 10^4 pour une fréquence de 250 Hz enregistrée sur une antenne de 350 m en environnement petit fond.

Pour estimer les modes dans ce contexte, j'ai proposé de tirer parti de la physique sous-jacente. En effet, pour une source monochromatique UBF, seul un petit nombre de modes se propagent. Autrement dit, le spectre des nombres d'ondes est naturellement parcimonieux. Dans le cadre du post-doctorat de F. Le Courtois, nous avons ainsi proposé d'utiliser diverses méthodes avancées de traitement du signal pour estimer le spectre des nombres d'ondes, telles que les méthodes haute-résolution [Le Courtois and Bonnel, 2014a] ou les méthodes parcimonieuses [Le Courtois and Bonnel, 2015].

D'autre part, lorsqu'une source large bande est disponible, il est également possible d'injecter de l'information physique dans la dimension fréquentielle. En effet, la propagation modale implique que les nombres d'ondes k_{rm} res-

pectent la relation de dispersion

$$\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 = \sqrt{k_{rm}(f)^2 + k_{zm}(f)^2}, \quad (3.28)$$

avec c la célérité des ondes dans l'eau et k_{zm} le nombre d'onde vertical du mode m . En discrétisant l'axe des fréquences avec un pas Δ_f et en notant $k_{rm}[\nu] = k_{rm}(\nu\Delta_f)$, la relation de dispersion devient

$$k_{rm}[\nu + 1]^2 = k_{rm}[\nu]^2 + (2\nu + 1) \left(\frac{2\pi\Delta_f}{c}\right)^2 + \epsilon[\nu], \quad (3.29)$$

avec $\epsilon[\nu] = k_{zm}[\nu]^2 - k_{zm}[\nu + 1]^2$ une quantité négligeable face aux autres termes (car les nombres d'ondes verticaux dépendent peu de la fréquence en environnement petit fond [Jensen et al., 2011]). Cette relation de dispersion discrète permet de relier le comportement des modes d'une fréquence à l'autre, et ainsi d'améliorer leur estimation avec, par exemple, des méthodes de filtrage particulière [Le Courtois and Bonnel, 2014b].

Nous avons récemment fusionné l'hypothèse parcimonieuse (dans la dimension des nombres d'ondes) et l'*a priori* dispersif (dans la dimension fréquentielle) au sein d'un algorithme bayésien d'acquisition compressée [Dremeau et al., 2017]. A titre d'exemple, la figure 3.11 présente le résultat de l'estimation des nombres d'ondes à partir d'un HLA pour des données enregistrées en Mer du Nord. Les figures 3.11a et 3.11b présentent l'estimation à partir de 240 et de 20 hydrophones avec une inversion aux moindres carrés (estimation spectrale classique). Il est clair qu'avec un nombre de capteur réduit (figure 3.11b), l'inversion aux moindres carrés ne permet pas d'estimer correctement les nombres d'ondes. La figure 3.11c présente l'estimation à partir de 20 hydrophones avec un algorithme d'Orthogonal Matching Pursuit (OMP, estimation parcimonieuse classique). La figure 3.11d présente l'estimation à partir de 20 hydrophones avec l'algorithme proposé, tirant parti à la fois de la parcimonie et de la dispersion fréquentielle des modes. La méthode proposée permet une excellente estimation des nombres d'ondes à partir d'un faible nombre de capteurs, et illustre ainsi l'intérêt des traitements adaptés à la propagation dans un contexte modal.

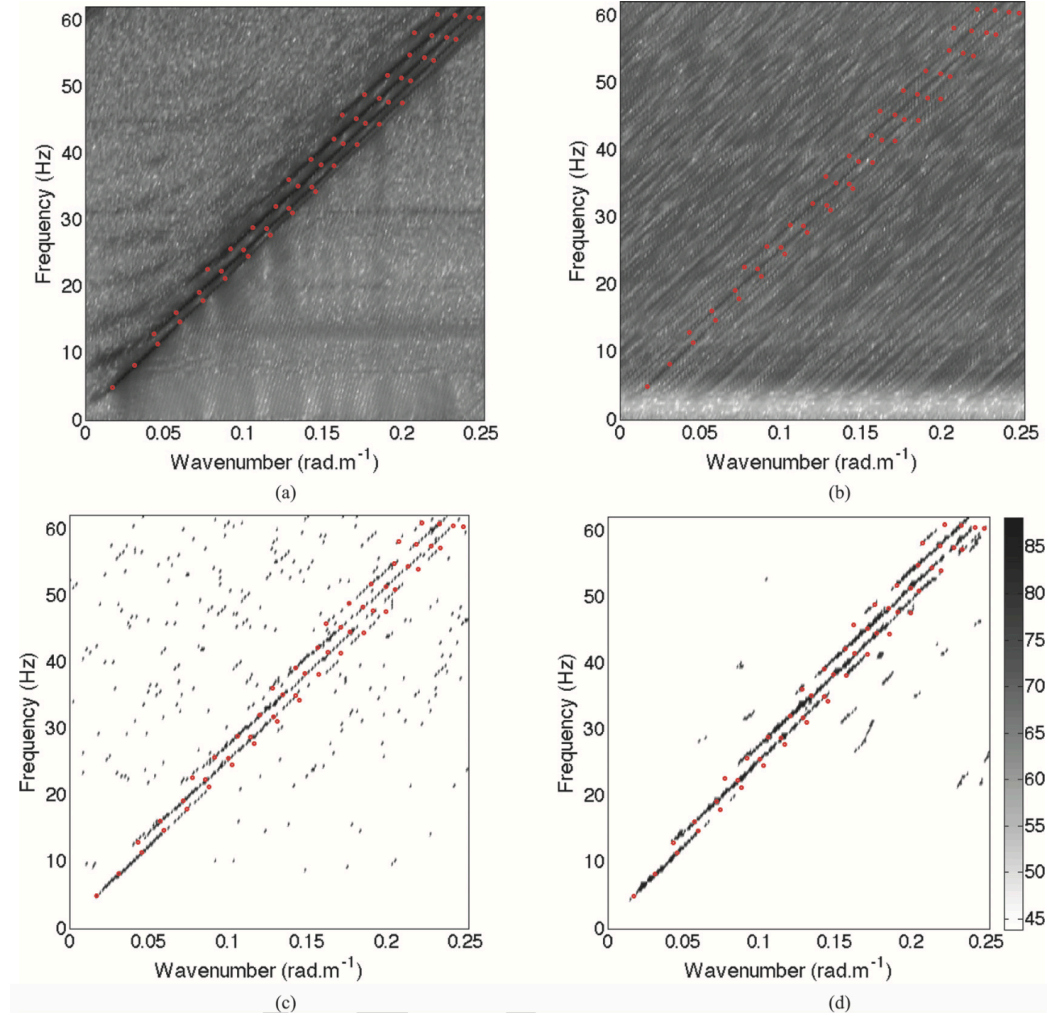


FIGURE 3.11 – Reconstruction des courbes de dispersion $f - k$ pour les données Mer du Nord en utilisant : (a) 240 hydrophones et une inversion aux moindres carrés, (b) 20 hydrophones et une inversion aux moindres carrés, (c) 20 hydrophones et l'algorithme OMP, (d) 20 hydrophones et l'algorithme SOBAP avec *a priori* dispersif. Sur chaque figure, l'échelle des gris est logarithmique, et les points rouges représentent la valeur théorique des nombres d'ondes. Figure extraite de [Dremeau et al., 2017].

3.4 Applications mono-capteurs

Les traitements présentés dans la section précédente permettent d'extraire l'information modale du signal reçu. Même si cela présente un intérêt académique certain, il est légitime de se demander à quoi peuvent servir ces quantités. Cette section présente diverses applications concrètes des traitements précédents, notamment l'inversion géoacoustique et la localisation de source. Par inversion géoacoustique, on sous-entend estimation des paramètres (géo)-acoustiques des sédiments marins. Ces derniers sont particulièrement importants pour simuler correctement la propagation en UBF, et sont donc indispensables aux modèles de prévision de bruit ambiant, de performance sonar, ou d'estimation du niveau d'une source acoustique. L'inversion géoacoustique ainsi que la localisation de sources UBF ont donc un large spectre applicatif : biologie (e.g. étude des mysticètes), environnement (e.g. prévision de la pollution acoustique), et défense (e.g. lutte sous-marine).

3.4.1 Signaux transitoires

Comme cela a été expliqué précédemment, le warping permet de filtrer les modes, ce qui permet ensuite d'estimer les courbes de dispersion TF. Ces courbes de dispersion, qui découlent directement de la phase des modes, sont indépendantes des profondeurs d'émission et de réception. Ce sont donc des observables robustes pouvant servir de données d'entrée à des algorithmes d'inversion géoacoustique [Potty et al., 2000]. L'idée est simplement de comparer les courbes de dispersion estimées $\mathbf{d}_k$ à un jeu de courbes de dispersion simulées $\mathbf{d}_k(\mathbf{m})$ pour diverses configurations environnementales. Il s'agit ainsi de trouver le vecteur de paramètres environnementaux $\mathbf{m}$ qui minimise

$$L(\mathbf{m}) = \prod_{k=1}^K \frac{1}{(2\pi)^{N_k/2} |\mathbf{C}_k|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_k(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_k^{-1} (\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_k(\mathbf{m})) \right], \quad (3.30)$$

avec K le nombre de modes considérés, N_k le nombre de données pour le mode k , et $\mathbf{C}_k$ la matrice de covariance de l'erreur associée au mode k (sous l'hypothèse gaussienne).

J'ai utilisé cette méthode pour estimer les propriétés géoacoustiques du plateau continental au large du New Jersey [Bonnell and Chapman, 2011, Bonnell et al., 2013a]. D'un point de vue méthodologique, la contribution principale de ce travail est d'effectuer cette inversion non-linéaire dans un cadre bayésien, qui permet d'évaluer les incertitudes d'estimation. D'un point de vue applicatif, l'utilisation du warping permet d'estimer les courbes de dispersion à des distances largement plus faibles que ce qui est proposé dans

la littérature (e.g. $r < 10$ km), ce qui permet de mieux localiser les résultats. A titre d'exemple, la figure 3.12 présente les profils de probabilité estimés pour la vitesse et la densité dans les sédiments. Ce résultat, cohérent avec notre connaissance de l'environnement, a été obtenu avec un unique capteur enregistrant une implosion d'ampoule distante de 7 km.

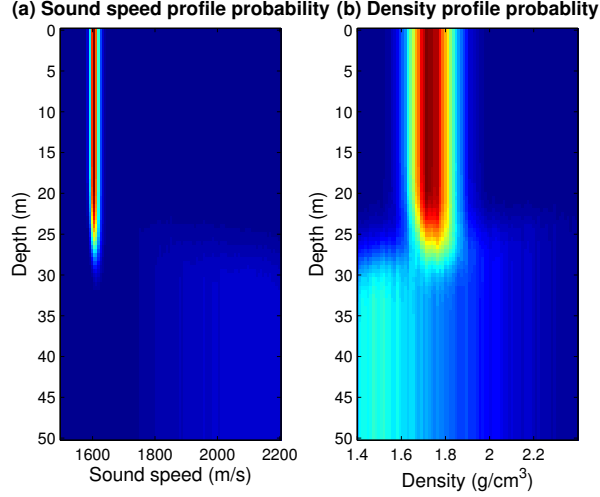


FIGURE 3.12 – Profils de probabilités marginales : (a) vitesse du son et (b) densité. Chaque distribution est normalisée pour des profondeurs de 0 à 50 m (échelle linéaire arbitraire). Figure extraite de [Bonnell et al., 2013a].

Si les courbes de dispersion permettent une bonne estimation de certains paramètres géoacoustiques, elles ne permettent pas d'estimer l'atténuation des sédiments, qui influe principalement sur l'amplitude des modes. Cette atténuation est pourtant un paramètre d'une importance capitale pour prédire la propagation. En UBF, l'atténuation (et notamment sa dépendance fréquentielle) est particulièrement mal connue, tant du point de vue de la modélisation que de la mesure empirique (voir [Zhou et al., 2009] pour une présentation générale du problème). Il est donc tentant d'estimer cette atténuation en se basant sur les amplitudes modales obtenues après warping. Nous avons notamment obtenu des résultats préliminaires prometteurs [Zeng et al., 2013]. Les investigations doivent toutefois être poursuivies. Mes récentes avancées autour du warping [Bonnell et al., 2017] devraient permettre d'améliorer l'estimation des amplitudes modales, et ainsi contribuer à une meilleure connaissance de l'atténuation dans les sédiments marins. Notons également que les résultats de l'inversion géoacoustique sont potentiellement impactés par les inhomogénéités et les fluctuations du milieu marin. Nous avons récemment mis en avant l'impact d'effets 3D sur la dispersion TF des

modes [Sturm and Bonnel, 2015]. A l'avenir, il faudra prendre en compte ces phénomènes dans les algorithmes d'inversion, ou au minimum estimer leurs impacts en terme d'incertitude sur les résultats.

Les méthodes précédentes sont limitées aux sources impulsionnelles. Cela est peu contraignant en inversion géoacoustique, puisque diverses sources impulsionnelles sont couramment utilisées : canons à air, implosions d'ampoules, charges explosives, etc ... Cependant, ces sources impactent largement le paysage acoustique sous-marin, et il semble aujourd'hui préférable de les utiliser le moins possible. J'ai donc proposé une méthode d'inversion géoacoustique permettant d'utiliser des sources modulées en fréquence. Cette méthode, basée sur une étude des différences de phase entre modes, peut être utilisée dans un contexte passif (i.e. source de fréquence instantanée inconnue). Couplée au warping, elle permet de localiser les sources (e.g. des vocalises de mammifères marins), et/ou d'utiliser ces sources pour estimer l'environnement [Bonnel et al., 2012]. Une application de cette méthode pour la bioacoustique sera présentée dans le chapitre suivant.

3.4.2 Bruits large bande

Les traitements et méthodes proposées précédemment ne s'appliquent pas aux bruits continus large bande. Ce type de signal est pourtant particulièrement intéressant en acoustique sous-marine. Il correspond par exemple au bruit rayonné par un navire en mouvement. Pour des raisons environnementales, il est aujourd'hui crucial d'utiliser de tels signaux -naturellement présents dans le milieu- plutôt que d'introduire de l'énergie acoustique via l'émission de signaux acoustiques dédiés, telles que les impulsions précédemment étudiées.

Dans ce contexte, nous avons proposé diverses méthodes pour étudier et utiliser le bruit rayonné par un navire. Pour mémoire, dans un contexte mono-capteur, le spectrogramme d'un tel bruit présente un motif de striations qui peut être décrit par l'invariant océanique. A titre d'exemple, la figure 3.13a, illustre le bruit rayonné par un chalutier (en connaissant la position du navire, l'axe -horizontal- des temps peut être remplacé par un axe des distances). Comme précédemment, il est possible de tirer parti de l'invariant pour adapter les traitements. En effet, la transformée de Fourier spatiale (TF_r) de l'intensité acoustique est donnée par

$$\begin{aligned} I(\Delta k, f) &= TF_r[r \cdot I(r, f)], \\ &= \gamma_s(f) \sum_{m,n} A_m A_n \delta(\Delta k - \Delta k_{mn}(f)), \end{aligned} \quad (3.31)$$

avec $\gamma_s(f)$ la densité spectrale de la source. Elle fait apparaître les courbes de dispersion relatives (CDR) entre modes $\Delta k_{m,n}(f) = k_m(f) - k_n(f)$, tel

qu'illustré sur la figure 3.13b. Nous avons proposé un algorithme d'inversion géoacoustique passive basé sur ces CDR [Gervaise et al., 2012]. Dans le cadre du stage de M2R de Y. Le Gall, nous avons également développé une méthode d'estimation passive de l'invariant océanique [Le Gall and Bonnel, 2013b]. Cette dernière est basée sur un ré-échantillonnage permettant de linéariser les CDRs, tel qu'illustré sur la figure 3.13c. Notons que ce ré-échantillonnage exploite le même modèle physique basé sur l'invariant océanique que la méthode de warping décrite en section 3.3.1.

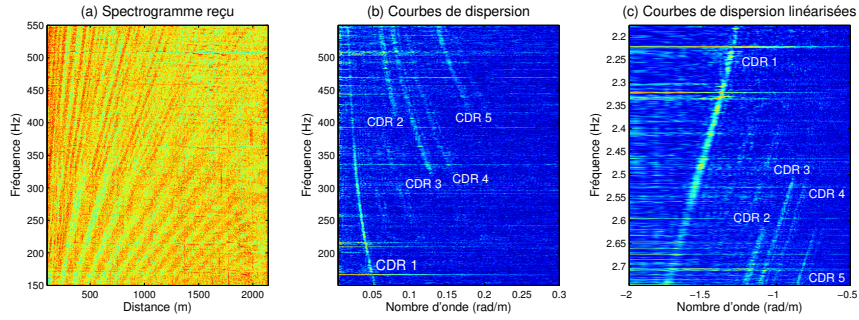


FIGURE 3.13 – (a) Spectrogramme du bruit rayonné par le chalutier (campagne expérimentale MOVEBOAT2006, Espagne), (b) Courbes de dispersion relatives, (c) Courbes de dispersion relatives linéarisées. Figure tirée de [Le Gall and Bonnel, 2014].

Dans le même contexte, nous avons aussi mis en place une méthode de débruitage permettant d'améliorer le rapport signal à bruit et de séparer les contributions de deux navires dans le plan temps-fréquence. Encore une fois, la méthode exploite le principe de l'invariant océanique ainsi qu'une faible connaissance *a priori* des célérités du canal océanique pour guider les traitements. Il s'agit cette fois-ci d'un filtrage non-linéaire (homomorphique) dans le domaine de la TF 2D du spectrogramme [Le Gall and Bonnel, 2013a].

3.5 Antennes et localisation de sources

Outre les applications mono-capteurs présentées précédemment, une partie de ma recherche a également porté sur le développement des méthodes de localisation de sources à partir d'une mesure effectuée par une antenne. Sont d'abord présentées des méthodes permettant de localiser une source en milieu incertain à partir d'une mesure sur un VLA. La seconde partie de cette section présente des méthodes de discrimination en immersion à partir d'une mesure sur un HLA. Ces dernières permettent de faire la distinction entre une source de surface (e.g. un navire) et une source immergée (e.g. un sous-marin).

3.5.1 Milieux incertains

Lorsqu'on considère un signal reçu sur un VLA, la méthode la plus classique de localisation de source en acoustique sous-marine est probablement le MFP, présenté en section 3.2.3. Comme cela a été dit, le MFP est régulièrement mis en défaut par les incertitudes (et/ou les fluctuations) environnementales. En effet, il est nécessaire de posséder un modèle de l'environnement pour réaliser l'inversion, et ce dernier est parfois très éloigné de la réalité, comme l'illustre la figure 3.6. Les performances du MFP dépendent très largement des connaissances environnementales disponibles, le résultat de localisation pouvant être extrêmement précis dans un cas favorable ou complètement aléatoire dans un cas défavorable. La prédiction de ces performances n'est pas un problème simple si l'on souhaite éviter de recourir aux simulations de Monte-Carlo souvent très lourdes en charge de calcul. L'estimation souffre d'ambiguïtés importantes pouvant entraîner à faible RSB des erreurs non-locales qui ne sont pas prises en compte par l'outil habituel de mesure des performances que constitue la borne de Cramer-Rao. En outre, le problème de l'incertitude environnementale est une difficulté considérable du MFP et ne doit pas être négligé dans l'analyse des performances.

Dans le cadre de la thèse de Y. Le Gall [Le Gall, 2015], nous avons proposé des outils statistiques de traitement du signal permettant de prédire les performances du MFP. L'originalité du travail réalisé repose principalement sur la considération du modèle de signal source déterministe, le modèle stochastique ayant déjà fait l'objet d'études antérieures [Xu et al., 2011]. Nous proposons le calcul de la borne minimale d'estimation de Ziv-Zakai et de la méthode des erreurs d'intervalles (MEI), qui permettent toutes deux une bonne estimation des performances lorsque l'environnement est parfaitement connu [Le Gall et al., 2014]. En présence d'inadéquations environnementales, nous montrons que le MEI permet une bonne estimation des performances du MFP [Le Gall et al., 2016b].

Si l'estimation des performances est un sujet intéressant en soit, il est également important de se demander comment améliorer ces performances, notamment dans un milieu incertain. Nous avons ainsi proposé une approche bayésienne de localisation de sources par MFP adaptée aux milieux de propagation sous-marins incertains, et donc robuste aux erreurs de modélisation de l'environnement. L'incertitude sur le milieu de propagation est prise en compte en modélisant la fonction de transfert entre la source et les récepteurs comme un vecteur aléatoire, dont la densité de probabilité est modélisée grâce à des hypothèses physiques sur la propagation modale. On s'appuie notamment sur l'idée que le champ acoustique peut être décomposé en groupes de modes proches subissant le même type de propagation. Au sein d'un groupe

de mode, on s'appuie sur le principe de l'invariant océanique généralisé (e.g. [Kuz'kin et al., 2011]) pour approximer une perturbation environnementale par une perturbation de fréquence. Bien que ces hypothèses soient approximatives, elles saisissent suffisamment bien les phénomènes de propagation pour permettre la localisation robuste de sources en environnement océanique incertain [Le Gall et al., 2016a], tel qu'illustré sur la figure 3.14. Le développement de cette méthode a fait l'objet d'une collaboration soutenue avec le Professeur S. Dosso de l'Université de Victoria (BC, Canada), où Y. Le Gall a effectué un séjour de recherche de 6 mois dans le cadre de sa thèse.

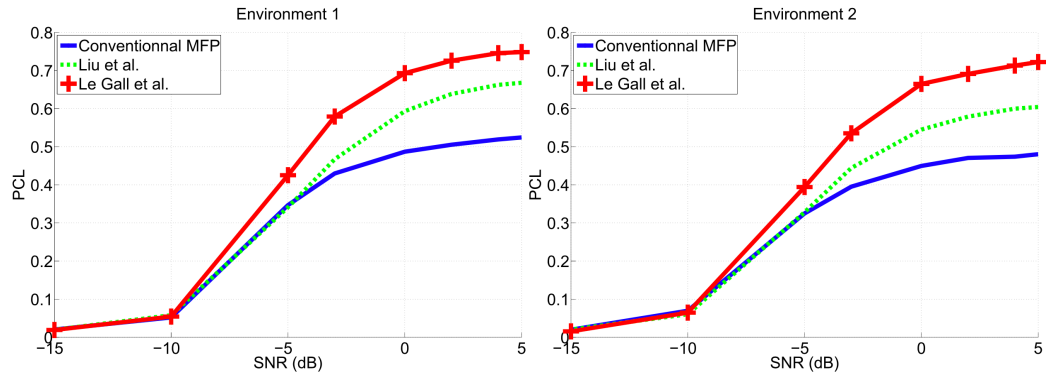


FIGURE 3.14 – Analyse des performances de la localisation en environnement incertain pour deux scénarios de complexité croissante. Les résultats, obtenus à l'aide de simulations de Monte-Carlo (5000 itérations), sont donnés en terme de probabilité de bonne localisation (PCL) pour l'estimateur du maximum *a posteriori*. La méthode proposée est représentée en lignes rouges et comparée au MFP basique (lignes continues bleues), et à la méthode modale de [Liu et al., 2013] (lignes pointillées vertes). Figure extraite de [Le Gall et al., 2016a].

3.5.2 Discrimination en immersion

Comme cela a été expliqué dans la section 3.2.3, le MMP est une alternative au MFP. Dans notre contexte UBF, travailler dans l'espace des modes permet de réduire l'influence d'une mauvaise connaissance de l'environnement, mais nécessite une étape préalable de filtrage modal pour estimer les amplitudes modales complexes à partir des pressions mesurées. Pour une source continue, cette étape est souvent problématique, car elle nécessite une antenne de grande ouverture, souvent irréalisable en pratique. Confronté à une ouverture réduite, il peut donc être intéressant de traiter un problème plus simple : la discrimination en immersion, vue comme un problème de classification binaire

(i.e. de détection). Il ne s'agit plus alors de localiser la source avec précision, mais simplement de déterminer si cette dernière est en surface, ou immergée. Ce problème, peu traité dans la littérature, a été plusieurs fois abordé par Premus, qui propose notamment de le résoudre au moyen de méthodes en sous-espaces (e.g. [Premus and Helfrick, 2013]) basées sur le concept de modes libres et piégés (voir la section 3.2.2 pour un rappel de la physique). Ces différentes méthodes semblent toutefois difficiles à mettre en pratique dans la mesure où aucune stratégie n'est proposée pour le choix *a priori* d'un seuil de discrimination. Ce problème est toutefois d'importance capitale en lutte sous-marine, car les systèmes actuels utilisés en passif (HLA tracté) ne permettent pas de faire la différence entre un navire et un sous-marin.

Dans le cadre de la thèse d'E. Conan, nous reprenons et adaptons les idées de Premus. Nous proposons de tester deux hypothèses explicitement basées sur une profondeur de discrimination choisie par l'utilisateur. Ce lien direct entre les hypothèses de classification et le modèle physique permet de prédire les performances avec des méthodes de Monte-Carlo, et ainsi de définir un seuil de décision approprié [Conan et al., 2016]. La méthode que nous proposons est notablement plus robuste aux incertitudes environnementales que les méthodes de la littérature. Nous l'avons validée sur des données expérimentales marines issues de la campagne Shallow Water 2006. En utilisant un HLA de 25 hydrophones et d'ouverture 360 m, notre méthode permet de faire la différence entre le bruit rayonné par un navire et une source sous-marine tractée. Ces résultats sont illustrés sur la figure 3.15. Sur la figure 3.15a, la métrique de discrimination est toujours supérieure au seuil de décision : la source profonde tractée est toujours classifiée comme une source immergée. Sur la figure 3.15b, la métrique de discrimination est (presque) toujours inférieure au seuil de décision : le bruit rayonné par le navire est (presque) toujours classifié comme une source de surface.

La limitation principale de cette méthode de discrimination est qu'elle requiert que le modèle (3.19) soit valide. En d'autres termes, la source et l'antenne doivent être alignées. Pour contourner ce problème, je propose également des méthodes applicables en sortie de formation de voie. Pour cela, j'ai proposé d'utiliser l'invariant océanique. En effet, ce dernier dépend de la profondeur de la source [Bonnell, 2010] et peut être estimé en sortie de formation de voie [Yang, 2003]. Si les variations de l'invariant océanique sont relativement bien connues en milieu petit fond [Rouseff and Spindel, 2002], elles ne sont que peu étudiées en grand fond. Dans le cadre de la thèse de R. Emmetière, nous étudions la distribution de l'invariant océanique en grand fond, avec pour objectif de l'utiliser pour discriminer les sources en immersion. La figure 3.16 illustre cette distribution en fonction de la profondeur de la source pour un environnement de type grand fond. Nos

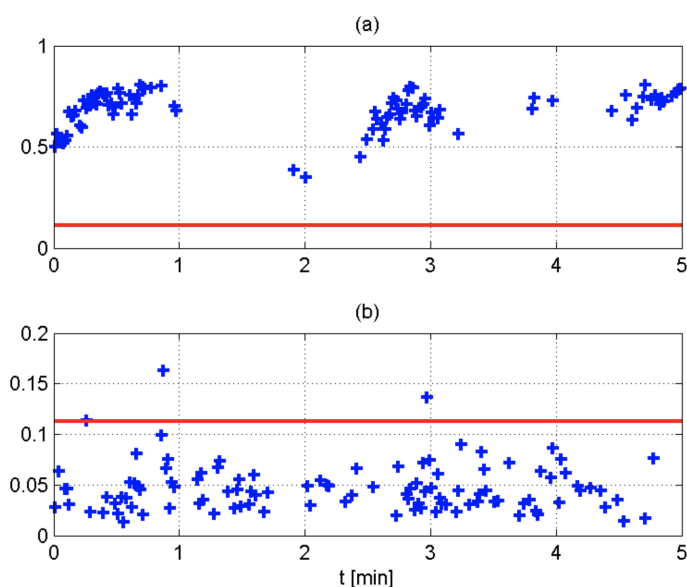


FIGURE 3.15 – Valeur de la métrique de discrimination calculée sur les données SW06 (croix bleue) et seuil de décision (ligne rouge). a) Source immergée ($f=253$ Hz) et b) source de surface ($f=360$ Hz). Figure extraite d'un article écrit par E. Conan (soumis pour publication dans J. Acoust. Soc Am.).

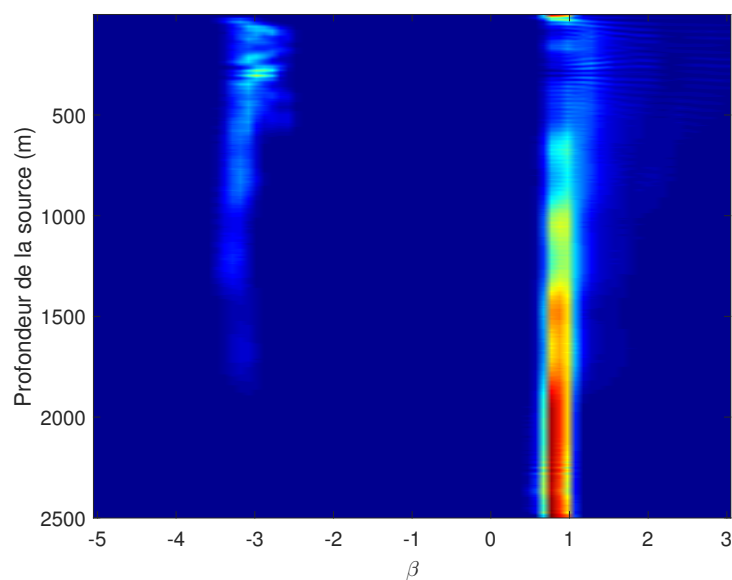


FIGURE 3.16 – Distribution de l'invariant océanique en fonction de la profondeur de la source dans un environnement grand fond typique. Figure tirée de [Emmetiere, 2016].

travaux actuels focalisent sur la variabilité de cette distribution en fonction de la distance source/antenne. Nous utilisons également le concept de groupes de modes présenté dans la section 3.2.2 pour revisiter la formation de voie en contexte modal. Des résultats préliminaires montrent qu’une source de surface n’excite pas les mêmes groupes de modes qu’une source immergée, et que cela influe notablement sur le signal reçu en sortie de formation de voie [Emmetiere et al., 2017]. Notons que ces travaux sont réalisés dans le cadre d’une thèse CIFRE Défense financée par Thales Underwater Systems et par la DGA. S’ils ont un intérêt académique certain, un objectif annexe (mais important) est de transférer nos compétences vers l’industrie.

3.6 Conclusion et perspectives

3.6.1 Conclusion

Cette section a présenté mes travaux sur les traitements adaptés à la propagation UBF. Mes recherches s’articulent autour d’une synergie entre physique des ondes et traitement du signal, qui permet de lever des verrous dans divers contextes opérationnels, allant de l’écoute mono-capteur à l’utilisation d’antennes linéaires, qu’elles soient verticales ou horizontales. Les applications concernées incluent la localisation de sources et la caractérisation environnementale. Le fil rouge de mes recherches est d’injecter dans les traitements des *a priori* physiques adaptés. Ces *a priori* doivent être souples pour ne pas détériorer les traitements, tout en étant suffisamment robustes pour fonctionner sur des données réelles marines.

Dans ce contexte, mon travail s’étend du développement méthodologique jusqu’à l’application sur données réelles. Cette application sur données réelles est particulièrement importante en acoustique sous-marine, où les méthodes doivent être robustes à un canal de propagation complexe, méconnu et fluctuant. L’analyse de données marines, et la découverte de nouveaux signaux ou phénomènes inexpliqués, permettent également de susciter de nouveaux développements méthodologiques. Il est d’ailleurs intéressant de remarquer que la maturité des méthodes que je propose dépend largement de la disponibilité des signaux expérimentaux. Les méthodes d’interception de signaux transitoires basées sur le warping ont profité de diverses bases de données de vocalises de mammifères marins et sont aujourd’hui matures. Les méthodes de discrimination en immersion, très orientées ”lutte sous-marine”, vont nécessiter des jeux de données réelles non-protégées pour monter en maturité.

Plutôt que de résumer les contributions présentées dans le corps de ce chapitre, je souhaite ici insister sur l’impact de mes travaux dans la com-

munauté acoustique sous-marine. Le filtrage modal avec un unique capteur est devenu un traitement de référence en océanographie acoustique. De nombreux chercheurs utilisent le warping basé sur le modèle du guide parfait, que ce soit pour localiser des sources ou estimer les propriétés environnementales (e.g. [Zeng et al., 2013, Petrov, 2014, Feng-Hua et al., 2014, Ballard et al., 2014, Qi et al., 2014, Warner et al., 2016, Duan et al., 2016]). De récents travaux s'intéressent également à de nouveaux opérateurs de warping adaptés au contexte modal, tel que l'opérateur basé sur l'invariant océanique [Qi et al., 2015] ou sur d'autres modèles plus compliqués [Niu et al., 2014]. Egalement, les capacités de filtrage modal offertes par le warping sont aujourd'hui prises en compte dans la planification et la réalisation d'expérimentations d'envergures en océanographie acoustique, telle que la Seabed Characterization Experiment (SBCEX)⁵ à laquelle je participe.

3.6.2 Perspectives

SBCEX est probablement la plus grosse expérimentation d'océanographie acoustique de la décennie. Financée par l'Office of Naval Research (ONR, USA), elle réunit trois navires océanographiques américains (RV Neil Armstrong, RV Endeavor, RV Sharp) pendant six semaines au niveau du "Mud Patch" de la Nouvelle Angleterre, situé à environ 110 km au Sud des côtes de Cape Cod (Massachusetts, USA). Les plus grands instituts de recherche Nord Américain en acoustique sous-marine sont impliqués : WHOI (Woods Hole Oceanographic Institute), SIO (Scripps Institution of Oceanography), ARL (Applied Research Laboratory), APL (Applied Physical Laboratory) ... Trois institutions européennes y participent également : le CMRE (Centre for Maritime Research and Experimentation), FFI (Norwegian Defence Research Establishment) et l'ENSTA Bretagne. Les questions posées et les données acoustiques collectées vont structurer les recherches de la communauté pour les années à venir. C'est dans cette dynamique que j'inscris mes perspectives de recherche, et c'est dans ce contexte que je me prépare à quitter l'ENSTA Bretagne pour une mobilité longue, et pour un poste d'Associate Scientist à Woods Hole Institute of Oceanography (USA) qui débutera en septembre 2017.

Scientifiquement parlant, je ne vais pas radicalement changer mon axe de recherche autour des traitements modaux et de leurs applications. Toutes les études présentées dans ce chapitre ont des perspectives intéressantes, identifiées, que je souhaite évidemment poursuivre. Les études en cours sur la discrimination en immersion à partir d'une antenne horizontale posent un

5. <https://wwwext.arlut.utexas.edu/sbcex/>

faisceau de questions en acoustique et en traitement du signal. Il est important de les poursuivre, tant d'un point de vue scientifique que stratégique. Les deux thèses en cours traitent le problème de deux manières différentes : l'une utilise l'invariant océanique en sortie de formation de voie (R. Emmetière), alors que la seconde propose une utilisation des sorties de filtres modaux, dans un contexte où l'on sait que ces filtres sont peu efficaces (E. Conan). Le point commun de ces deux thèses est donc de considérer des groupes de modes, plutôt que d'essayer de filtrer individuellement chaque mode. Une perspective naturelle est donc de travailler sur le filtrage modal pour le rendre efficace dans notre contexte d'antenne horizontale. Pour cela, on pourra utiliser l'ouverture synthétique fournie par le mouvement source/récepteur, et/ou des méthodes d'estimation avancées, notamment basées sur la parcimonie du spectre modal. L'individualisation des modes à partir du signal reçu permettra d'effectuer la discrimination en immersion à partir de méthodes dérivées du MMP, et/ou d'exploiter des phénomènes physiques tels que la scintillation modale [Premus, 1999]. À terme, les diverses pistes explorées pourront converger en une méthode générale de discrimination en immersion, ou produire un faisceau de méthodes ayant chacune un domaine de validité précis dans lequel les performances seront connues.

Je souhaite également relancer mes travaux en inversion géoacoustique et leurs donner une dimension nouvelle. Jusqu'à présent, j'ai considéré l'inversion géoacoustique comme un domaine applicatif des traitements modaux que je propose. Je souhaite aujourd'hui utiliser ces méthodes pour apporter des réponses sur les propriétés des sédiments et leurs impacts sur la propagation. À court terme, je souhaite m'intéresser à l'impact des fluctuations de l'environnement (colonne d'eau et/ou plancher océanique) sur les résultats de l'inversion géoacoustique. Que se passe-t-il en cas de fluctuations environnementales ignorées ? Peut-on et/ou doit-on estimer ces fluctuations ? Cela est-il possible d'un point de vue déterministe, ou faut-il employer des modèles stochastiques ? D'intéressantes questions se posent également autour de la cohérence des différentes méthodes d'inversion utilisées. Habituellement, chaque groupe de chercheurs promeut une méthode particulière (configuration expérimentale et traitements associés). Comme cela a été fait par le passé [Tolstoy et al., 1998], il serait probablement opportun de mettre en place une méta-étude des méthodes disponibles, ainsi que de réfléchir à la mise en place d'un benchmark expérimental de ces méthodes.

Ma recherche sur les UBF requiert une synergie entre les méthodes de traitements acoustiques, les modèles numériques de propagation, ainsi que les méthodes d'inversion. Simuler la propagation acoustique dans un environnement acoustique 3D et/ou fluctuant est un challenge en soit. La résolution d'un problème inverse coûteux et l'estimation de l'incertitude des résultats ob-

tenus est également un sujet de recherche nécessitant des experts du domaine. Il est donc indispensable que je mène une activité de recherche collaborative. Je vais notamment poursuivre mes travaux avec R. Chapman et S. Dosso de l'Université de Victoria, respectivement spécialistes en acoustique des sédiments et en résolution des problèmes inverses. Je vais également nouer de nouvelles collaborations à WHOI. L'objectif ici est de me rapprocher d'experts en propagation acoustique (Y.T Lin, T. Duda), tant du point de vue des modèles numériques que des expérimentations à la mer.

Chapitre 4

Océanographie acoustique

Under the heavy sea
I'll search the flight of whales

J. Duplantier

4.1 Introduction

Contexte

Les environnements marins recouvrent 70% de la surface terrestre et sont au coeur des systèmes vitaux pour l'humanité tels que la régulation du climat, le stockage du carbone et la production d'oxygène. Ils représentent une source d'énergies variées (énergies fossiles, énergies marines renouvelables, etc) ainsi que de protéines animales et de nombreuses molécules d'enjeux commerciaux ou médicaux. Ils sont également le siège de nombreuses activités humaines : pêche, trafic maritime, prospection pétrolière, énergies marines renouvelables... activités en perpétuelle augmentation. A l'aube de ce que certains appellent l'Anthropocène, il nous faut comprendre les changements actuels affectant les océans (changement climatique, évaluation du niveau de la mer, augmentation des pressions anthropiques ...), évaluer leur impact, et transférer cette connaissance vers le grand public, vers les politiques et les gestionnaires du milieu marin. Cependant, l'observation des océans reste un défi majeur. La pression considérable, le manque de lumière, les propriétés corrosives de l'eau salée, l'impossibilité d'utiliser des moyens de communication classiques et l'immensité des océans en font un milieu hostile et difficile d'accès.

Un phénomène principal conditionne toutes les études océanographiques : l'impossibilité pour une onde électromagnétique de se propager dans l'eau sur de grandes distances. Toute technologie de communication, d'exploration, et de surveillance utilisée sur terre, dans l'air ou dans l'espace est donc inapplicable en milieu marin. L'utilisation des ondes acoustiques comme vecteur d'information est alors une alternative intéressante aux ondes électromagnétiques. Ce sont ainsi récemment développées des méthodes d'océanographie acoustique, et je focaliserai ici l'étude sur l'acoustique passive. Historiquement, le monitoring par acoustique passive a été développé pour des applications de défense, où la discrétion est requise. Aujourd'hui, en réponse aux besoins modernes de l'observation marine, le monitoring par acoustique passive trouve un nouveau champ d'application bien plus large.

Le paysage acoustique sous-marin (i.e. les sons naturellement présents sous l'eau) peut être divisé en trois compartiments : la géophonie (les sons produits par des phénomènes géophysiques tels que la pluie, les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, les icebergs ...), la biophonie (les sons produits par tous les organismes marins, des crevettes aux mammifères marins), et l'anthropophonie (les sons produits par l'activité humaine tels que les sonar, l'exploration sismique, le trafic maritime ...). Le monitoring par acoustique passive (PAM) consiste à enregistrer ces paysages acoustiques, puis à analyser les données pour inférer de l'information sur les sources et/ou

l'environnement de propagation, et donc sur les phénomènes océanographiques mis en jeu. Le PAM est ainsi une alternative complémentaire et prometteuse à l'océanographie classique : la donnée acoustique passive est respectueuse de l'environnement (aucune émission sonore), discrète, haute-fréquence, et relativement peu couteuse. En revanche, elle intègre toute l'activité sonore environnante. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes de traitements adaptés pour extraire une information environnementale pertinente du chorus océanique.

Objectifs

Le PAM requiert un large panel de compétences allant du traitement de l'information aux sciences de la mer. En effet, le PAM exige :

1. le développement de méthodes de traitements adaptés aux signaux acoustiques ;
2. la traduction des propriétés acoustiques en terme de connaissance environnementale ;
3. l'utilisation de cette connaissance environnementale pour répondre aux enjeux scientifiques, économiques et stratégiques du milieu marin.

Dans mes travaux, je m'attache à traiter le second point. Ainsi, il s'agit d'effectuer un pont entre l'état de l'art de traitement du signal (point 1) et les verrous actuels en sciences de la mer (point 3). Dans ce contexte, mes travaux s'articulent autour de deux grandes thématiques : la bioacoustique et l'océanographie physique.

En bioacoustique, il s'agit d'utiliser des traitements aux performances maîtrisées (notamment de détection et de localisation) pour assurer l'utilisation quantitative des métriques acoustiques, et ainsi solidifier l'interprétation biologique qui en est faite.

En océanographie physique, je propose d'utiliser l'acoustique passive dans des contextes novateurs, en complément d'une mesure océanographique classique, notamment lorsque celle-ci se révèle inefficace (i.e. la télédétection satellitaire fonctionne mal aux latitudes polaires). Il s'agit ici d'effectuer des liens nouveaux entre le paysage acoustique et les phénomènes océanographiques sous-jacents, mais également d'embarquer des capteurs acoustiques sur des plateformes innovantes, pour compléter les réseaux d'observation existants.

Méthodes

Ma méthode d'étude pour le PAM est résumée sur la figure 4.1. Pour cette thématique, la donnée marine est évidemment le point d'entrée. Il faut

traiter ces données, et si besoin prendre en compte la propagation acoustique sous-jacente. Il s'agit ensuite de résoudre un problème inverse, que ce soit pour obtenir de l'information sur la source (e.g. analyse spectrale, localisation) ou sur le canal de propagation (e.g. tomographie). Dans bien des cas, la source et le canal sont tous deux inconnus. Il faut alors étudier les deux en parallèles. Une fois mis en forme, notamment grâce à des méthodes statistiques, les informations obtenues sont transférées vers une communauté utilisatrice. La discussion avec ces utilisateurs, leurs besoins et le retour d'expérience suscitent de nouvelles idées, et permettent de modifier/améliorer la collecte de données acoustiques.

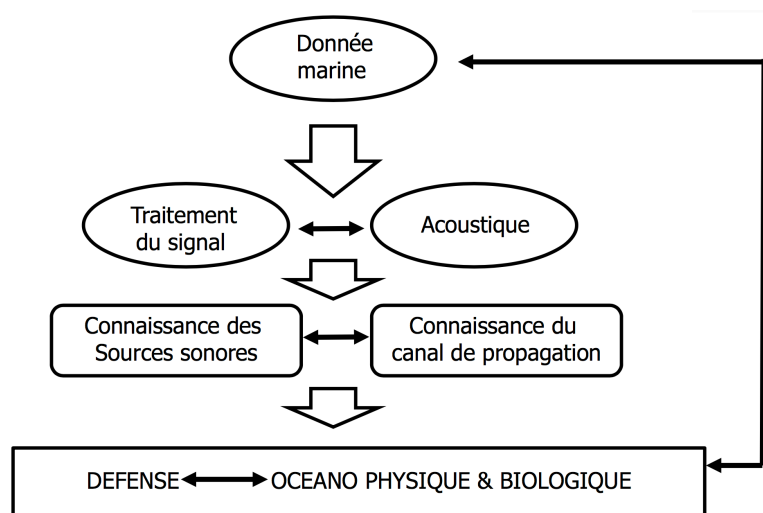


FIGURE 4.1 – Méthode de recherche en océanographie acoustique passive

Encadrements, collaborations et projets

Le PAM est par nature interdisciplinaire. Ma recherche est donc alimentée par un réseau de collaborations avec des spécialistes des sciences de la mer. Mes collaborateurs principaux sont C. Guinet (CEBC : Centre d'Etudes Biologiques de Chizé), J.Y Royer (Laboratoire Géosciences Océan, Brest), F. Samaran (ENSTA Bretagne) et A. Thode (Scripps Institution of Oceanography, San Diego, USA). Ma recherche s'appuie sur un faisceau de projets et bénéficie de la contribution d'étudiants que j'encadre ou co-encadre. Contrairement au chapitre précédent, ma contribution principale ici est essentiellement orientée sur la proposition, la gestion et l'encadrement scientifique de projets, plutôt que sur un travail technique personnel.

Pour mener à bien ce genre d'activité interdisciplinaire, la montée en compétence d'un groupe de travail est primordiale. Pour moi, cela passe notamment par la formation d'étudiants (stagiaires, doctorants, post-doctorants). Toutefois, les sujets traités, sont souvent très exploratoires, et donc relativement risqués. Il n'est pas raisonnable de faire porter ce risque sur un doctorant ou sur un stagiaire de M2R, pour qui l'obtention du diplôme est jugée au résultat. Pour alléger ce risque, ma recherche s'appuie également sur des stagiaires de M1 et/ou des élèves de grandes écoles (d'ingénieur ou d'agronomie) en année de césure. Nous essayons autant que possible de leur proposer des sujets cohérents, avec un premier stage à l'ENSTA Bretagne (pour apprendre les bases du PAM) et un second dans un laboratoire de sciences de la mer (pour répondre aux questions environnementales). Ce modèle a été appliqué plusieurs fois avec succès, notamment pour les collaborations avec le CEBC et Scripps.

Concrètement, les travaux présentés dans ce chapitre sont articulés de la manière suivante. L'étude des mysticètes en Arctique est une collaboration suivie avec A. Thode (Scripps). Elle est notamment financée par une agence américaine, la North Pacific Research Board (NPRB¹), à travers deux projets consécutifs. La thématique a profité des contributions de :

- C. Arisdakessian, élève ingénieur en année de césure ayant effectué un stage à l'ENSTA Bretagne suivi d'un stage à Scripps ;
- A. Komaty, post-doctorant à l'ENSTA Bretagne, financé par le NPRB ;
- M. Thieury, élève M2R ayant effectué son stage à l'ENSTA Bretagne.

L'étude des baleines bleues dans l'Océan Indien est réalisée en collaboration avec J.Y Royer (Laboratoire Géosciences Océan, Brest), F. Samaran (ENSTA Bretagne) et FX Socheleau (IMT Atlantique, Brest). La thématique a profité des contributions de trois stages de M2R consécutifs (B. Ollivier, R. Emmetière, M. Meillour) que j'ai encadrés. Ces stages ont permis de préparer -puis compléter- la thèse d'E. Leroy que je co-encadre actuellement avec J.Y Royer (bourse Brest Métropole et région Bretagne). Dans le cadre de sa thèse, E. Leroy a effectué un séjour de recherche de 3 mois à l'Alfred Wegener Institute (Bremerhaven, Allemagne), ainsi que deux missions d'un mois sur le Marion Dufresne, navire océanographique français utilisé pour déployer le réseau d'observation acoustique.

Les travaux sur l'observation innovante de l'océan Austral et l'étude des éléphants de mer est une collaboration avec C. Guinet (CEBC). Elle a bénéficié des contributions de deux élèves ingénieurs agronomes (G. Labadie, L. Day) ayant effectués des stages/césures à l'ENSTA Bretagne puis au CEBC. Ces travaux, aujourd'hui financés par la DGA, sont largement réalisés et pilotés

1. <http://www.nprb.org>

par D. Cazau, post-doctorant à l'ENSTA Bretagne.

L'observation acoustique en mer d'Iroise est une thématique historique à l'ENSTA Bretagne, initiée par C. Gervaise en collaboration avec le SHOM. J'ai repris ces travaux en 2011 lorsque C. Gervaise a quitté l'ENSTA Bretagne. J'ai notamment contribué à la proposition et la réalisation d'un projet ANR avec le GIPSA-Lab (J. Mars) et le LEMAR (L. Chauvaux). A l'ENSTA Bretagne, les travaux correspondants ont été réalisés par B. Kinda, post-doctorant. Aujourd'hui, nous donnons un nouvel élan à cette thématique, en combinant l'observation par acoustique passive et l'observation satellitaire. Cela se fait en collaboration avec R. Fablet (IMT Atlantique), avec qui je co-dirige la thèse de M. Meillour, démarrée en octobre dernier grâce à une bourse DGA/MRIS.

La suite de ce chapitre détaille les travaux su-cités. La section 4.2 présente mes travaux autour de la bioacoustique des mysticètes. Deux grands axes sont détaillés : l'utilisation de méthodes innovantes pour localiser et discriminer diverses espèces présentes en Arctique (baleines boréales, baleines à bosse, baleines franches), puis une étude de baleines bleues Antarctique à l'échelle du bassin océanique sud-indien. Dans un second temps, la section 4.3 présente mes travaux autour du monitoring acoustique de phénomènes physiques. J'y détaille une étude sur le biologging² des éléphants de mer austraux, permettant notamment d'estimer la vitesse du vent par acoustique. J'y présente également des travaux sur le monitoring acoustique de la mer d'Iroise, avec une estimation du marnage par acoustique passive et des perspectives autour du suivi du front d'Ouessant. Enfin, la section 4.4 conclue ce chapitre et insiste sur les perspectives envisagées.

Avant de continuer, notons que la vision présentée ici reflète ma compréhension de problématiques traitées au sein de groupes de travail pluridisciplinaires. Il est donc possible que ce chapitre contienne quelques maladresses ou inexactitudes, notamment sur le vocabulaire utilisé en biologie ou en océanographie.

4.2 Bioacoustique des mysticètes

Dans cette section, je présente mes travaux autour de la bioacoustique des mysticètes (baleines à fanons). Ces animaux sont vocalement actifs, et produisent notamment des signaux transitoires Ultra Basse Fréquence (UBF, fréquence inférieure à quelques centaines de Hertz). Dans la suite, je distingue une étude sur les baleines boréales et les baleines franches en Arctique d'une étude sur les baleines bleues Antarctique de l'océan Indien. Outre les

2. Biologger : capteur miniaturisé et embarqué sur un animal sauvage.

différences biologiques/écologiques évidentes, ces deux études diffèrent par leurs objectifs, par les échelles spatio-temporelles considérées, ainsi que par la propagation subie par les vocalises.

L'étude Arctique focalise sur diverses zones côtières de quelques centaines de km². L'objectif est ici de démontrer la viabilité de nouvelles méthodes de monitoring bioaoustique. On s'intéresse notamment à la localisation des animaux à partir d'un unique capteur dans un environnement petit fond. Vu le contexte (signaux transitoires UBF, étude mono-capteur en milieu petit fond), on utilisera évidemment les méthodes présentées dans le chapitre précédent.

L'étude dans l'océan Indien propose un suivi pluri-annuelle des populations. Pour cela, on utilise un réseau d'hydrophones répartis à l'échelle du bassin océanique. L'environnement considéré est de type grand fond, les méthodes mono-capteurs proposées au chapitre précédent ne peuvent donc pas être appliquées. Vu le contexte (large réseau de quelques capteurs, étude pluriannuelle), on utilisera plutôt des méthodes de détection automatique pour répondre à la problématique.

4.2.1 Baleines boréales et baleines franches en Arctique

Dans cette section, je présente l'application de méthodes mono-capteurs pour la localisation de mysticètes en environnement petit fond. Tous ces travaux ont été réalisés en collaboration avec A. Thode (Scripps, San Diego, USA).

Estimation de distance et baleines boréales

Tous les automnes, entre fin août et mi octobre, les baleines boréales (*Balaena mysticetus*) migrent vers l'ouest de la mer de Beaufort à travers le plateau continental, le long de la côte nord de l'Alaska [Moore and Reeves, 1993]. De nombreuses études [Clark and Ellison, 2000] ont utilisé le PAM pour suivre ces migrations. Tous les ans depuis 2007, Greeneridge Sciences, Inc. a déployé un réseau d'hydrophones directifs DASAR (Directional Autonomous Seafloor Acoustic Recorders), dans les eaux côtières de l'Alaska, proche de Kaktovik [Greene Jr et al., 2004]. Les DASAR permettent la détection et la localisation de milliers de vocalises de baleines boréales chaque année [Thode et al., 2012]. En 2010, le réseau de DASAR a été complété avec une antenne verticale (Vertical Line Array, VLA) de 15 hydrophones. En utilisant les méthodes présentées dans le chapitre précédent (filtrage modal par warping puis localisation par rétro-propagation), j'ai démontré qu'un unique hydrophone du VLA permet d'estimer la distance entre l'antenne et la vocalise étudiée, avec une précision

similaire à celle obtenue par le réseau de DASAR [Bonnell et al., 2014]. L'estimation de la distance entre une vocalise de baleine et un unique hydrophone est un point crucial si l'on souhaite un jour utiliser les méthodes de PAM pour estimer la densité des populations [Marques et al., 2013].

La méthode mise en place nécessite une connaissance préalable de l'environnement, et notamment des propriétés géoacoustiques des sédiments. Comme ces dernières sont généralement inconnues, elles sont estimées à partir des vocalises, conjointement à la distance source/récepteur recherchée. Notons que dans notre étude, les paramètres géoacoustiques estimés n'ont pas de réel sens physique. Cependant, leur estimation permet de définir un modèle d'environnement acoustiquement équivalent à l'environnement expérimental. Ce modèle, potentiellement dénué de toute réalité physique, permet toutefois de localiser les sources.

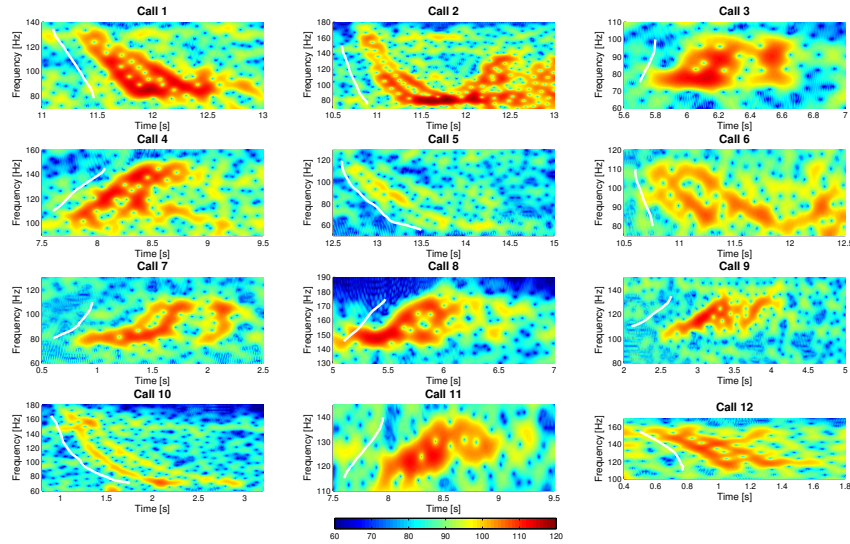


FIGURE 4.2 – Spectrogrammes des douze vocalises étudiées. Sur chaque sous-figure, la courbe blanche représente la fréquence instantannée de la source, telle qu'estimée après localisation. L'échelle des couleurs des spectrogrammes est en dB, avec une valeur de référence arbitraire. L'origine des temps de chaque vocalise est arbitraire. Figure extraite de [Bonnell et al., 2014].

La figure 4.2 présente les spectrogrammes des douze vocalises étudiées. On remarque qu'elles ont toutes des propriétés différentes (bande de fréquence, structure temps-fréquence, rapport signal à bruit). Les résultats de la localisation sont illustrés sur la figure 4.3. Sur cette figure, le point vert représente la position du VLA, et donc de l'unique hydrophone utilisé. Le cercle vert

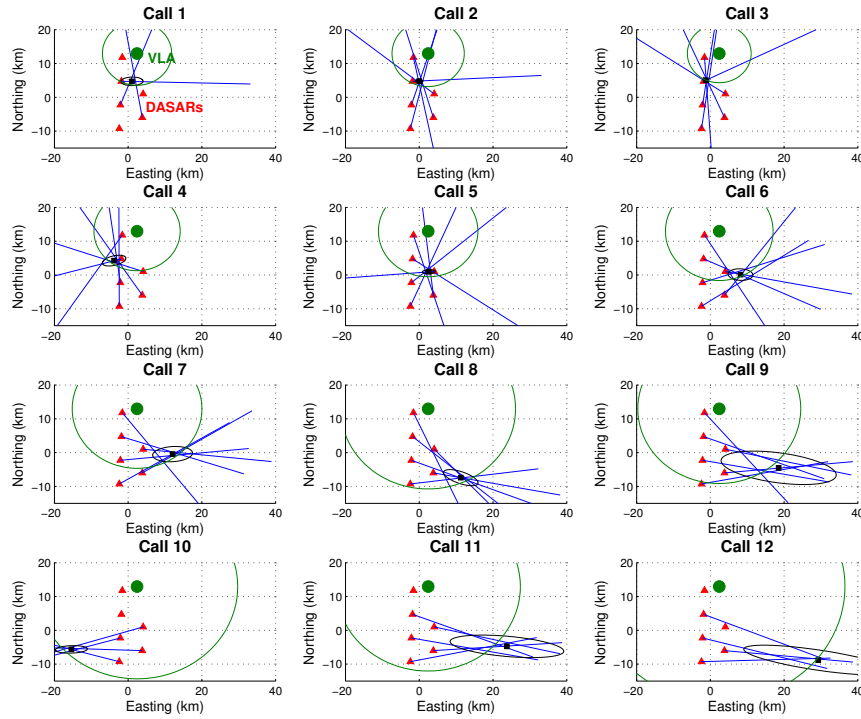


FIGURE 4.3 – Résultats de localisation pour les 12 vocalises. Le point vert représente la position de l’hydrophone utilisé, et le cercle vert entourant ce point est la distance estimée par notre méthode. Les triangles rouges donnent les positions des DASAR, et les lignes bleues qui en émanent les azimuts estimés par ces DASAR. La position estimée par le réseau de DASAR est indiqué par un carré noir, et l’ellipse noire correspondante donne l’intervalle de confiance à 90% de cette estimation. Figure extraite de [Bonnell et al., 2014].

représente la distance estimée avec cet unique hydrophone. Chaque triangle rouge représente un DASAR, et chaque ligne bleu l'azimut de la source tel qu'estimé par un DASAR. Le point noir, à l'intersection des azimuts, est la position de la source telle qu'estimée avec le réseau de DASAR, et l'incertitude de cette estimation est représentée par l'ellipse noire. Pour toutes les vocalises, la distance estimée avec un unique capteur est cohérente avec la position estimée par les DASAR, démontrant la pertinence de notre méthode d'estimation mono-capteur.

Estimation de profondeur et baleines franches

Un verrou majeur avec la plupart des systèmes PAM actuels est leur incapacité à estimer la profondeur des animaux acoustiquement actifs. On pourrait imaginer que connaître cette profondeur est moins important que connaître leur position 2D (latitude-longitude). Cependant, il existe au moins trois raisons pour lesquelles cette profondeur est un paramètre capital pour l'étude des mysticètes en eau peu profonde :

1. L'intensité apparente d'un signal basse fréquence enregistré par un hydrophone (le "Received Level", RL) dépend largement de la profondeur de la source et/ou de celle du récepteur. Deux sources d'intensité comparable mais placées à différentes profondeurs dans la colonne d'eau (e.g. proche de la surface et largement immergée) peuvent avoir des RL qui diffèrent de 6 à 10 dB, alors qu'elles sont séparées de moins de 50 m. A contrario, si ces deux sources sont à la même immersion, il faut parfois les écarter de 6 à 10 km pour obtenir des RL variants de 6 à 10 dB. En conclusion, il est capital de connaître la profondeur d'une source pour estimer son niveau d'émission ("Source Level", SL). Ces SL sont des paramètres critiques pour estimer les performances des systèmes PAM utilisés.
2. Comme expliqué précédemment, les RL dépendent largement de la profondeur. Il est notamment bien plus facile de réduire le RL en s'approchant de la surface qu'en fuyant dans une direction opposée à la source. En conséquence, il faut se donner les moyens d'estimer la profondeur des animaux si on souhaite étudier leur comportement en réponse à des pollutions sonores anthropiques.
3. La profondeur de vocalisation pourrait permettre de distinguer des espèces pour lesquelles ces vocalises sont difficiles à différencier autrement. A titre d'exemple, les "upcalls" de baleines franches du Pacifique nord (North Pacific Right Whale, NPRW), des baleines boréales et des baleines à bosse ont la même bande de fréquence, la même durée et la

même structure. Il est particulièrement compliqué de les différencier sans information contextuelle (e.g. géographie, saison), même pour un expert. S'il s'avère que ces espèces vocalisent à des profondeurs différentes, alors une estimation de la profondeur des cris pourrait permettre d'identifier l'espèce source.

La NPRW (*Eubalaena japonica*) est une espèce très largement menacée, dont la population ne dépasse probablement pas les quelques dizaines d'individus [Wade et al., 2006]. Lorsqu'on l'étudie avec du PAM, il est donc particulièrement crucial de ne rater la détection d'aucune de ses vocalises. Reconnaître les vocalises de baleines franches au milieu d'une myriades de vocalises de baleines à bosse et/ou boréales est un vrai défi, tant pour les algorithmes de classification que pour les experts [Wright, 2015]. Cependant, de sérieux indices laissent supposer que les profondeurs à laquelle ces vocalises sont émises pourraient être différentes. Une étude des baleines franches de l'Atlantique réalisée dans la baie de Fundy en instrumentant les animaux avec des biologgers montre que cette espèce vocalise à de faibles profondeurs, inférieure à 8 m [Parks et al., 2011]. Il n'existe que peu d'information sur la profondeur de vocalise des baleines boréales et à bosse. Toutefois, deux études suggèrent qu'elles vocalisent à de plus grandes profondeurs [Thode et al., 2007, Abadi et al., 2014]. Il est donc possible qu'une méthode permettant d'estimer la profondeur des vocalises puisse permettre d'identifier l'espèce source.

Dans ce contexte, nous avons réalisé avec A. Thode une étude préliminaire sur l'estimation de la profondeur des vocalises des NPRW. Nous avons appliqué les méthodes développées dans le chapitre précédent (filtrage modal par warping puis localisation par Matched Mode Processing) pour proposer une méthode d'estimation de la profondeur des vocalises [Bonnell and Thode, 2014b]. Nous avons ensuite utilisé cette méthode pour estimer la profondeur de deux types de vocalises de NPRW : les "gunshots" (signaux impulsifs) et les "upcalls" (signaux modulés en fréquence). Une étude de 32 vocalises montre que les profondeurs d'émissions des deux types de vocalises sont statistiquement différentes [Thode et al., 2017]. Une grande partie de l'analyse de ces vocalises, ainsi qu'une étude sur d'autres espèces ont été réalisées dans le cadre du stage de M2R de M. Thieury [Thieury, 2016]. La figure 4.4 illustre les profondeurs estimées des vocalises de NPRW étudiées.

Du traitement du signal à la biologie marine

Les résultats obtenus suggèrent qu'un grand nombre de jeux de données bioacoustiques existants enregistrés en milieu côtier et ciblant les mysticètes, contient de l'information sur la localisation des animaux, tant en terme de

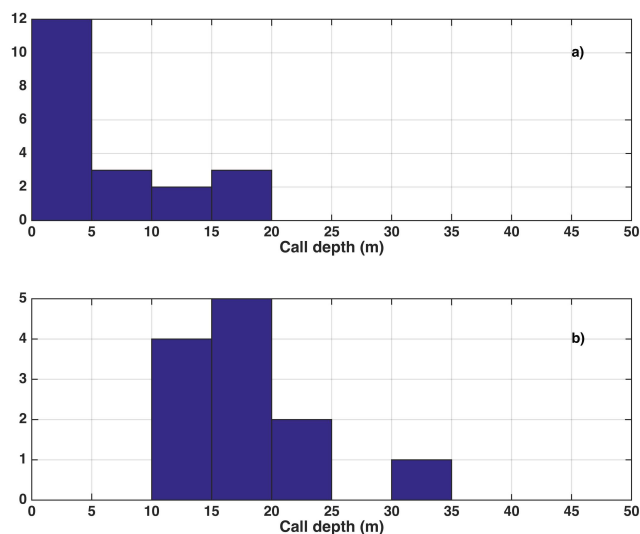


FIGURE 4.4 – Distribution de la profondeur des vocalises de NPRW : (a) gunshots et (b) upcalls. Figure extraite de [Thode et al., 2017].

distance que de profondeur. Cependant, un frein majeur à l'application massive des méthodes illustrées plus haut est qu'elles ne sont pas 100% automatiques, et requièrent l'intervention d'un expert. Le rôle de cet expert est particulièrement ardu, et nécessite des compétences poussées en bioacoustique (pour différencier les signaux émis par diverses espèces), en acoustique sous-marine (pour reconnaître les vocalises contenant de l'information modale permettant la localisation), et en traitement du signal (pour réaliser la localisation).

Pour lever ce verrou, A. Thode et moi travaillons étroitement avec des scientifiques de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration, USA). Nous nous efforçons de leur transférer nos méthodes. Cela a par exemple permis de localiser un rorqual commun Atlantique nord (*Balaenoptera physalus*) hors de l'aire de répartition connue de ces animaux [Crance et al., 2015]. Nous prévoyons également des projets futurs où nous formerons des biologistes de la NOAA à nos méthodes. Dans le cadre du stage de césure de C. Arisdakessian effectué à cheval entre l'ENSTA Bretagne et Scripps [Arisdakessian, 2014], nous avons notamment développé une interface graphique permettant une utilisation simplifiée de ces méthodes.

4.2.2 Baleines bleues Antarctique dans l’océan Indien

Dans cette section, je présente mes recherches autour de l’étude bioacoustique des baleines bleues Antarctique (*Balaenoptera musculus intermedia*) dans l’océan Indien. Tous ces travaux ont été réalisés en collaboration avec J.Y. Royer (Géosciences Océan, Brest) et F. Samaran (Université de la Rochelle, puis ENSTA Bretagne).

La baleine bleue Antarctique (Antarctic Blue Whale, ABW) a été largement décimée durant la chasse baleinière au 20^{ème} siècle. On estime que dans les années 1970, il ne restait que 0.15% de la population initiale [Branch et al., 2004]. Les informations sur la population actuelle et sa distribution sont très limitées. Nos connaissances proviennent essentiellement des données de chasse [Mackintosh, 1966], et de quelques campagnes d’observations visuelles de grandes envergures [Branch, 2007]. On estime aujourd’hui (e.g. [Branch et al., 2007]) que l’ABW passe l’été austral autour de l’Antarctique, se nourrissant dans ces eaux riches en krill. Une grande partie de la population quitte les eaux antarctiques durant l’hiver, et migre au nord vers des zones plus tempérées. Un récent suivi PAM au sud de l’océan Indien étudie la présence des ABW sur cette zone, et démontre que leur habitat est plus large que ce qu’on pensait précédemment [Samaran et al., 2013].

Le PAM est en effet parfaitement adapté pour étudier l’ABW. Ces animaux émettent des vocalises basses-fréquences, stéréotypées et répétitives. De par leur forme en Z dans le plan temps-fréquence (voir figure 4.5), ces vocalises sont appelées ”Z-calls”. Elles sont constituées de trois parties : une ”unité A” monochromatique de fréquence $\simeq 28$ Hz durant 7 à 12 sec, une ”unité B” quasi-monochromatique de fréquence $\simeq 18$ Hz durant 7 à 12 sec, et entre les deux une modulation de fréquence allant de 28 à 18 Hz en 1 à 2 sec. La période entre 2 Z-calls, appelée ICI (Inter Call Interval) est de l’ordre de la minute. Ces vocalises peuvent être émises en séquence de plusieurs heures. Dans la suite, on utilisera ces Z-calls comme un indice de la présence des ABW. On pourra d’ores et déjà remarquer sur la figure 4.5 que le bruit ambiant dans la bande de fréquence des Z-calls est plus puissant que le bruit ambiant hors de cette bande. Cela est dû à un brouhaha de Z-calls lointains non-identifiables. On appellera ce phénomène le ”chorus”³.

Base de données

Les données étudiées ici proviennent du réseau OHASISBIO, déployé et maintenu par J.Y. Royer [Royer et al., 2015]. Ce réseau comprend cinq sites

3. Le chorus contient également des vocalises de rorqual commun, qui partagent la même bande de fréquence.

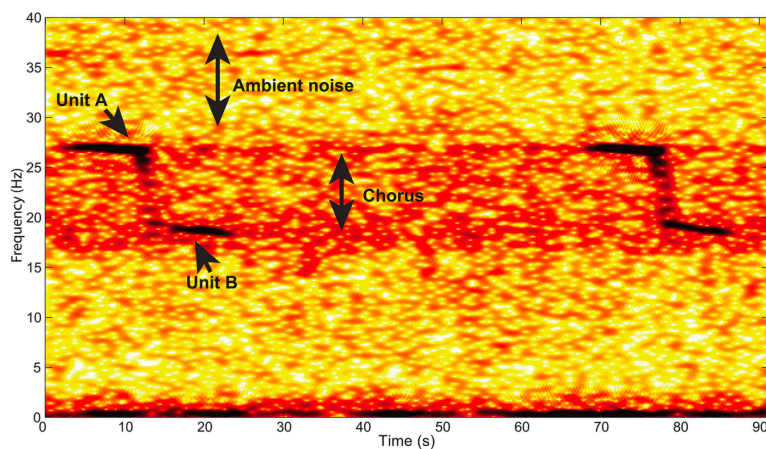


FIGURE 4.5 – Spectrogramme de deux Z-calls consécutifs. Figure extraite de [Leroy et al., 2016].

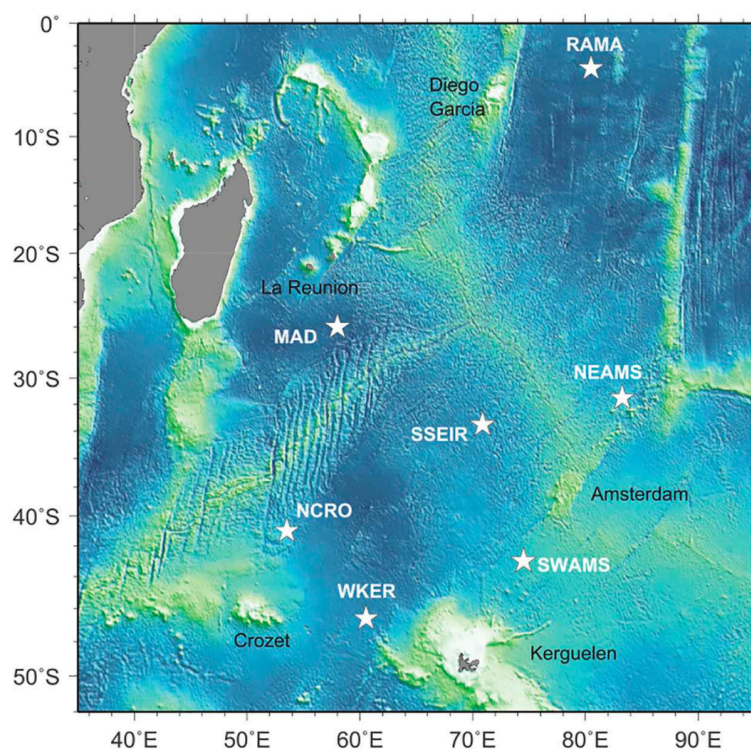


FIGURE 4.6 – Carte du réseau OHASISBIO. Figure extraite de [Leroy et al., 2016].

pérennes (MAD, NEAMS, SWAMS, NCRO, WKER) déployés à l'échelle du bassin océanique sud-indien depuis 2009. Deux nouveaux sites ont été ajoutés récemment (SSEIR et RAMA). La géométrie du réseau est présentée sur la figure 4.6. Un site est constitué d'un enregistreur acoustique autonome, avec une fréquence d'échantillonnage de 240 Hz, une autonomie annuelle, et un unique hydrophone positionné dans le SOFAR (sound fixing and ranging channel, à une profondeur allant de 500 à 1500 m). Notons que depuis 2010, un des sites est équipé par un triplet d'enregistreurs (plutôt qu'un unique instrument). Ce site varie d'une année à l'autre.

Les enregistreurs autonomes sont récupérés et re-déployés chaque année par le navire océanographique français Marion Dufresne. J'ai moi même participé à une de ces rotations (mission en mer d'environ 1 mois). Il existe malheureusement quelques trous dans la série d'observation, dus principalement à des problèmes d'instrumentation ou de déploiement/récupération. Au total, près de 40 années de données acoustiques sont disponibles.

Traitements

Un jeu de données tel que celui disponible pour cette étude nécessite la mise en place de traitements automatiques. Dans une étude pilotée et réalisée par F.X. Socheleau, nous avons mis en place un détecteur pour les Z-calls. La stratégie de détection, basée sur des méthodes de projection en sous-espace [Scharf and Friedlander, 1994], prend explicitement en compte l'existence potentielle de signaux transitoires interférents (e.g. séismes, canons à air, vocalises d'autres espèces, ...). Pour prendre en compte les fluctuations de la propagation océanique, la méthode permet aux Z-calls reçus de légèrement varier en fréquence, intensité et durée d'une observation à l'autre. La méthode proposée possède un seuil de détection auto-adaptatif aux variations du bruit ambiant, assurant une probabilité de fausse alarme constante sans avoir recours à de lourdes simulations de Monte Carlo et/ou à une inspection humaine (et subjective) des données réelles. Validée sur un large jeu de données réelles, notre méthode se démontre expérimentalement efficace [Socheleau et al., 2015]. Elle possède notamment un taux de bonne détection 10 à 15% meilleur qu'XBAT⁴, détecteur basé sur la corrélation de spectrogrammes et faisant référence dans la communauté. Il n'est pas certain que cette différence de performance soit réellement significative. Toutefois, le point important est que la méthode proposée est au moins aussi efficace qu'XBAT, tout en permettant des variations du signal reçu, en étant robuste aux interférences, et en ayant des performances maîtrisées. Ce dernier point

4. "eXtensible BioAcoustic Tool," www.birds.cornell.edu/brp/, Cornell Laboratory of Ornithology, Ithaca, NY

est particulièrement important, même s'il est souvent ignoré dans la communauté bioacoustique. Il deviendra pourtant incontournable si on souhaite un jour utiliser le PAM sereinement pour estimer la densité des populations de mammifères marins [Marques et al., 2013].

Une question associée aux problématiques de détection est celle de l'aire couverte par le système PAM (enregistreur et détecteur). Pour essayer d'y répondre, j'ai encadré une série de 3 stages de M2R. Le premier, réalisé par B. Ollivier, a résolu ce problème de manière directe, par l'utilisation de l'équation du SONAR passif et l'utilisation de modèles de propagation acoustique [Ollivier, 2013]. Malheureusement, en considérant toutes les incertitudes en jeu (notamment sur l'environnement, sur le niveau source, et sur les profondeurs de source et de réception), la réponse obtenue n'est pas satisfaisante. Pour lever une partie de ces incertitudes, un second stage, réalisé par R. Emmetière, s'est intéressé à la localisation des ABW à partir des données enregistrées sur les triplets d'hydrophones disponibles [Emmetiere, 2015]. Enfin, un dernier stage réalisé par M. Meillour a utilisé les méthodes de localisation pour estimer les niveaux sources (SL) [Meillour, 2016].

Dans la littérature, [Širović et al., 2007] et [Samaran et al., 2010] proposent une estimation du SL des ABW. Ces deux références utilisent la même méthode, et supposent implicitement que le SL ne varie pas d'une vocalise à l'autre (même si cela n'est jamais clairement écrit). Notre contribution principale est de retirer cette hypothèse. En revanche, notre méthode requiert une connaissance *a priori* sur la profondeur d'émission des vocalises. Nous avons appliqué notre méthode sur une série de 42 vocalises émises par un unique animal. En supposant que la profondeur de vocalisation varie entre 20 et 35 m (ce qui est raisonnable aux vues des connaissances actuelles sur les baleines bleues [Oleson et al., 2007]), le SL estimé dans la bande de l'unité A ([25-29] Hz) varie entre 183 and 187 dB re 1 μ Pa @ 1 m. Cette incertitude devra être prise en compte pour ré-estimer la distance de détection maximale des vocalises par nos systèmes PAM.

Patrons saisonniers et journaliers de vocalisation

Dans le cadre de la thèse d'E. Leroy, nous avons étudié les pics de présence, la saisonnalité, et les mouvements migratoires des ABW. Pour cela, nous avons utilisé les résultats de notre algorithme de détection [Socheleau et al., 2015], ainsi qu'une métrique comparant la puissance du chorus à la puissance du bruit hors chorus (RCH : Rapport Chorus à bruit Hors chorus). A titre d'exemple, la figure 4.7 présente la moyenne annuelle du nombre normalisé de Z-calls détectés par mois à chaque station, ainsi que le RCH correspondant.

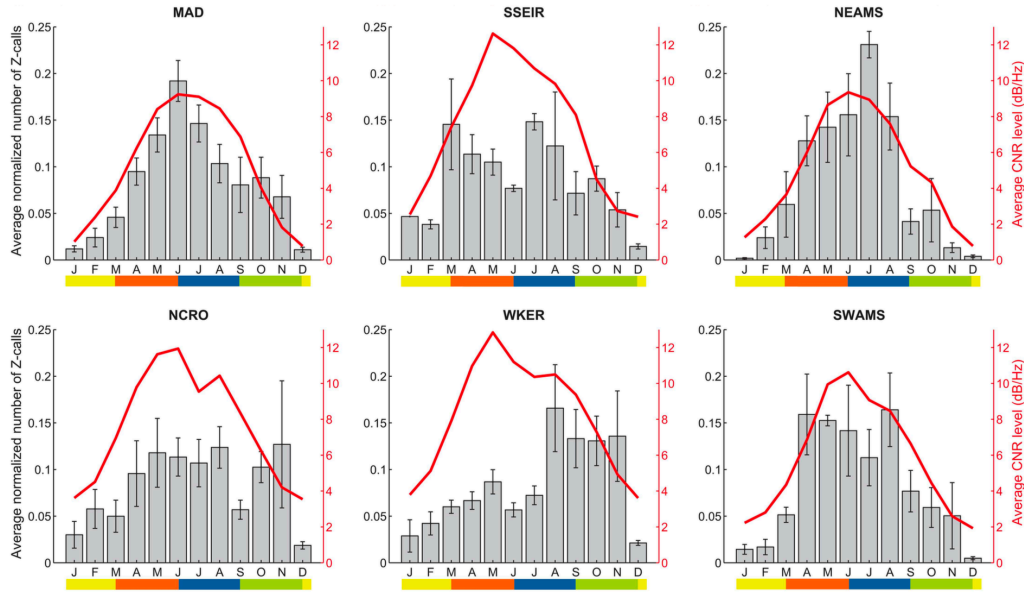


FIGURE 4.7 – Moyenne annuelle du nombre normalisé de Z-calls détectés par mois à chaque station, et RCH correspondant. La barre de couleurs représente les saisons (jaune : été ; rouge : automne, bleu : hiver ; vert : printemps. Figure extraite de [Leroy et al., 2016].

Grâce à la base de données acoustiques OHASISBIO d’une durée de six ans, couvrant 42 degrés de latitude et 28 degrés de longitude, une étude statistique nous permet de montrer les résultats suivants [Leroy et al., 2016]. Les ABW sont présentes toute l’année dans les latitudes subantarctiques et subtropicales de l’Océan Indien, avec une légère baisse de présence à l’été austral. Leur distribution est largement saisonnière ; cette distribution varie largement d’un site à l’autre mais reste stable au cours du temps. La zone d’hivernage des ABW pourrait s’étendre de 26°S à 7°S. Enfin, les Z-calls suivent un rythme nycthéral, avec plus d’émissions durant la journée que durant la nuit.

Un point important remarqué lors de notre étude est l’importance du contexte multi-site et pluri-annuel. L’interprétation de nos résultats aurait été complètement différente si nous avions disposé d’une unique année de données, ou d’un unique site. Il faut donc être particulièrement vigilant dans l’interprétation des résultats, notamment en terme d’évolution des populations.

Identification de nouvelles vocalises

Grâce à l'étude extensive des données acoustiques⁵, nous avons découvert et décrit deux sons récurrents, illustrés sur la figure 4.8. Le premier signal, appelé M-call dans la suite, est une unité monochromatique à 22 Hz durant environ 10 secondes. Ce signal est uniquement détecté en 2007 (environ 15.000 détections). Le second signal, appelé P-call dans la suite, est une unité monochromatique à 27 Hz durant environ 10 secondes. Son occurrence a largement augmenté de 2007 à 2010, et modérément depuis (plus de 90.000 détections depuis 2007). L'ICI associé aux M-calls est d'environ 149 secondes, alors que l'ICI associé aux P-calls est d'environ 159 secondes.

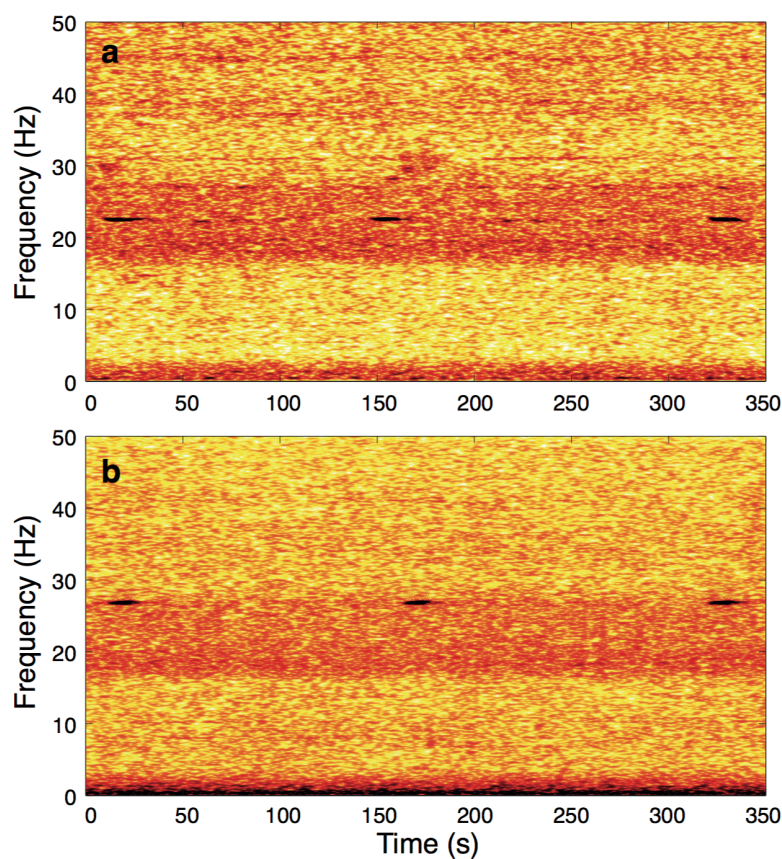


FIGURE 4.8 – Spectrogramme de (a) trois M-calls consécutifs et (b) trois P-calls consécutifs. Figure extraite d'un article écrit par E. Leroy (soumis pour publication dans J. Acoust. Soc Am.)

5. Nous complétons ici le jeu de données précédent avec le réseau DEFLOHYDRO, déployé par J.Y Royer de 2006 à 2008 aux sites MADS, SWAMS et NEAMS

4.3. OBSERVATION ACOUSTIQUE DE L'OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE⁷³

Les caractéristiques, la saisonnalité et le rythme nyctéméral des M-calls et des P-calls ne laissent aucun doute sur leur origine biologique. Malgré des caractéristiques très proches des vocalises de baleines bleues, nous montrons qu'ils diffèrent largement des vocalises de tous les mysticètes présents dans l'océan Indien. De plus, la distribution saisonnière et géographique des M- et des P-calls est similaire, mais ne correspond à aucune des sous-espèces ou populations de baleines bleues de la zone étudiée. Enfin, il est important de remarquer que le P-call ressemble fortement à un Z-call incomplet produit par les ABW. Malgré un ICI largement différent, la fréquence du P-call et celle de l'unité A des Z-calls ne diffèrent que de 0.6 Hz. Comme ces deux signaux sont co-occurents dans le temps et dans l'espace, il est crucial de s'assurer de les différencier pour ne pas biaiser les études de suivis bioacoustiques des ABW.

4.3 Observation acoustique de l'océanographie physique

Après avoir présenté mes travaux en bioacoustique, je vais maintenant insister sur l'océanographie acoustique, non-biologique⁶. Deux grands types de démarches sont alors envisageables. On peut étudier le paysage acoustique océanique pour inférer de l'information sur des phénomènes géophysiques et/ou météorologiques naturellement bruyants. On peut également utiliser des sources acoustiques d'opportunité (e.g. mammifères marins, trafic maritime) pour inférer de l'information sur le canal de propagation, et donc sur l'environnement océanique. Ces deux démarches seront utilisées dans la suite.

Dans un premier temps, je présenterai les capacités de monitoring océanique offertes par le biologging d'animaux sauvages en liberté : les éléphants de mer austraux (EMA). L'objectif est ici d'utiliser un capteur multifonction (acoustique, accéléromètre, GPS, compas) embarqué sur l'animal pour étudier l'animal d'une part, et l'environnement d'autre part. Dans un second temps, je présenterai la possibilité qu'offre le PAM pour suivre des phénomènes océanographiques dynamiques (e.g. marées, fronts) en utilisant des sources acoustiques d'opportunité. On s'intéressera ici notamment à la Mer d'Iroise, et au bruit rayonné par le trafic maritime.

6. Je m'autoriserai toutefois un petit retour vers la physiologie des éléphants de mer austraux dans la section 4.3.1.

4.3.1 Elephants de mer océanographes

Contexte

Le PAM passe généralement par la mise en place d’observatoires acoustiques câblés ou autonomes. Bien que ces observatoires permettent de monitorer sur de longues périodes de temps une zone restreinte d’intérêt (point fixe), ils ne permettent pas d’acquérir de connaissance environnementale sur de larges échelles géographiques. Pour répondre à cette problématique, je propose de transférer la méthodologie d’observation environnementale par AP sur des porteurs mobiles. De plus, pour minimiser le coût de l’observation environnementale, je propose l’utilisation de biologger, i.e. des capteurs miniaturisés embarqués sur des animaux sauvages.

L’étude réalisée focalise sur l’Elephant de Mer Austral (EMA, *Mirounga leonina*), et notamment sur des individus femelles. Depuis 2004 dans les îles subantarctiques françaises (TAAF⁷), des scientifiques du CEBC équipent ce mammifère marin de différents capteurs océanographiques, et ce avant la migration de l’animal vers les eaux (sub)antarctiques. Durant ce voyage de plusieurs milliers de kilomètres, les EMA ainsi équipés échantillonnent continûment les 500 premiers mètres de la colonne d’eau. Depuis 10 ans, les EMA ont permis de collecter 90% de la donnée océanographique mesurée in-situ au sud du 60ème parallèle. Récemment, un nouveau capteur est venu compléter les mesures faites par les EMA. Il s’agit d’un hydrophone autonome de type Acousonde⁸. Il permet d’enregistrer le paysage acoustique rencontré par l’animal, tant durant ses plongées sous-marines que lors des périodes de respirations à la surface. La figure 4.9 présente la photo d’un EMA instrumenté.

Jusqu’à aujourd’hui, les EMA ont été utilisés pour mesurer des paramètres océanographiques physiques (e.g. [Roquet et al., 2009]) et biologiques (e.g. [Guinet et al., 2013]) dans des régions peu accessibles. La migration en boucle fermée des EMA (qui partent de Kerguelen et reviennent à Kerguelen) permettent également d’utiliser des Acousondes, enregistreurs acoustiques autonomes non-communiquants qu’il faut récupérer à la fin de la migration. Les données acoustiques ont notamment été utilisées pour étudier le rythme respiratoire des EMA en mer, lorsqu’ils récupèrent à la surface après une plongée [Génin et al., 2015]. En mer, les EMA plongent régulièrement à des profondeurs mésopélagiques (300-500 m, parfois jusqu’à 2000 m), et tendent à suivre les variations verticales de leurs proies. Durant nombre de ces plongées, les EMA passent une large proportion du temps à dériver passivement à

7. Terres Australes et Antarctiques Françaises

8. Acoustimetrics, Greeneridge Sciences, Inc.

4.3. OBSERVATION ACOUSTIQUE DE L'OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE 75

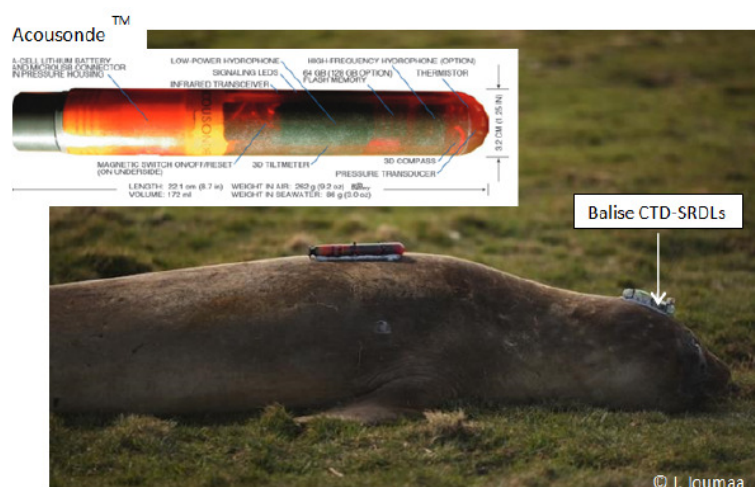


FIGURE 4.9 – Photo d'un EMA instrumenté. Photo prise par J. Joumaa (CEBC)

travers la colonne d'eau [Richard et al., 2014]. Dans la suite, ces événements seront appelés "phases de dérive". Ils sont particulièrement importants pour notre étude acoustique. En réduisant le bruit d'écoulement, ils permettent une mesure particulièrement propre du paysage sonore environnement.

Toute l'étude présentée ici a été réalisée en collaboration avec C. Guinet (CEBC), pilote du projet SO-MEMO⁹ qui assure l'instrumentation des EMA.

Estimation des conditions météorologiques

Dans le cadre du post-doctorat de D. Cazau, nous nous sommes intéressés à l'estimation des conditions météorologiques (et notamment la force du vent) à partir du paysage acoustique enregistré par les EMA en plongée. Cette thématique de météorologie acoustique sur porteur mobile n'est pas nouvelle. Des campagnes de mesures avec flotteurs ARGO à profondeur constante ont été réalisées par l'Applied Physics Laboratory (Seattle) [Riser et al., 2008, Yang et al., 2015]. Toutefois, nous apportons ici une double contribution. Nous proposons une méthodologie détaillée concernant l'utilisation d'un porteur mobile proche des porteurs standards (gliders, flotteurs ARGO) ayant des trajectoires profilées en montées/descentes progressives, et nous portons cette méthodologie sur un porteur mobile d'opportunité [Cazau et al., 2017]. De plus, le comportement dynamique des EMA (par exemple, profils de plongée et type de nage multi-modal) est en fait bien plus complexe que celui porteur

9. Système d'Observation Mammifères Marins Echantillonneurs du Milieu Océanique, http://www.cebc.cnrs.fr/Fso_memo/so_memo.htm

mobile standard. Nous avons donc travaillé dans un cas d'analyse plutôt défavorable qu'il sera aisé de simplifier pour un transfert sur d'autres porteurs plus classiques.

Le cadre méthodologique mis en place dans notre étude repose sur des outils d'analyse statistique pour la corrélation de données multi-dimensionnelles, telles que la régression multilinéaire multivariée et l'analyse en composantes principales. Deux familles de variables d'influence ont été définies, une première liée aux EMA (vitesse, profondeur et accélération tri-axiale) et une deuxième à l'environnement (vitesse du vent¹⁰). Nous distinguons aussi deux types de nages dans les plongées des EMA, les nages actives (caractérisées notamment par des accélérations intermittentes et une vitesse soutenue) et les dérives passives (mentionnées plus haut, et caractérisées par une accélération quasi nulle et une vitesse faible). Les variables liées aux EMA ont été obtenues grâce aux capteurs embarqués et aux algorithmes développés au CEBC. Les variables environnementales sont obtenues à partir des observations satellitaires ASCAT¹¹, interpolées par des analyses ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasting).

Nos résultats montrent [Cazau et al., 2017] que la mesure sonore basse fréquence est largement impactée par le comportement des EMA, ce qui s'explique par le bruit d'écoulement dû au mouvement de l'animal dans l'eau. En revanche, les fréquences supérieures à 2.5 kHz sont relativement peu affectées par le comportement des EMA, ce qui permet une mesure correcte du paysage acoustique. A titre d'exemple, la figure 4.10 présente les spectres moyens enregistrés en fonction de la vitesse du vent. Nous montrons alors qu'il est possible d'utiliser le paysage acoustique sous-marin pour estimer la vitesse du vent avec les algorithmes classiques de la littérature (simple régression linéaire entre le niveau spectral et la force du vent, e.g. [Vagle et al., 1990]). En considérant uniquement la donnée acoustique enregistrée durant les phases de dérive, nous obtenons sur nos données une précision d'environ 2 m/s. Cette précision se dégrade si on considère en plus les phases de nage active, mais nous montrons qu'il est possible de regagner en performance en utilisant des algorithmes d'estimation plus avancés (e.g. régression multi-linéaire et analyse en composantes principales).

Physiologie de l'Eléphant de Mer Austral

Nous avons également profité de la disponibilité de la donnée acoustique pour compléter l'étude bioacoustique des EMA. Cela a été effectué dans le

10. Le jeu de données étudié ne contient pas d'évènement de pluie significatif

11. disponible à <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/MWF/L3/ASCAT/Daily/Netcdf/>

4.3. OBSERVATION ACOUSTIQUE DE L'OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE 77

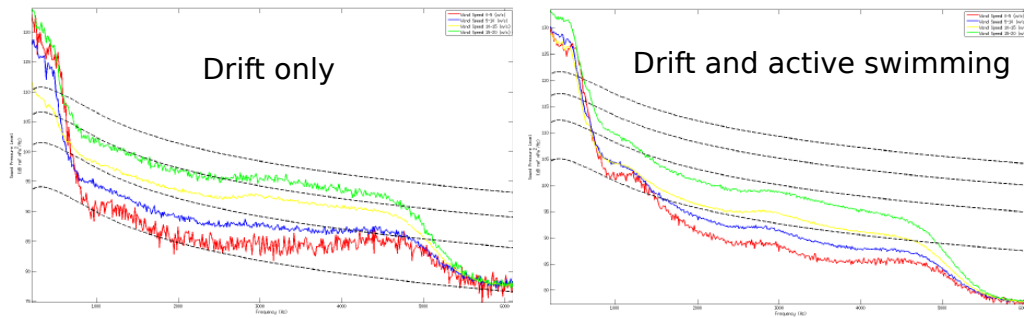


FIGURE 4.10 – Spectres moyens mesurés en fonction de la force du vent (rouge : 0 à 5 m/s; bleu : 5 à 10 m/s; jaune : 10 à 15 m/s; vert : 15 à 20 m.s), pour les phases de dérives uniquement (à gauche) ou pour tous les enregistrements (à droite). Figure tirée de [Cazau et al., 2017]

cadre de deux stages de césure d'élèves ingénieurs agronomes (G. Labadie et L. Day), réalisés entre l'ENSTA Bretagne et le CEBC. Dans un premier stage, G. Labadie a étudié les données acoustiques pendant la plongée des EMA. Elle a réalisé un inventaire des sons rencontrés par l'animal pendant les phases de chasse, et a démontré la possibilité d'identifier les tentatives de captures de proies à partir de ces sons.

Dans un deuxième stage, L. Day a étudié les données acoustiques pendant les phases de surface. Cette mesure est particulièrement intéressante pour étudier la physiologie des animaux, car elle permet un enregistrement des respirations, ainsi que des battements du coeur [Le Boeuf et al., 2000]. Nous focalisons ici sur les battements cardiaques. L'objectif est double. Il s'agit d'étudier le comportement de récupération des EMA à travers la variation de leur fréquence cardiaque. On s'intéresse également aux liens entre la fréquence cardiaque moyenne d'une phase de surface avec l'effort de nage et la durée de la plongée précédent cette phase de surface.

Dans les données acoustiques, les battements cardiaques prennent la forme d'impulsions courtes dans une bande de fréquence de l'ordre de 0 à 150 Hz [Burgess et al., 1998], tel qu'illustré sur la figure 4.11. Nous avons détecté manuellement toutes ces impulsions dans nos données, et avons extrait de ces détections la fréquence cardiaque instantanée, ainsi qu'une fréquence cardiaque moyenne par phase de surface. L'effort de nage précédant chaque phase de surface a également été quantifié grâce aux accéléromètres (données mesurées durant la plongée), et ce en utilisant les méthodes développées par nos collègues du CEBC [Jouma'a et al., 2015].

Notre étude [Day et al., 2017] est une des rares études ayant permis la mesure du rythme cardiaque d'EMA en liberté. La fréquence cardiaque

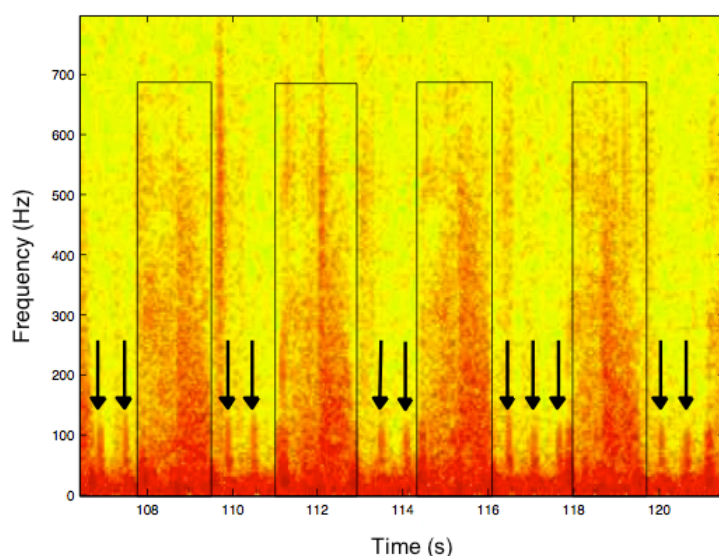


FIGURE 4.11 – Exemple de spectrogramme enregistré lors d’une phase de surface. Les bruits large bande encadrés sont les respirations de l’EMA. Les impulsions indiquées par des flèches noires verticales sont des battements cardiaques. Figure extraite de [Day et al., 2017]

moyenne mesurée est de 102.4 ± 4.9 battements par minute. Durant chaque phase de surface, la fréquence cardiaque instantanée des animaux accélère avec le temps (i.e. elle est significativement plus rapide à la fin de la phase de surface qu’au début). Ce résultat est probablement lié à la fin de tachycardie (accélération du rythme cardiaque) que les EMA subissent lorsqu’ils retournent à la surface en fin de plongée. De plus, aucun lien n’a pu être fait entre le rythme cardiaque et l’effort fourni par l’animal en plongée. Toutefois, nos résultats suggèrent que les EMA gèrent leur récupération en augmentant la durée des phases de surface, plutôt qu’en modulant leur rythme cardiaque à la surface.

4.3.2 Mer d’Iroise

Contexte

Dans cette section, on se propose d’explorer des méthodes novatrices de monitoring des processus océaniques côtiers par acoustique passive. Pour cela, on utilise des sources sonores d’opportunités naturellement présentes dans le milieu, et notamment le trafic maritime. Les travaux d’inversion géoacoustique présentés au chapitre précédent s’intéressent à l’estimation des propriétés

4.3. OBSERVATION ACOUSTIQUE DE L'Océanographie Physique 79

du fond, des données par nature (relativement) statiques dans le temps. Ici, on aborde le suivi temporel des propriétés de la colonne d'eau. On se donne pour objectif de proposer des méthodes d'inversion nécessitant uniquement un faible nombre de capteurs, ce qui pourrait à terme favoriser l'inclusion de cette mesure in situ dans un système de prévision océanique opérationnel côtier par assimilation.

L'étude focalise sur la mer d'Iroise, partie de l'Océan Atlantique à l'ouest de la pointe bretonne. La mer d'Iroise est un environnement petit fond avec une topographie complexe. La bathymétrie varie de quelques mètres en bordure de côtes, à plusieurs dizaines de mètres au large. La zone subit d'intenses marées semi-diurnes (deux cycles par jour), avec un marnage allant de 2 à 7 m. La mer d'Iroise est également une zone où le trafic maritime est intense et varié, où de nombreux navires de pêches, de plaisance, et commerciaux co-existent. Notons notamment la présence du rail d'Ouessant, une des routes maritimes les plus empruntées du globe, avec plus de 160 navires commerciaux par jour. Le trafic maritime local peut être suivi grâce au système AIS (Automatic Identification System). Une illustration de la zone et du trafic local est présenté sur la figure 4.12. Ce trafic peut être divisé en différentes régions indiquées par les chiffres allant de (1) à (5). Les zones (1) et (2) correspondent au trafic maritime commercial. Les zones (3) et (5) correspondent à un trafic côtier, tant de pêche que de plaisance. La zone (4) recouvre tout le trafic en rade de Brest.

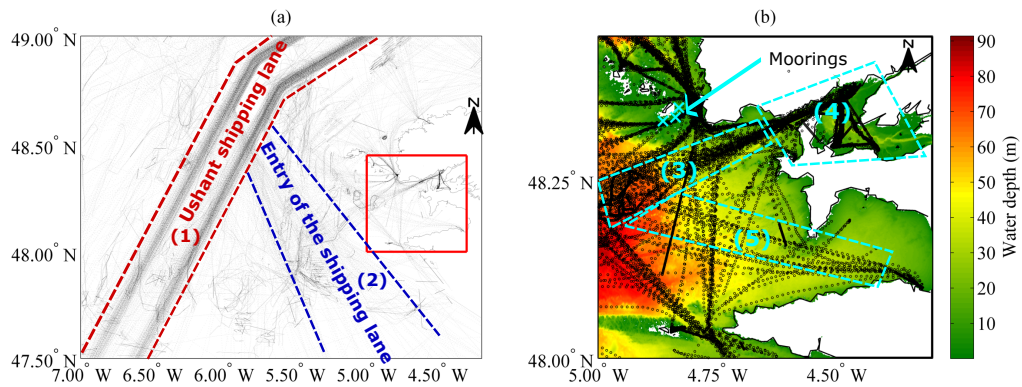


FIGURE 4.12 – (a) Carte du trafic maritime en mer d'Iroise, montrant le cumul du trafic du 29 mai au 8 juin 2010 (points noirs sur la carte). (b) Bathymétrie de la mer d'Iroise autour de la côte du Finistère [correspond au rectangle rouge dans (a)], et trafic maritime local (points noirs sur la carte). Figure extraite de [Kinda and Bonnel, 2015]

Les données acoustiques considérées ici ont été collectées par des enregistreurs autonomes AURAL¹², posés sur le fond, au large de l'île de Béniguet, dans l'archipel de Molène. La position exacte des mouillages est montrée sur la figure 4.12b. Dans la suite, on focalise sur un unique enregistreur, et sur 10 jours d'enregistrements réalisés en septembre 2010. On focalise également sur la bande UBF (Ultra Basse Fréquence) de ce bruit.

Observation acoustique de la marée

Une particularité du bruit ambiant enregistré est un motif d'interférences, dites "striations". Ces striations sont variables mais persistent au cours du temps. La figure 4.13 présente un spectrogramme typique du bruit ambiant enregistré durant la journée. Dans le cadre du post-doctorat de B. Kinda, nous avons expliqué la physique gouvernant les striations, déterminé la source de bruit ambiant créant ces striations, et utilisé les striations pour monitorer l'environnement [Kinda and Bonnel, 2015].

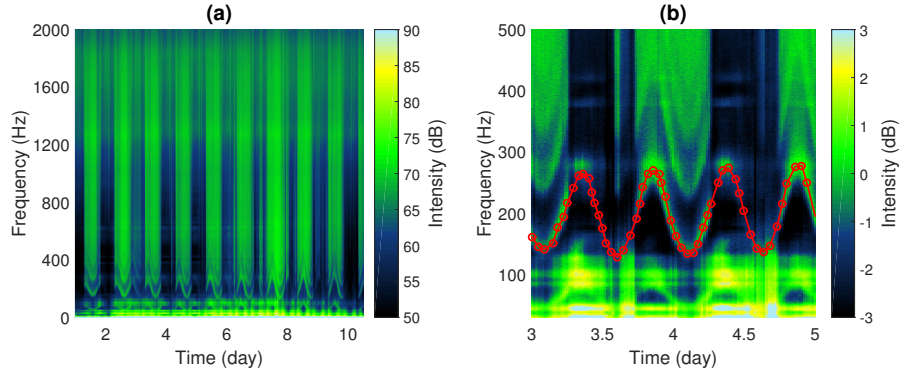


FIGURE 4.13 – Spectrogramme typique du bruit ambiant UBF enregistré au large de Molène (a) durant 10 jours et (b) zoom sur deux jours et sur la bande UBF. Un motif d'interférences (appelées striations) de fréquence bi-journalière est clairement visible. Il est mis en avant par la courbe rouge sur (b). Figure extraite de [Kinda and Bonnel, 2015]

Phénomène physique : Dans la bande UBF, la propagation acoustique s'explique par la théorie des modes, largement décrite dans le chapitre précédent. Pour mémoire, le champ acoustique est composé de diverses composantes appelées modes, et la propagation est dispersive : différentes fréquences se propagent à des vitesses différentes. Dans ce contexte, les striations observées (i.e des maxima/minima de l'intensité acoustique) sont créées par des interférences entre modes. Ces phénomènes d'interférences modaux sont décrits

12. Multi Electronique, QC, Canada

par le concept d'invariant océanique généralisé¹³, qui relie la variation de fréquence des striations à la variation de hauteur d'eau [Jensen et al., 2011]. Dans un environnement relativement simple (bathymétrie de pente constante entre la source et le récepteur), l'invariant suit une relation qui dépend des profondeurs au niveau de la source et du récepteur [Turgut et al., 2007]. Cette relation ne dépend pas de la distance source/récepteur. Ainsi, un continuum de sources à diverses distances, mais dans des eaux de profondeurs équivalentes, pourront s'additionner constructivement pour créer un unique motif de striations.

Détermination de la source : Une fois la physique expliquée, nous avons déterminé la source de bruit de la manière suivante. Tout d'abord, la présence de striations (et donc d'interférences entre modes) implique nécessairement une source distante, et donc un phénomène non local. La bande de fréquence en jeu ainsi que la persistance du phénomène indique que la seule source de bruit possible est le trafic maritime, omniprésent en mer d'Iroise. De plus, la présence de striations UBF ainsi que la valeur expérimentale de l'invariant indique que la source se trouve en eau plus profonde que le récepteur (au moins quelques dizaines de mètres). Une étude statistique du trafic maritime en mer d'Iroise indique que seul le trafic en rade de Brest peut expliquer les niveaux acoustiques mesurés dans nos données. Comme de plus la rade a une profondeur de quelques dizaines de mètres, nous concluons que la source de bruit la plus probable créant les motifs de striations observés est l'activité maritime en rade de Brest.

Monitoring de l'environnement : Quelque soit la source générant les striations, le motif peut être utilisé pour suivre le rythme des marées. Nous avons extrait le motif des striations sur l'intégralité des données de 2010, et la corrélation entre le motif de striation temps-fréquence et la hauteur d'eau est de -0.92. En mesurant les striations, il est donc possible de retrouver la hauteur d'eau. L'originalité principale de l'étude est de se placer dans un contexte 100% passif. Si le suivi des marées à partir d'un motif de striation temps-fréquence n'est pas nouveau, c'est à notre connaissance la première fois que ce genre d'étude est réalisé en contexte passif.

L'étude ouvre d'intéressantes perspectives sur le suivi de phénomènes océanographiques dynamiques par acoustique passive. Sur la zone considérée, on pourrait poursuivre l'étude et s'intéresser au suivi du front d'Ouessant [Le Boyer et al., 2009]. L'étude met également en avant le fait qu'un son généré en rade de Brest peut être entendu à l'extérieur de la rade, même s'il n'existe pas de trajet direct entre la source et le récepteur. Nous estimons

13. Le concept d'invariant océanique est également présenté au chapitre précédent. L'invariant océanique généralisé, considéré ici, est légèrement plus complexe.

que ce sujet est particulièrement important pour la défense, puisque la rade de Brest abrite la force de dissuasion nucléaire française. L'étude complète des effets 3D en rade de Brest mérite d'être approfondie.

Combinaison entre acoustique passive et télédétection satellitaire

Le monitoring spatio-temporel à haute-résolution de l'océan (autant pour les dynamiques géophysiques, biogéochimiques qu'écologiques) est un enjeu central aussi bien pour les questions scientifiques majeures liées au changement global que pour des enjeux opérationnels (e.g., opérations militaires, pollutions marines, monitoring de plateforme offshore,...). Aucune modalité d'observation (capteurs in situ, acoustique passive, télédétection satellitaire) ne permet d'accéder à un échantillonnage 3D+t haute-résolution à la fois en temps et en espace à l'échelle d'une région de l'océan, telle que la mer d'Iroise. En effet, la télédétection satellitaire est limitée à la surface de l'océan (typiquement les quelques premiers centimètres ou mètres suivant les capteurs) avec une résolution spatiale importante (jusqu'à quelques dizaines de mètres), mais un échantillonnage temporel nettement plus grossier lié à la sensibilité aux conditions atmosphériques et/ou aux orbites satellitaires (typiquement de quelques heures à quelques jours). D'autre part, l'acoustique passive offre une vision complémentaire de l'environnement sous-marin avec une très haute résolution temporelle des processus (de l'ordre de la seconde) mais une intégration spatiale très importante, comme cela est illustré par l'étude des marées en mer d'Iroise.

Dans le cadre de la thèse de M. Meillour démarrée en septembre 2016, nous proposerons de nouvelles stratégies de monitoring 3D+t de l'océan à travers le couplage de l'acoustique passive et de la télédétection satellitaire. Le défi visé par la thèse est l'analyse et l'identification des complémentarités entre acoustique passive et télédétection satellitaire pour le suivi 3D+t de dynamiques géophysiques de l'océan. La formulation d'une méthodologie générale de type assimilation de données permettra de combiner ces deux sources d'information pour la reconstruction de la dynamique d'un paramètre géophysique, et notamment du front d'Ouessant.

Le front d'Ouessant correspond à la frontière entre une masse d'eau froide et homogène proche des côtes, et une masse d'eau stratifiée au large. Cette structure interne influe largement sur la propagation du son, et assure un conditionnement satisfaisant du problème inverse de sa caractérisation par acoustique passive [Carriere et al., 2009]. Par ailleurs, le front d'Ouessant possède une signature de surface [Chevallier et al., 2014], ce qui favorise l'exploitation conjointe des techniques d'observation interne et externe au milieu marin. Enfin, les fronts océaniques peuvent généralement être représentés

par des fonctions de formes analytiques [Small et al., 1997] ce qui d'une part facilite les analyses de sensibilité et les développements théoriques essentiels à un travail de recherche et d'autre part facilite la résolution du problème inverse, qui consiste à estimer un nombre réduit de paramètres de forme (par exemple la position, l'anomalie de température en surface, ...).

Si ces travaux n'en sont qu'à leurs balbutiements, il me paraissait intéressant de conclure ce chapitre par leurs présentations. Ils illustrent parfaitement les bons et mauvais côtés du monitoring océanographique par acoustique passive, et démontrent, une fois de plus, la complémentarité entre divers vecteurs d'observation.

4.4 Conclusion et perspectives

4.4.1 Conclusion

Cette section a présenté mes travaux en océanographie acoustique. Le fil rouge de ces travaux est un transfert de l'état de l'art en traitement du signal et en acoustique sous-marine pour répondre à des problématiques environnementales. La première partie de ce chapitre résume mes recherches en bioacoustique. J'y détaille des méthodes novatrices pour l'étude des mysticètes en Arctique, un suivi pluri-annuelle des baleines bleues Antarctique dans le sud de l'océan Indien, ainsi qu'une étude acoustique de la physiologie des éléphants de mer austraux. Dans une seconde partie, ce chapitre présente mes recherches autour de l'observation de phénomènes océanographiques et météorologiques par acoustique passive. J'y détaille mes travaux dans l'océan Austral où nous utilisons les éléphants de mer comme glider acoustique d'opportunité, ainsi que mes travaux en mer d'Iroise où nous utilisons le trafic maritime comme une source acoustique d'opportunité pour sonder l'environnement.

Dans ce contexte, ma contribution est d'aider à apporter des réponses environnementales en sciences de la mer, notamment via l'utilisation de technologies ou méthodes adaptées, souvent méconnues de la communauté océanographique. Il ne s'agit pas ici de développer de nouveaux traitements, mais plutôt d'identifier les méthodes adaptées aux problèmes sous-jacents. Ce travail est basé sur une synergie STIC¹⁴ et mer, en adéquation avec la dynamique du LabSTICC et de la pointe bretonne.

Une telle activité de recherche ne pourrait être mise en oeuvre sans un solide socle de collaborations. Dans ce chapitre, je présente mes collaborations principales sur le sujet, avec Scripps Institution of Oceanography (San Diego, USA), avec le Centre d'Etudes Biologiques de Chizé, et avec le Laboratoire

14. Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

Géosciences Océan (Brest). La richesse de ces collaborations, démontrée par les résultats obtenus, est leur approche à la fois ascendante et descendante. D’une part, nous proposons des méthodes novatrices pour inférer le maximum d’informations de données existantes. D’autre part, nous bénéficions du meilleur de l’état de l’art en PAM et de notre retour d’expérience pour modifier nos protocoles de collectes de données.

4.4.2 Perspectives

Mes travaux en océanographie acoustique ouvrent un faisceau de perspectives, dont certaines ont déjà été présentées au cours du chapitre. Plutôt que de re-détailler ces thématiques ici, je préfère en présenter trois nouvelles, par ordre de maturité décroissante. Les deux premières correspondent à des travaux récents et non aboutis, et la dernière à une vision à long terme.

Etude acoustique de la déprédation

Un nombre croissant d’études révèle l’accroissement des conflits d’usages dans les pêcheries entre hommes et mammifères marins, ces derniers venant prélever les poissons immobilisés sur les engins de pêches. Ce phénomène, loin d’être anecdotique, a un réel impact économique et, probablement, écologique. Dans le cadre de la thèse de G. Richard, que je co-dirige avec C. Guinet du CEBC, nous étudions notamment la déprédation par les orques et les cachalots sur la pêche palangrière à la légine australe dans les TAAF¹⁵. L’utilisation d’une antenne acoustique (prototypée par G. Richard durant son stage de M2R à l’ENSTA Bretagne [Richard, 2015], puis déployée dans le cadre de sa thèse lors d’une mission de 2 mois sur un navire de pêche dans les TAAF) va nous permettre de :

- localiser les mammifères marins lors de leurs interactions avec les pêcheurs, et comprendre leur comportement de déprédation ;
- étudier les signatures acoustiques liées aux pratiques de pêches des différents capitaines, et estimer leurs impacts sur le taux de déprédation.

A terme, il s’agit de proposer des solutions opérationnelles pour limiter, voir supprimer, la déprédation. Les pistes explorées pourront permettre de modifier les pratiques de pêches, et/ou de proposer des solutions technologiques pour protéger le poisson sur les lignes. Les compétences acquises sur la déprédation dans les TAAF pourront être mises au service d’autres pêcheries, notamment les palangres pélagiques où les méthodes de pêches ainsi que les mammifères marins concernés sont différents.

15. Terres Australes et Antarctiques Françaises

Bioacoustique des poissons et crustacés

En milieu marin, la bioacoustique est très largement associée à l'étude des mammifères marins. Cette dernière possède pourtant un champ bien plus large, et peut également servir pour étudier les poissons et les crustacés. Les échelles en jeu sont évidemment totalement différentes, ce qui influe sur la propagation acoustique, ainsi que sur les méthodes à utiliser. Une caractéristique propre à la bioacoustique des poissons et crustacés est la possibilité de faire des expérimentations en laboratoire, et/ou en mer dans des zones ateliers. Une perspective intéressante est l'étude de l'impact du bruit anthropique sur ces animaux, qui, pour certains, ont une haute valeur commerciale. Dans le cadre du stage de M2R de Y. Jezequel (que je co-encadre avec L. Chauvaux de l'IUEM), nous caractérisons actuellement l'activité sonore du homard breton. Les premières mesures réalisées en aquarium mettent en avant le besoin de synergie entre sciences de la mer et sciences de l'ingénieur. Il est en effet impossible d'effectuer des mesures acoustiques correctes dans un milieu confiné tel qu'un aquarium. Si la physique sous-jacente n'a rien de nouveau, elle est très largement ignorée dans ce domaine. La quantification de la production sonore de ces espèces et la mise en place de protocoles d'études d'impact acoustique ne pourront être obtenus sans une collaboration forte entre acousticiens et biologistes.

Utilisation de flotteurs dérivants pour un monitoring acoustique des océans à l'échelle du globe

L'utilisation de flotteurs dérivants pour mesurer les paramètres océanographiques (notamment température et salinité) a révolutionné l'océanographie moderne. Ces flotteurs sont utilisés depuis une quinzaine d'années dans le programme Argo, qui gère un réseau global de flotteurs à l'échelle mondiale, et dont un des objectifs est de comprendre la réponse des océans au changement climatique. A l'échelle internationale, plus de 10.000 flotteurs ont été déployés dans le cadre d'Argo. Aujourd'hui, près de 4000 flotteurs sont en service, dans tous les océans du globe (excepté en zone polaire). Typiquement, un flotteur reste immergé une dizaine de jour à 1000 m de profondeur, après quoi il entame une descente à 2000 m, puis il remonte lentement vers la surface en mesurant la température et la salinité. Une fois à la surface, le flotteur transmet ses données et sa position GPS vers la terre via une liaison satellite Iridium, puis retourne à 1000 m de profondeur pour démarrer un nouveau cycle.

De récents développements technologiques démontrent la possibilité d'équiper les flotteurs avec des hydrophones. On peut ainsi se laisser rêver à un

monitoring acoustique des océans à l'échelle du globe. Avant d'en arriver là, il s'agit de démontrer la viabilité du projet. Un point clef sera d'embarquer le traitement de la donnée acoustique à l'intérieur du flotteur, qui ne transmettra par Iridium que le résultat des traitements. Quelques initiatives individuelles démontrent la faisabilité de ce principe, tant pour la météorologie acoustique [Riser et al., 2008, Yang et al., 2015] que pour l'étude des mammifères marins [Baumgartner et al., 2013, Baumgartner et al., 2014]. Il s'agit aujourd'hui de proposer une vision pluridisciplinaire avec des flotteurs acoustiques multi-fonctions. Ainsi, le flotteur acoustique du futur devra embarquer des algorithmes de détection de signaux transitoires (e.g. vocalises de mammifères marins) ainsi que des algorithmes de traitement du bruit ambiant (e.g. mesure robuste du niveau spectral dans diverses bandes de fréquences). Seule une vision synoptique des détections et du bruit ambiant sera alors transmise à la terre. Une surcouche de traitements pourra alors être déployée, par exemple pour estimer la pollution sonore anthropique ou les conditions météorologiques à partir du bruit ambiant.

Un tel projet ne saurait être autre chose qu'un rêve sans quelques pistes pour le réaliser. Des collègues français du Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (notamment E. Leymarie) développent actuellement un flotteur acoustique, sur lequel nous pourrons tester nos méthodes de météorologie acoustiques (originellement développées pour les éléphants de mer austraux, cf section 4.3.1). Je place également ce projet dans la perspective de ma future mobilité à Woods Holes Oceanographic Institute (USA), où je vais effectuer un sabbatique long à partir de septembre 2017. Je souhaite notamment y dégager les moyens d'effectuer un test grandeur nature de flotteurs acoustiques multi-fonctions, en collaboration avec des océanographes et bioacousticiens. Je souhaite également m'assurer de la cohérence des traitements acoustiques embarqués dans les flotteurs français et américains. Cela permettra, à terme, une intégration officielle des flotteurs acoustiques dans le réseau international ARGO.

Chapitre 5

Conclusion

Dans ce manuscrit, j'ai présenté une vision synthétique de mon activité de recherche. Cette activité se découpe en deux grands axes.

Mon premier axe de recherche porte sur les traitements adaptés aux ondes Ultra Basse Fréquence, et donc aux canaux de propagation dispersifs. Ce premier axe est largement méthodologique, et se base sur une synergie entre traitement du signal et physique des ondes.

Mon second axe de recherche porte sur l'observation des océans par acoustique passive. Ce second axe est largement applicatif. Il se base sur une synergie entre l'acoustique sous-marine et les sciences de la mer.

Mon activité de recherche forme un tout que j'espère cohérent. La synergie "STIC et mer" qui la caractérise est une force, nécessaire à l'observation moderne des océans. Elle m'a notamment permis de créer un solide réseau de collaborateurs, tant du point de vue local, national qu'international. Ma volonté de travailler dans un contexte interdisciplinaire alliant traitement du signal, acoustique sous-marine et sciences de la mer est illustrée par la diversité des journaux dans lesquels je publie. A titre d'exemple, quatre de mes articles sont fournis en annexe.

Les perspectives de mes travaux de recherche sont présentées à la fin des chapitres 3 et 4. Je souhaite insister sur l'évolution générale que prend ma recherche. Ma thèse au GIPSA-Lab m'a donné de solides bases en traitement du signal et en acoustique sous-marine. Cela reste, encore aujourd'hui, le coeur de mon activité. Toutefois, mes années à l'ENSTA Bretagne m'ont largement ouvert aux sciences de la mer. Depuis quelques années, grâce à mes collaborations, ma recherche dépasse le cadre de l'acoustique et du traitement du signal, et me permet de répondre à des questions environnementales. Ce nouveau positionnement répond à une envie personnelle, mais correspond également à une stratégie scientifique à long terme.

Si l'acoustique sous-marine a connu son essor suite à des besoins de la Défense, la situation actuelle n'est plus la même. L'acoustique est un fantastique moyen d'observation des océans, dont les forces sont la transversalité et le large spectre d'applications potentielles. Aujourd'hui, l'acoustique sous-marine connaît un renouveau dû à la montée en puissance des applications environnementales, ainsi qu'à la naissance du concept de pollution sonore sous-marine. A titre d'exemple, la Directive Cadre Stratégique sur le Milieu Marin impose aux pays européens d'atteindre et de maintenir un "bon niveau écologique" dans leurs eaux territoriales. Ce niveau écologique est quantifié par un faisceau d'indicateurs, dont un concerne le bruit sous-marin.

Dans ce contexte, il s'agit pour moi de contribuer à faire de l'acoustique (notamment passive) un vecteur d'observation océanographique reconnu. Ma recherche doit donc effectuer un changement d'échelle, pour passer de

la preuve de concept à la solution opérationnelle. Pour cela, je quitte aujourd'hui l'ENSTA Bretagne pour un poste d'Associate Scientist à Woods Hole Oceanographic Institution (MA, USA). J'y développerai les perspectives présentées dans ce manuscrit, et pourrai profiter des moyens océanographiques expérimentaux de l'institut pour poursuivre l'évolution de mes travaux. Je veillerai notamment à conserver un équilibre entre les applications de Défense et les applications environnementales qui, une fois la barrière du vocabulaire franchie, sont génératrices de gain réciproque.

La rédaction de ce manuscrit aura été l'occasion de faire le point sur dix années de recherche, et de réfléchir à l'avenir. L'exercice est intéressant, mais compliqué. Il faut organiser, présenter, mettre en avant... A cinq lignes de la fin, je me rends compte que j'ai failli oublier l'essentiel : le plaisir que j'ai au quotidien en effectuant mes recherches. Et cela, je le dois évidemment à mes divers professeurs, encadrants, collègues, étudiants. Sans eux, j'irai travailler à reculons. Sans eux, rien n'aurait été possible. Merci !

Annexes

Cette annexe contient une sélection d'articles représentatifs de mes contributions, tant d'un point de vue méthodologique que thématique.

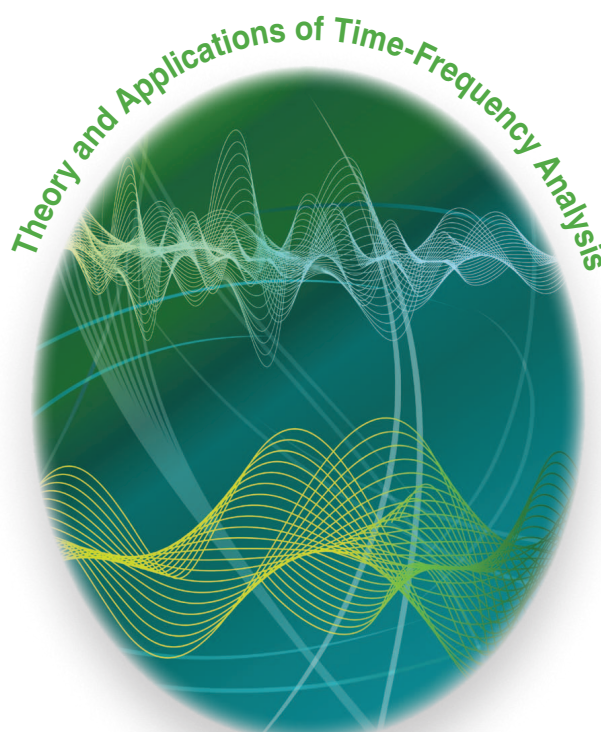
Concernant les ondes Ultra Basse Fréquence (chapitre 3), les articles choisis sont :

- Bonnel, J., Le Touzé, G., Nicolas, B., Mars, J. Physics-Based Time-Frequency Representations for Underwater Acoustics : Power Class Utilization with Waveguide-Invariant Approximation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30(6) :120-129, 2013.
- Bonnel, J., Dosso, S., Chapman, R. Bayesian geoacoustic inversion of single hydrophone light bulb data using warping dispersion analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1) :120-130, 2013.

Concernant l'océanographie acoustique (chapitre 4), les articles choisis sont :

- Cazau, D., Bonnel, J., Jouma'a, J., le Bras, Y., Guinet, C. Measuring the marine soundscape of the Indian Ocean with Southern Elephant Seals used as acoustic gliders of opportunity. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, pages 207-223, 2017.
- Leroy, E.C., Samaran, F., Bonnel, J., Royer, J.Y. Seasonal and Diel Vocalization Patterns of Antarctic Blue Whale (*Balaenoptera musculus intermedia*) in the Southern Indian Ocean : A Multi-Year and Multi-Site Study. *PLOS ONE*, 11(11) :e0163587, 2016.

Physics-Based Time-Frequency Representations for Underwater Acoustics



© ISTOCKPHOTO.COM/-M-I-S-H-A-

[Power class utilization with
waveguide-invariant approximation]

Time-frequency (T-F) analysis of signals propagated in dispersive environments or systems is a challenging problem. When considering dispersive waveguides, propagation can be described by modal theory. Propagated signals are usually multicomponent, and the group delay of each mode (i.e., each component)

is nonlinear and varies with the mode number. Consequently, existing T-F representations (TFRs) covariant to group delay shifts (GDSs) are not naturally adapted to this context. To overcome this issue, one solution is to approximate the propagation using simple models for which the dispersion properties do not vary with the mode number. If the chosen model is both simple and robust to uncertainties about the waveguide, it can be used to define adapted TFRs, such as the power-class with a suitable power coefficient. This article focuses on a context where this

Digital Object Identifier 10.1109/MSP.2013.2267651
Date of publication: 15 October 2013

methodology can be applied: low-frequency acoustic propagation in shallow water. In this case, the global oceanic dispersion can be summarized using a single scalar β called the *waveguide invariant*. This parameter can be used to approximate the group delay of each mode with a power law. Consequently, it is possible to use power-class TFRs with a β -based power coefficient. Their practical use is demonstrated on two experimental data sets: a man-made implosion used for underwater geoacoustic inversion, and a right-whale impulsive vocalization that can be used to localize the animal.

INTRODUCTION

Many physical or technical situations involve the propagation of a wave through a dispersive medium, e.g., ultrasonic waves in bones [1], electromagnetic whistlers in the magnetosphere [2], and ground-penetrating radar [3]. When considering broadband propagation, each frequency travels with its own speed, and a propagating nonstationary signal is distorted during its propagation. Dispersion usually tends to complicate the received signal, particularly in complex propagation environments that are dominated by multiple modal components, and this often limits the ability to directly recover information from the signal. On the other hand, the dispersion effects convey information about the propagation medium and the source/receiver configuration. If properly characterized using suitable signal processing methods, dispersion can be used as the basis of inversion algorithms (source localization and/or environmental estimation) [4]–[6]. When considering a transient source signal in a single receiver configuration, the received signal is nonstationary, and T-F analysis is the most common tool for dispersion analysis.

The application field considered in this article is underwater acoustics, although the proposed methodology can be extended to other dispersive situations. In particular, the article examines the practical application of power class TFRs for underwater acoustics, especially the low-frequency impulsive sources in shallow water. In this context, the propagation is described by modal theory. The oceanic environment acts as a dispersive waveguide, and the received signal contains several nonlinear frequency-modulated components called propagating modes. T-F analysis of the received signal and modal filtering are important issues for the underwater acoustic community. Using a single receiver, this allows for source localization and environmental estimation [4]–[6]. Dispersion analysis in the T-F domain has been studied by the signal processing community. Several approaches have been proposed, mainly for underwater acoustics [6]–[11], but also for other fields of application [1], [12]. The majority of these methods are physics-based and inject a priori environmental knowledge into the T-F processing. For such methods, the key is to make the best use of the available a priori information, while at the same time being insensitive to misknowledge in this a priori information.

Many TFRs have been proposed by the signal processing community [13], but none of them can be used successfully in every situation. All the TFRs have advantages and drawbacks, and are adapted to analyze signals with particular properties and

particular T-F content. The TFRs are thus often classified based on the properties they satisfy. Critical properties for T-F analysis are the covariance properties. A TFR is said to satisfy a covariance property if this TFR preserves certain T-F changes in the signal. It is also said that the TFR is covariant to that property. As an example, the Cohen's class is covariant to constant time-shifts and frequency-shifts, while the affine class is covariant to constant time shifts and to T-F scaling [13]. However, because of dispersion, none of these covariance properties are adapted to our underwater acoustics context. There is the requirement for covariance properties that take into account the nonlinear group delay of the signal considered. Such a covariance property is called the *GDS covariance*, and the corresponding TFR class was introduced by Papandreou-Suppappola et al. [14], [15].

This article is centered on a subclass of the GDS covariant class: the power class with an associated power time-shift covariance property [16]–[18]. The power class is thus adapted to dispersive signals with power-law group delays. For physical and underwater acoustic applications, the power class covariance should allow the inclusion of any available a priori information about the environment. To do that, the article establishes a link between the power class TFRs and the waveguide invariant β [19], [20]. The waveguide invariant is a scalar that summarizes the dispersion in the waveguide and allows the approximation of the phase of each mode as a frequency power function. This connection allows power class TFRs to be used to analyze the propagation of impulsive sounds in dispersive multimodal shallow water waveguides. This is demonstrated on both simulated and experimental marine data sets that correspond to both active and passive underwater acoustics (geoacoustic inversion and bioacoustics).

TIME-FREQUENCY REPRESENTATIONS COVARIANT TO GROUP DELAY SHIFTS

THE GROUP DELAY SHIFT COVARIANCE

As stated in the introduction, the constant time shift covariance property of many TFRs is not adapted to the context of dispersive propagation. One requires a TFR covariant to dispersive time shifts corresponding to the nonlinear group delay function of the medium.

Considering a signal $X(f)$ in the frequency domain, the output $Y(f)$ of an allpass dispersive system is given by $Y(f) = X(f)e^{-2\pi j\alpha\xi(f/f_0)}$. The group delay information is given by

$$\tau(f) = \frac{d}{df}\xi(f/f_0). \quad (1)$$

It is proportional to the derivative of the one-to-one phase function $\xi(f/f_0)$, where $f_0 > 0$ is a normalization frequency. To satisfy the GDS covariance, a TFR T should preserve the frequency-dependent time shift $\tau(f)$. In a more general framework, the GDS operator of a signal $X(f)$ is $D_\alpha^{(\xi)}X(f) = X(f)e^{-2\pi j\alpha\xi(f/f_0)}$, with α a real number. For a given phase function ξ , the parameter α quantifies the amount of dispersion on the signal $D_\alpha^{(\xi)}X(f)$. A TFR T is GDS covariant if the TFR of the output $D_\alpha^{(\xi)}X(f)$ corresponds to the TFR of the input $X(f)$

shifted in time by the change in group delay $\alpha\tau(f)$ introduced by the GDS operator

$$T_{D_a^\alpha X}(t, f) = T_X(t - \alpha\tau(f), f). \quad (2)$$

Successful use of the GDS covariant TFRs requires that the group delay of the TFR in (2) matches the group delay of the signal studied. Indeed, significant distortion can occur if this is not the case [21]. Moreover, the GDS covariance follows directly from the constant time-shift covariance according to the unitary equivalence principle [22], and thus requires knowledge about the time origin. These are two strong constraints for practical/experimental T-F analysis. Both of these will be taken into account in the context of underwater acoustics for unknown low-frequency impulsive sources in shallow water.

THE POWER CLASS

A particular part of the GDS covariant class is the power class [16]–[18]. It is adapted to the case of the power-law covariance property, for which the phase and group delay functions are power functions defined as

$$\xi(f) = \xi_\kappa(f) = \text{sgn}(f)|f|^\kappa, \quad (3)$$

$$\tau(f) = \tau_\kappa(f) = \frac{\kappa}{f_0} \left| \frac{f}{f_0} \right|^{\kappa-1}, \quad (4)$$

where κ is the power parameter, f_0 is a fixed reference frequency, and $\text{sgn}(f)$ provides the sign of the frequency f . The GDS covariance in (2) thus becomes the power time-shift covariance. The κ th power class TFRs satisfy two specific covariance properties. As an extension of the affine class, the first covariance property is covariance to scale change

$$T_{C_a X}^{(\kappa)}(t, f) = T_X^{(\kappa)}(at, \frac{f}{a}), \quad (5)$$

where C_a is the scaling operator that is defined as $C_a X(f) = X(f/a)/\sqrt{|a|}$. The second covariance property is covariance to power time shifts that matches the signal group delay

$$\begin{aligned} T_{D_a^\alpha X}^{(\kappa)}(t, f) &= T_X^{(\kappa)}(t - \alpha\tau_\kappa(f), f) \\ &= T_X^{(\kappa)}\left(t - \alpha \frac{\kappa}{f_0} \left| \frac{f}{f_0} \right|^{\kappa-1}, f\right), \end{aligned} \quad (6)$$

where D_a^α is the power time shift operator given by $D_a^\alpha X(f) = X(f)e^{-2\pi j\alpha\xi_\kappa(f/f_0)}$. Once again, the parameter α is a real number that expresses the amount of dispersion in the signal under study. It will be of particular interest in the section “Waveguide Invariant-Based Time-Frequency Representations.”

Hlawatsch et al. have shown [18] that any member of the κ th power class can be expressed as

$$\begin{aligned} T_X^{(\kappa)}(t, f) &= \frac{1}{f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(f_1/f, f_2/f) e^{2\pi j \frac{t f}{\kappa} \left[\xi_\kappa\left(\frac{f_1}{f}\right) - \xi_\kappa\left(\frac{f_2}{f}\right) \right]} \\ &\quad \times X(f_1) X^*(f_2) df_1 df_2, \end{aligned} \quad (7)$$

where Γ is a two-dimensional kernel that uniquely characterizes the TFR. Note that the affine class [13] is a particular case of the power class for $\kappa = 1$.

The power class can also be obtained using unitary warping [18], [22]. The power-warping operator is

$$\begin{aligned} W_\kappa X(f) &= \sqrt{\frac{d}{df} \xi_\kappa^{-1}(ff_0)} X(\xi_\kappa^{-1}(ff_0)) \\ &= \frac{1}{\sqrt{|\kappa| |ff_0|^{\frac{\kappa-1}{2\kappa}}}} X\left(f_0 \text{sgn}(f) |ff_0|^{\frac{1}{\kappa}}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

where $\xi_\kappa^{-1}(f)$ is the inverse function of $\xi_\kappa(f)$. Any member of the power class $T^{(\kappa)}$ can be computed as an affine TFR $T^{(A)}$ (i.e., a TFR of the affine class) of the warped signal $W_\kappa X(f)$, followed by a nonlinear T-F coordinate transform

$$\begin{aligned} T_X^{(\kappa)}(t, f) &= T_{W_\kappa X}^{(A)}\left(\frac{t}{f_0 \tau_\kappa(f)}, f_0 \xi_\kappa(ff_0)\right) \\ &= T_{W_\kappa X}^{(A)}\left(\frac{t}{\kappa |ff_0|^{\frac{1}{\kappa-1}}}, f_0 \text{sgn}(f) |ff_0|^{\frac{1}{\kappa}}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

As an example, the power Wigner distribution corresponds to the case where $T^{(A)}$ is the Wigner distribution [13] and the powergram corresponds to the case where $T^{(A)}$ is the scalogram [13]. Note that as $T^{(A)}$ is a member of the affine class, it is a quadratic TFR. Both $T^{(A)}$ and $T^{(\kappa)}$ are thus influenced by cross-terms in the case of multicomponent signals. The cross-term geometry is detailed in [17].

Power class definition is based on a single power group delay $\tau_\kappa(f)$. Consequently, the power class cannot handle multicomponent signals with different dispersion power laws. However, power class definition is independent of the parameter α . Consequently, power class is a suitable method to analyze multicomponent signals with different amounts of dispersion α (as long as the phase function ξ_κ is the same for every component). In the modal propagation context, the received signal contains several components called *modes*. Successful use of the power class requires that 1) each mode has a power group delay; 2) for a given signal, the power parameter κ is the same for every mode; and 3) ideally, the value of κ can be determined using physical considerations. In the following, we will demonstrate that it is possible to fulfill these three expectations.

ACOUSTIC PROPAGATION IN SHALLOW WATER

MODAL PROPAGATION

When considering low-frequency acoustic waves in shallow water, propagation can be described by normal mode theory [20]. Considering an impulsive source, the received signal $Y(f)$ after propagation in the acoustic waveguide over a range r consists in N dispersive waves called *modes*

$$Y(f) = \sum_{m=1}^N A_m(f) e^{-2\pi j \phi_m(f)}. \quad (10)$$

The phase function of each mode $\phi_m(f) = rk_m(f)$ depends on the source/receiver range r and on the waveguide properties through the horizontal wavenumber $k_m(f)$. The modal amplitude $A_m(f)$ depends both on the waveguide properties and on the source/receiver configuration (range and depth). Because of dispersion, each mode can be associated to a nonlinear group

delay $\tau_m(f) = (d/df) \phi_m(f)$. If the range and the waveguide properties are known, the modal phase $\phi_m(f)$ can be computed, and it is possible to define GDS covariant TFRs that are perfectly adapted to a given mode m .

When considering an ideal waveguide that consists of an iso-velocity water column between a pressure-release upper boundary and a rigid bottom, the modal phase can be expressed as [20]

$$\phi_m^{id}(f) = \frac{r}{c_w} \sqrt{f^2 - f_m^2}, \quad f > f_m, \quad (11)$$

where c_w is the water sound speed, and f_m is the cutoff frequency of mode m that depends linearly on the mode number m . Equivalently, a time-domain received signal $y(t) = \sum_{m=1}^N B_m(t) e^{-2\pi j \phi_m(t)}$ obtained as the inverse Fourier transform of (10) can be considered. In an ideal waveguide, the time-domain modal phase is [11], [20]

$$\phi_m^{id}(t) = f_m \sqrt{t^2 - (r/c_w)^2}, \quad t > r/c_w. \quad (12)$$

Note that from (12), the modal phase depends linearly on f_m . It is thus possible to decompose $\phi_m^{id}(t)$ into a mode-dependent amount of dispersion f_m and a mode-independent dispersive phase $\sqrt{t^2 - (r/c_w)^2}$. If the waveguide properties and range are known, it is thus possible to define covariant TFRs that are adapted to the whole signal (i.e., to every mode at once) in an ideal waveguide. Various studies have used the ideal waveguide (11) and (12) to perform dispersion-based warping [9], [11]. Le Touzé et al. also proposed modal-based TFRs using a similar model [10].

Except for this ideal simplistic waveguide, however, the dispersion characteristics evolve nonlinearly with mode number, and it is impossible to define TFRs adapted to the whole received signal. Although it would be possible to define GDS covariant TFRs adapted to each mode, this solution does not appear practical for experimental data, especially if the environment is not known. The next section presents the waveguide invariant approximation that allows this issue to be overcome.

THE WAVEGUIDE INVARIANT

In the guided modal propagation context, interference structures naturally appear in the $r-f$ domain (where r is the source/receiver range and f is the frequency). These interferences follow a striation pattern that can be summarized by a single scalar β called the *waveguide invariant* [19]. The waveguide invariant has been widely used in underwater acoustics for various applications, including passive source localization [23], [24], geoacoustic inversion [25], [26], and active sonar [27], [28].

Classical uses of the waveguide invariant require range diversity (i.e., several source/receiver ranges), which can be obtained using a horizontal line array or the combination of a single receiver and a moving source. By its nature, the waveguide invariant β describes physical interferences between modes and summarizes the dispersive behavior of the whole waveguide. However, in 1999, D'Spain and Kuperman [29] provided an approximation for single-mode dispersion using the waveguide invariant (see [29, Appendix A]). In particular, they derived the frequency dependence of the phase slowness $S_p^m(f) = k_m/2\pi f$, which was extended to

wavenumbers by Gao et al. [30]. Recalling that $\phi_m(f) = r k_m(f)$, one obtains the modal phase

$$\phi_m^\beta(f) \simeq \frac{r}{c} [f - \gamma_m f^{-\frac{1}{\beta}}], \quad (13)$$

where c is the average sound speed in the water column, and γ_m is a scalar that depends only on the mode number m . When considering a single receiver and an impulsive source, Gao et al. [30] showed that it is possible to use (13) as the basis of a “dedispersion transform.” This transform computes $Y_{\text{dedisp}}(s) = \langle Y, A_s \rangle$ by projecting the received signal $Y(f)$ on the atoms

$$A_s(f) = \exp\left(-2\pi j \frac{r}{c} [f - s f^{-\frac{1}{\beta}}]\right). \quad (14)$$

In the following, we will generalize the work of Gao and show that (13) can be used as the basis of β -based power class TFRs and warpings. Before this, note that (13) is based on several approximations that are inherent to the waveguide-invariant approximation. In particular, the waveguide invariant is actually invariant only within a group of closely spaced modes and within a frequency interval in which it is possible to define a functional relationship between group and phase speeds, which does not depend on mode number [19], [20]. This relationship usually holds true for low-frequency and long-range propagation in range-independent shallow water, where the acoustic field consists of a few modes that are weakly affected by refraction in the water column [20]. If a range-dependent environment is considered, it is also required that the spatial variations of the waveguide are sufficiently weak, so that an adiabatic modal approximation is valid [20], [29]. Note that in classical shallow-water environments, it can be demonstrated that $\beta \simeq 1$. In particular, $\beta = 1$ in the ideal waveguide presented in the section “Modal Propagation” [31]. The link between the waveguide invariant and the ideal waveguide, i.e., the link between (11) and (13), will be presented in the section “Comparison with Physics-Based Time-Frequency Representations Based on the Ideal Waveguide Model.”

WAVEGUIDE INVARIANT-BASED TIME-FREQUENCY REPRESENTATIONS

POWER CLASS AND WAVEGUIDE INVARIANT

According to (13), the modal phase can be decomposed into

- a nondispersive component $(r/c)f$ that corresponds to a plane wave with constant group delay $t_0 = r/c$
- a dispersive component $-(r/c)\gamma_m f^{-(1/\beta)}$ with group delay $(1/\beta)(r/c)\gamma_m f^{-(1/\beta)-1}$.

As $\beta \simeq 1$, the dispersive component corresponds to a dispersive wave with high frequencies arriving before low frequencies, with the limit that infinite frequency arrives first at time $t = t_0$. One can consider only the dispersive component by making t_0 the new time axis origin. This operation is not a practical problem, as t_0 corresponds to the time when energy first arrives at the receiver. The modal phase thus becomes

$$\tilde{\phi}_m^\beta(f) = -\gamma_m \frac{r}{c} f^{-\frac{1}{\beta}}. \quad (15)$$

Equation (15) shows that the power class with power parameter $\kappa = -1/\beta$ is adapted to every mode. One can thus define the β -power phase and group delay

$$\xi_\beta(f) = \text{sgn}(f) |f|^{-1/\beta}, \quad (16)$$

$$\tau_\beta(f) = -\frac{1}{\beta f_0} \left| \frac{f}{f_0} \right|^{-\frac{\beta+1}{\beta}}. \quad (17)$$

(In the following, the chosen notations are not consistent with classical power class notations; however, no ambiguity arises and these concise notations will be used throughout.) The corresponding β -warping operates as

$$\mathbf{W}_\beta X(f) = \frac{\sqrt{|\beta|}}{|f/f_0|^{\frac{\beta+1}{2}}} X\left(f_0 \text{sgn}(f) \left| \frac{f}{f_0} \right|^{-\beta}\right). \quad (18)$$

The β -power warping linearizes the modal phase of each mode, while the β -power TFRs are adapted to the whole received signal. Note that inverse β -warping is given by $\mathbf{W}_\beta^{-1} = \mathbf{W}_{1/\beta}$.

To normalize dispersion to mode 1, i.e., to have $\alpha_1 = 1$, one must define

$$f_0 = \left(-\frac{c}{r\gamma_1}\right)^{-\beta} \quad (19)$$

$$\alpha_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_1}, \quad (20)$$

where f_0 is the reference frequency, and α_m is the amount of dispersion of mode m . As a reminder, the concept of the amount of dispersion was introduced in (2). Physically, it is a good thing that the amount of dispersion depends on the mode number m . In terms of signal processing, the modal expansion of the acoustic field corresponds to the power signal expansion over a finite number of power impulses [16], [18] (each power impulse being a physical mode). As a result, the inverse Fourier transform of the frequency-warped signal $\mathbf{W}_\beta X(f)$ shows the modes as a discrete set of impulsions [18] [see the section “Waveguide Invariant-Based Time-Frequency Representations” and Figure 1(b)]. As a consequence, we will call the inverse Fourier transform of the warped frequency domain the modal domain. In the modal domain, mode m lies at the position α_m/f_0 .

COMPUTATION AND INTERPRETATION

According to (9), any member of the β -power class can be computed as an affine TFR of the β -power warping signal followed by a nonlinear T-F coordinate transform. Until the end of the article, we focus on the case of the β -powergram, for which the original affine TFR is the scalogram. This choice minimizes the cross-terms between the different components of the signals, i.e., between the modes. This is an important feature for practical underwater acoustics applications with more than two propagating modes, as it prevents overlap between modes and cross terms. In the following, we present the equations for the β -powergram with power class formalism and show that an equivalent formulation can be obtained using a physics-based approach.

POWER CLASS FORMALISM

The powergram is obtained when the considered affine TFR $T^{(A)}$ is the scalogram. The scalogram $S_X(t, f)$ of the signal $X(f)$ can be computed as the squared magnitude of the wavelet transform

$$S_X(t, f) = |\langle X, H_{t,f} \rangle|^2, \quad (21)$$

where $H_{t,f}$ is the time-shifted and scaled version of the wavelet H : $H_{t,f}(f') = |(f_0/f)|^{1/2} H((f_0/f)f') e^{2\pi j f' t}$. Note that f_0/f is the scale coefficient. Next, the scalogram of the β -warped signal $S_{\mathbf{W}_\beta X}(t, f)$ can be obtained using unitary equivalence [22]:

$$S_{\mathbf{W}_\beta X}(t, f) = |\langle \mathbf{W}_\beta X, H_{t,f} \rangle|^2 = |\langle X, \mathbf{W}_{1/\beta} H_{t,f} \rangle|^2. \quad (22)$$

Finally, the β -powergram $S_X^{(\beta)}(t, f)$ is obtained from (9) by the nonlinear T-F coordinate transform:

$$\begin{aligned} S_X^{(\beta)}(t, f) &= S_{\mathbf{W}_\beta X}\left(\frac{t}{f_0 \tau_\beta(f)}, f_0 \xi_\beta(f/f_0)\right) \\ &= \left| \frac{f_0}{f} \right| \left| \int_{-\infty}^{\infty} X(f') |\beta|^{-1/2} \left| \frac{f'}{f_0} \right|^{-\frac{\beta+1}{\beta}} \right. \\ &\quad \left. H^*\left(f_0 \frac{\xi_\beta(f'/f_0)}{\xi_\beta(f/f_0)}\right) e^{-2\pi j \frac{t}{\tau_\beta(f)} \xi_\beta(f'/f_0)} df' \right|^2. \end{aligned} \quad (23)$$

PHYSICAL APPROACH

It is also possible to obtain a β -based scalogram $S_X^{(\text{phy})}(t, f)$ with a physical approach that does not use power class formalism or unitary equivalence. The change in formalism does not provide a better TFR, but it helps to understand the equations and to physically interpret the results. To compute $S_X^{(\text{phy})}(t, f)$, the wavelet must be adapted to the studied signal. This can be done using a wavelet family for which the wavelet phase corresponds to the modal phase. As the modes have the phase $\phi_m(f) = \alpha_m \xi_\beta(f/f_0)$, one can choose the wavelet family $\{G_{m,f}\}$ with

$$G_{m,f}(f') = G_f(f') e^{-2\pi j \alpha_m \xi_\beta(f'/f_0)}, \quad (24)$$

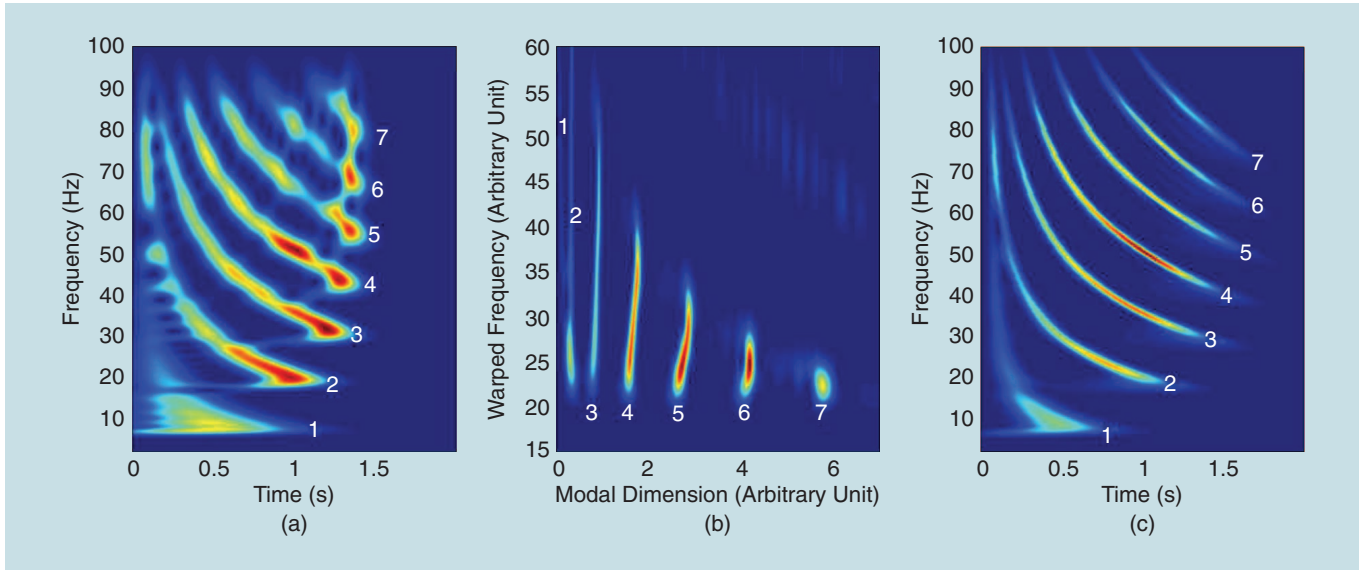
where $G_f(f')$ is a window function that is concentrated around frequency f . As an example, $G_f(f')$ can be a scaled version of the wavelet G : $G_f(f') = |(f_0/f)|^{1/2} G((f_0/f)f')$. This choice allows the easy computing of $S_X^{(\text{phy})}(t, f)$ by modifying an existing scalogram code. Whatever the choice of $G_f(f')$, the family $\{G_{m,f}\}$ leads to a mode-frequency wavelet transform

$$S_X^{(\text{mod})}(\alpha_m, f) = \langle X, G_{m,f} \rangle, \quad (25)$$

where the square magnitude is similar to $S_{\mathbf{W}_\beta X}$, apart from a compressional factor $1/f_0$ in the modal dimension. Consequently, mode m lies at position α_m in the modal dimension associated to $S_X^{(\text{mod})}$, while it lies at position α_m/f_0 in the modal dimension associated to $S_{\mathbf{W}_\beta X}$.

The final step to obtain a β -based scalogram $S_X^{(\text{phy})}(t, f)$ using the physical approach is to go from the mode-frequency domain to the T-F domain. This is achieved by substituting α_m with the time t that corresponds to the mode m group delay

$$t = \alpha_m \tau_\beta(f) \Leftrightarrow \alpha_m = t/\tau_\beta(f). \quad (26)$$



[FIG1] The simulated results. (a) A scalogram of the simulated signal. (b) A scalogram of the inverse Fourier transform of the β -warped signal. (c) β -powergram. The power warping and powergram were computed using $\beta = 1.2$. The scalograms and powergram were computed using Morlet wavelets.

The following β -based T-F scalogram is thus obtained:

$$S_X^{(\text{phy})}(t, f) = |S_X^{(\text{mod})}(t/\tau_\beta(f), f)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} X(f') G_f^*(f') e^{-2\pi j \frac{t}{\tau_\beta(f)} \xi_\beta(f'/f_0)} df' \right|^2. \quad (27)$$

Note that in (27), the phase in the integral is equal to the phase in the integral for powergram computation [see (23)]. Moreover, G_f can be chosen so that the wavelet transform $S^{(\text{mod})}$ is invertible (it must thus respect the closure condition). Note also that G_f can be chosen so that $S^{(\beta)} = S^{(\text{phy})}$. The corresponding G_f is obtained by comparing (27) and (23).

SIMULATION EXAMPLE

The proposed methodology is applied to realistic simulated data that mimics shallow water conditions during the summer. The configuration considered consists of a 100-m-deep water column over a layered bottom. The sound speed profile in the water column is as follows:

- constant sound speed 1,525 m/s from the surface $z = 0$ m to the depth $z = 45$ m
- linear variation 1,525 m/s $\rightarrow$ 1,495 m/s from $z = 45$ m to $z = 55$ m
- constant sound speed 1,495 m/s from $z = 55$ m to the bottom $z = 100$ m.

The seabed is modeled as a fluid (a classical assumption in underwater acoustics). It consists of a homogeneous sediment layer on top of a homogeneous semi-infinite basement. The seabed parameters are

- sediment: width 10 m, sound speed 1,800 m/s, density 1.8
- basement: sound speed 2,000 m/s, density 2.

The source/receiver range is $r = 10$ km. Both the source and the receiver lie on the bottom, so that the modes are (nearly)

equally excited. The frequency-domain impulse response of the waveguide was computed using the ORCA modal code [32]. The source is assumed to be perfectly impulsive. The received signal is thus the simulated impulse response of the waveguide. No noise has been added to the simulation, so that the results are more easily understood. The robustness of the method against noise will be demonstrated on real data in the next section.

The scalogram of the simulated signals is presented in Figure 1(a) with mode numbers labeled in white. Figure 1(a) shows seven modes with relatively good T-F resolution. High-order modes are closer to each other than low-order modes, and they suffer from T-F interference. Mode 1, which has the lowest frequency content, suffers from poor time resolution. Figure 1(b) shows the scalogram of the inverse Fourier transform of the β -warped signal. As explained in the section “Waveguide Invariant-Based Time-Frequency Representations,” warped modes are impulsive signals. Note that warped modes are not perfect impulses, which shows that the waveguide invariant, and particularly (13), is an approximation. However, waveguide invariant approximation is accurate enough such that the T-F representation of the warped modes shows them well separated. The β -warping is thus a useful tool for modal filtering, which is an important issue for the underwater-acoustics community. Indeed, filtered modes serve as input for matched mode processing [33] and other inversion schemes [5], [34]. Figure 1(c) shows the β -powergram. The seven modes are resolved with good resolution. Note that both power warping and the powergram were computed using $\beta = 1.2$. This value was chosen empirically to match the T-F curvature of the modes.

As stated in the section “The Waveguide Invariant,” the waveguide-invariant value is usually $\beta \simeq 1$ in shallow water. However, β is known to change according to the environmental conditions [35]. For example, β can be linked to seabed properties in a

Pekeris waveguide [36]. Depending on the available a priori knowledge of the environmental context, the β value can be chosen empirically or defined accurately using the knowledge of the environment. In either case, it is important that the corresponding TFR is robust to a relative mismatch in the β value. The robustness of the β -powergram is considered in Figure 2. It presents powergrams that were computed for $\beta = 0.5, 1, 1.5$, and 3 . All of these powergrams show a good T-F resolution for each mode, which demonstrates that the method is robust to mismatch in the β value. However, Figure 2(a) and (d), which corresponds to $\beta = 0.5$ and 3 , respectively, shows relatively poor T-F resolution for high-order modes. Indeed, these modes are the modes that interact most with the seabed, which explains why they are more sensitive to an incorrect β value (and thus to an incorrect environmental model).

COMPARISON WITH PHYSICS-BASED TIME-FREQUENCY REPRESENTATIONS BASED ON THE IDEAL WAVEGUIDE MODEL

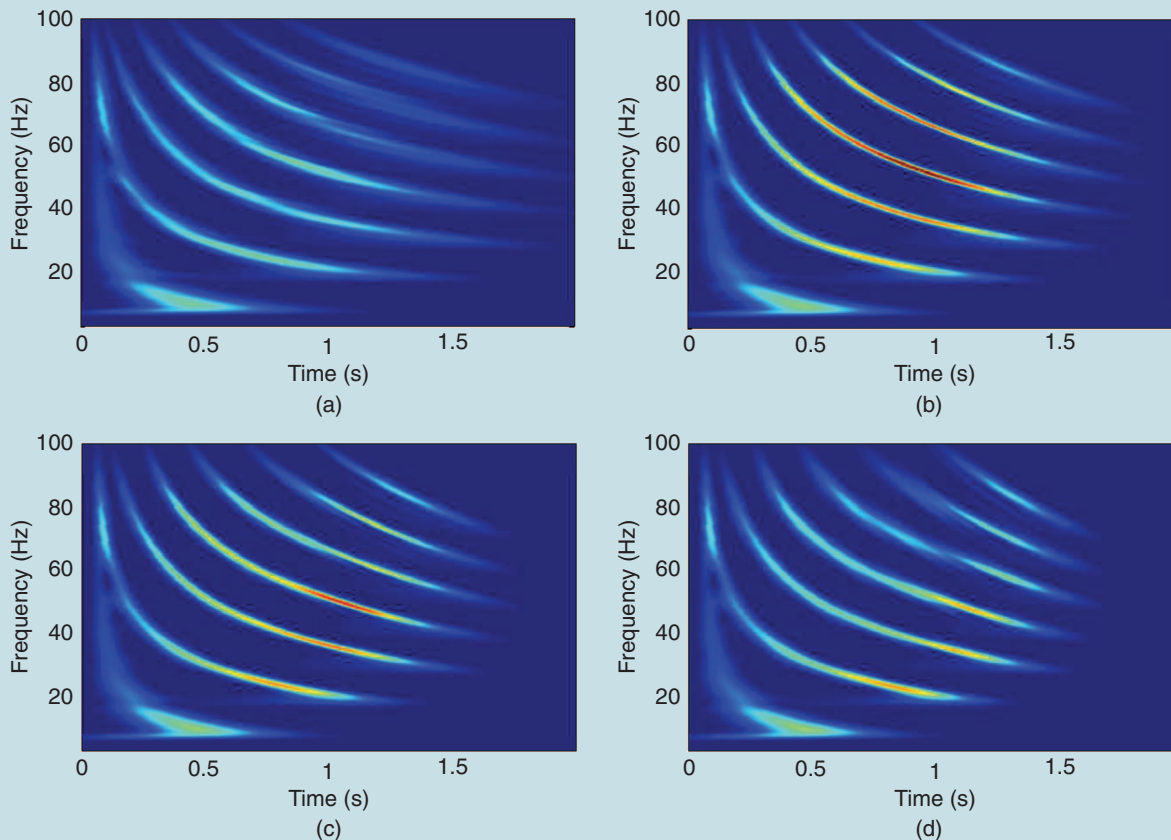
The β -power class provides a general and theoretical framework to analyze the signals received in a dispersive waveguide. In this section, this is compared with other physics-based solutions that allow for dispersion T-F analysis [7], [8], [10]. Physics-based TFRs inject a priori knowledge about the waveguide properties to modify the T-F tiling. This knowledge is usually based on a simple

waveguide model [7], [10], although it can be adaptively refined using optimization [8]. The most common model for dispersion-based signal processing is the ideal waveguide presented in the section “Modal Propagation” [7], [9], [11]. It is thus interesting to compare it with our β -based model.

The modal phase in the ideal waveguide is given by (11), while it is given by (13) under the waveguide-invariant model. If the frequency f is well above the cutoff frequency f_m , the ideal model and the waveguide-invariant model with $\beta = 1$ are both equivalent to a nondispersive wave that would travel at the water sound speed

$$\phi_m^{id}(f) \underset{f \rightarrow \infty}{\sim} \phi_m^{\beta=1}(f) \underset{f \rightarrow \infty}{\sim} \frac{r}{c_w} f. \quad (28)$$

This is consistent with modal propagation. In shallow water, high frequencies correspond to low grazing angles (the energy propagates nearly horizontally), while low frequencies correspond to high grazing angles (the energy propagates nearly vertically). Consequently, high frequencies are not strongly influenced by the waveguide properties. In the limit of infinite frequency, the waves travel horizontally and the waveguide does not influence propagation anymore (there is no dispersion). On the other hand, low frequencies interact strongly with the bottom. It is thus necessary to model the seabed correctly to study low-frequency dispersion, which is the superiority of the waveguide-invariant model. Indeed, the ideal waveguide model has a perfectly rigid bottom



[FIG2] The simulated β -powergram dependence on the value of β . (a) $\beta = 0.5$. (b) $\beta = 1$. (c) $\beta = 1.5$. (d) $\beta = 3$. The powergrams were computed using Morlet wavelets.

that does not model seabed propagation (i.e., no energy penetrates the seabed) while the waveguide invariant conveys information about a more realistic seabed [25], [36]. Consequently, the β -based TFRs can be used to perform accurate dispersion analysis in complex waveguides. This is particularly suitable when seabed interactions are important and can be modeled using a suitable β value.

Waveguide invariant approximation, however, does not correctly model frequency dispersion between the cutoff frequency and the Airy phase. For a given mode, the Airy phase is the frequency at which the group speed is minimum, and thus it corresponds to the last energy arrival in the T-F domain. The energy that corresponds to frequencies between the cutoff frequency and the Airy phase was called *ground wave* by Pekeris [37]. It propagates in the seabed with high group speed and high attenuation. Its T-F content is a slow upsweep going from cutoff frequency to Airy phase, creating a T-F turnaround at the Airy phase. As an example, mode 3 cutoff frequency and Airy phase can be seen in Figure 1(a) at 28 Hz and 31 Hz, respectively. As ground waves are highly attenuated, they are usually masked by noise in experimental marine data (see Figures 3 and 4). However, ground waves can be encountered when considering powerful explosions [4]. Analysis of the T-F turnaround associated with ground waves cannot be achieved for all modes at once. This would require the GDS covariant TFR based on accurate single mode dispersion.

EXPERIMENTAL DATA APPLICATION

This section demonstrates the practical use of the β power class on experimental data. Two different underwater acoustic contexts are considered: active geoacoustic inversion and passive study of marine mammal vocalization. In both cases, the considered source is impulsive and the environment is a complex waveguide (nonisovelocity sound speed profile in the water column, layered seabed, and weak range dependence).

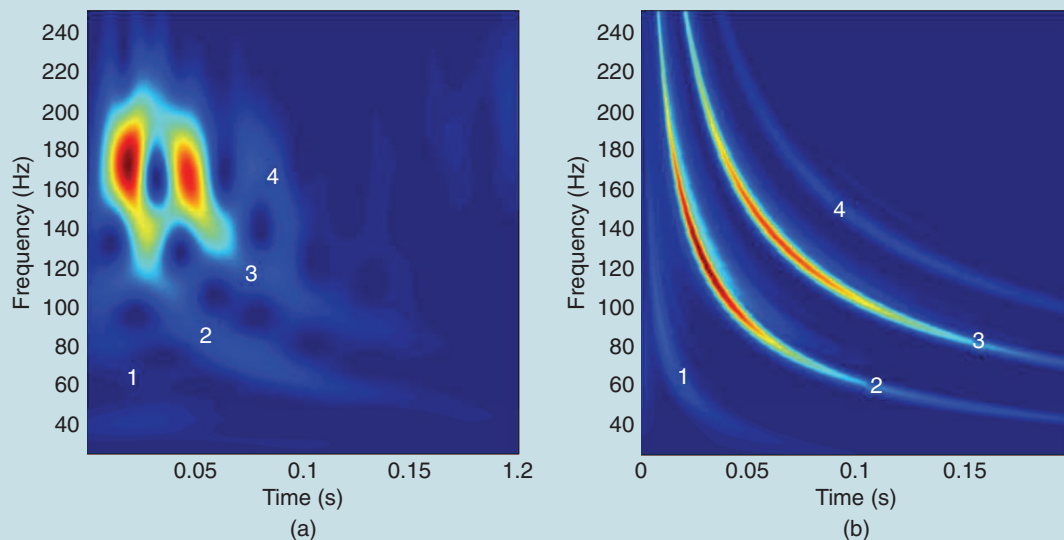
LIGHTBULB DATA: SHALLOW WATER 2006 EXPERIMENT

First, we consider an experimental signal that was recorded on the continental shelf of New Jersey (United States) during the Shallow Water 2006 Experiment [38]. The considered source is a lightbulb implosion, and the corresponding acoustic field was recorded by the Marine Physical Laboratory vertical line array (a single hydrophone is used for this study). In this active context, the T-F dispersion of the signal can be used to infer information about the seabed properties (geoacoustic inversion). More details about the environment and this specific signal can be found in [5].

The source/receiver range, $r \simeq 7$ km, is relatively short for such a low-frequency inversion configuration. The scalogram of the received signal is presented in Figure 3(a). The modes are labeled in white for easier understanding. It can be seen that they are close to each other and interfere together. Classical scalograms cannot be used to infer information about the modal dispersion. The β -powergram ($\beta = 1.25$) is presented in Figure 3(b). It shows better resolution than the classical scalogram, and it can be used to infer dispersion information. The value $\beta = 1.25$ has been chosen empirically to match the T-F curvature of the modes.

RIGHT-WHALE VOCALIZATION: FUNDY BAY DATA

Next, we consider an experimental signal that was recorded in Fundy Bay (Canada) as part of the 2003 Workshop on Detection, Localization, and Classification of Marine Mammals Using Passive Acoustics [39]. The source considered is a right-whale impulsive vocalization that was recorded on a single bottom-moored hydrophone (labeled *H* during the experiment). In this passive context, the T-F dispersion of the signal can be used to estimate the range between the whale and the receiver. More information about the environment can be found in [39], and about this specific signal in [40].



[FIG3] SW06 experimental results. (a) Scalogram of the received signal. (b) β -powergram of the received signal, computed using $\beta = 1.25$. The scalogram and the powergram were computed using Morlet wavelets.

In this passive context, the source/receiver range is not known. It has been estimated in various studies, and it should be $r \simeq 8$ km. The scalogram of the received signal is shown in Figure 4(a). It is nearly impossible to distinguish the modal content of the signal, and the modes are labeled in white to facilitate understanding. Note that because of a low-speed sediment layer, mode 1 is probably trapped in the seabed and so does not appear in the T-F domain. The β -powergram ($\beta = 0.8$) is shown in Figure 3(b), and it has relatively good modal resolution. The β -scalogram is thus a valuable tool to analyze experimental low-frequency data, even when they are recorded in a passive context and in a complicated environment. Note that the value $\beta = 0.8$ was chosen empirically to match the T-F curvature of the modes.

CONCLUSIONS

The power-class TFRs, or, more generally, the GDS covariant TFRs, are suitable TFRs to analyze signals with dispersive group delay. However, their use is limited to monocomponent signals, or to multicomponent signals for which the dispersive properties do not vary from one component to the other. Successful use of the power-class TFRs to analyze signals propagated in a dispersive medium requires that the dispersion can be modeled using a power law. Another desirable property is that the power coefficient κ can be defined using robust physical a priori information about the medium.

This article focuses on dispersive propagation in an oceanic waveguide; especially the low-frequency impulsive sounds propagated in shallow water. This context is particularly challenging as propagation is described by modal theory. Indeed, the signals considered are multicomponent, and each component (called a mode) has a nonlinear group delay that varies from mode to mode. However, it is possible to approximate the waveguide dispersion with a power law $f^{-1/\beta}$, where β is the waveguide

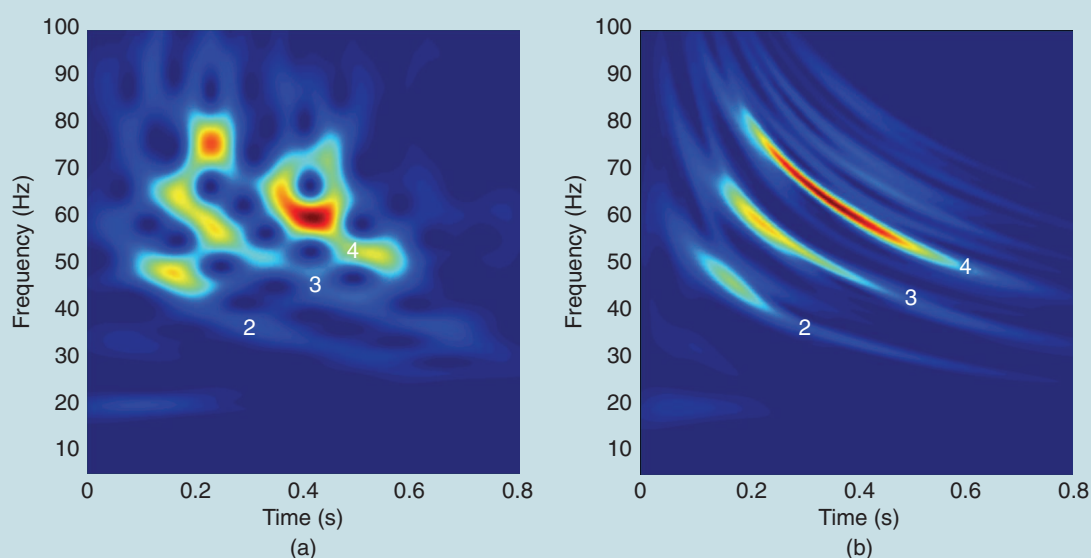
invariant. The waveguide invariant is a scalar widely used in underwater acoustics that characterizes propagation in shallow water. It is possible to define a class of TFRs that are adapted to the modal propagation context. This class benefits from the formalism of the power class (with power coefficient $\kappa = -1/\beta$), while at the same time allowing the inclusion of robust physical a priori information through the waveguide invariant β . Note that single-receiver modal filtering using β -warping can be obtained as a by-product of the power class methodology.

This method is illustrated both on realistic simulation data and experimental data. Two marine data sets that correspond to different underwater acoustic contexts are considered: active geoacoustic inversion and passive bioacoustics. In these difficult practical situations, the proposed method allows us to resolve several modes in the T-F domain, which was impossible with classical TFRs. The β -power class is thus a promising method for analysis of underwater acoustic single-receiver data.

AUTHORS

Julien Bonnel (julien.bonnel@ensta-bretagne.fr) received the Ph.D. degree in signal processing from Grenoble-Institut National Polytechnique (INP), France, in 2010. Since 2010, he has been an assistant professor at Lab-STICC (UMR 6285), Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne in Brest, France. His research in signal processing and underwater acoustics include time-frequency analysis, source detection/localization, geoacoustic inversion, acoustical tomography, passive acoustic monitoring, and bioacoustics. He is a Member of the IEEE and the Acoustical Society of America.

Grégoire Le Touzé (gregoire.le-touze@gipsa-lab.grenoble-inp.fr) received the master's degree in signal processing from Grenoble-INP, France, in 2004 and the Ph.D. degree in 2007. From 2008 to 2010, he was a postdoctoral researcher at the



[FIG4] The Fundy Bay experimental results. (a) Scalogram of the received signal. (b) β -powergram of the received signal, computed using $\beta = 0.8$. The scalograms were computed using Morlet wavelets.

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille, France, and from 2010 to 2012 at the GIPSA-Lab, Grenoble, France. His research interests include seismic and acoustic signal processing, wavefield separation methods, time-frequency and chirplet analysis, and array processing.

Barbara Nicolas (barbara.nicolas@gipsa-lab.grenoble-inp.fr) received the M.S. and Ph.D. degrees in signal processing from Grenoble-INP, France, respectively, in 2001 and 2004. In 2005, she held a postdoctoral position at the French Atomic Energy Commission (C.E.A.) in medical imaging. Since 2006, she has been a CNRS researcher at the GIPSA-Lab in the Image Signal Department, Grenoble, France. In 2008, she was a visiting scientist at SipLab in Faro, Portugal. Her research in signal processing and underwater acoustics include TFRs, array processing, acoustic tomography, underwater source detection and localization, and geoaoustic inversion.

Jérôme I. Mars (jerome.mars@gipsa-lab.grenoble-inp.fr) received the Ph.D. degree in signal processing (1988) from the Institut National Polytechnique of Grenoble. From 1989 to 1992, he was a postdoctoral researcher at the Centre des Phénomènes Aléatoires et Géophysiques, Grenoble. From 1992 to 1995, he was a visiting lecturer and scientist at the Materials Sciences and Mineral Engineering Department at the University of California, Berkeley. He is currently a professor of signal processing in the Image-Signal Department at GIPSA-Lab (UMR 5216), Grenoble Institute of Technology. He is the head of the Image-Signal Department. His research interests include seismic and acoustic signal processing, source separation methods, time-frequency, and time-scale characterization. He is a Member of the IEEE and the European Association of Geoscientists and Engineers.

REFERENCES

- [1] K. Xu, D. Ta, and W. Wang, "Multiridge-based analysis for separating individual modes from multimodal guided wave signals in long bones," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 57, no. 11, pp. 2480–2490, 2010.
- [2] D. Mihovilić and R. Bracewell, "Whistler analysis in the time-frequency plane using chirplets," *J. Geophys. Res.*, vol. 97, no. A11, pp. 17199–17204, 1992.
- [3] J. der Kruk, N. Diamanti, A. Giannopoulos, and H. Vereecken, "Inversion of dispersive GPR pulse propagation in waveguides with heterogeneities and rough and dipping interfaces," *J. Appl. Geophys.*, vol. 81, pp. 88–96, June 2011.
- [4] G. Potty, J. Miller, J. Lynch, and K. Smith, "Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 108, no. 3, pp. 973–986, 2000.
- [5] J. Bonnel, C. Gervaise, B. Nicolas, and J. Mars, "Single receiver geoaoustic inversion using modal reversal," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 131, no. 1, pp. 119–128, 2012.
- [6] C. Ioana, A. Jarrot, C. Gervaise, Y. Stéphan, and A. Quinquis, "Localization in underwater dispersive channels using the time-frequency-phase continuity of signals," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 58, no. 8, pp. 4093–4107, 2010.
- [7] C. Chen, J. Miller, G. Boudreaux-Bartels, G. Potty, and C. Lazauski, "Time-frequency representations for wideband acoustic signals in shallow water," in *Proc. OCEANS 2003*, vol. 5, pp. SP2903–SP2907.
- [8] J. Hong, K. Sun, and Y. Kim, "Dispersion-based short-time Fourier transform applied to dispersive wave analysis," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 117, no. 5, pp. 2949–2960, 2005.
- [9] Y. Jiang and A. Papandreou-Suppappola, "Discrete time-frequency characterizations of dispersive linear time-varying systems," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 55, no. 5, pp. 2066–2076, 2007.
- [10] G. Le Touzé, B. Nicolas, J. Mars, and J. Lacoume, "Matched representations and filters for guided waves," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 57, no. 5, pp. 1783–1795, 2009.
- [11] J. Bonnel, B. Nicolas, J. Mars, and S. Walker, "Estimation of modal group velocities with a single receiver for geoaoustic inversion in shallow water," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 128, no. 2, pp. 719–727, 2010.
- [12] L. De Marchi, M. Ruzzene, B. Xu, E. Baravelli, and N. Speciale, "Warped basis pursuit for damage detection using lamb waves," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 57, no. 12, pp. 2734–2741, 2010.
- [13] F. Hlawatsch and G. Boudreaux-Bartels, "Linear and quadratic time-frequency signal representations," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 9, no. 2, pp. 21–67, 1992.
- [14] A. Papandreou-Suppappola, "Generalized time-shift covariant quadratic time-frequency representations with arbitrary group delays," in *Proc. 29th Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers*, 1995, pp. 553–557.
- [15] A. Papandreou-Suppappola, R. Murray, B. Iem, and G. Boudreaux-Bartels, "Group delay shift covariant quadratic time-frequency representations," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 49, no. 11, pp. 2549–2564, 2001.
- [16] F. Hlawatsch, A. Papandreou, and G. Boudreaux-Bartels, "The power classes of quadratic time-frequency representations: A generalization of the affine and hyperbolic classes," in *Proc. 27th Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers*, 1993, pp. 1265–1270.
- [17] A. Papandreou-Suppappola, F. Hlawatsch, and G. Boudreaux-Bartels, "Power class time-frequency representations: Interference geometry, smoothing, and implementation," in *Proc. IEEE-SP Int. Symp. Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, 1996, pp. 193–196.
- [18] F. Hlawatsch, A. Papandreou-Suppappola, and G. Boudreaux-Bartels, "The power classes-quadratic time-frequency representations with scale covariance and dispersive time-shift covariance," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 47, no. 11, pp. 3067–3083, 1999.
- [19] S. Chuprov, "Interference structure of a sound field in a layered ocean," in *Ocean Acoustics, Modern State*, 1982, pp. 71–91.
- [20] F. Jensen, W. Kuperman, M. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, 2nd ed. New York: American Institute of Physics, 2011.
- [21] A. Papandreou-Suppappola and G. Boudreaux-Bartels, "The effect of mismatching analysis signals and time-frequency representations," in *Proc. IEEE-SP Int. Symp. Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, 1996, pp. 149–152.
- [22] R. Baraniuk and D. Jones, "Unitary equivalence: A new twist on signal processing," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 43, no. 10, pp. 2269–2282, 1995.
- [23] K. Cockrell and H. Schmidt, "Robust passive range estimation using the waveguide invariant," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 127, no. 5, pp. 2780–2789, 2010.
- [24] S. Rakotonarivo and W. Kuperman, "Model-independent range localization of a moving source in shallow water," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 132, no. 4, pp. 2218–2223, 2012.
- [25] K. Heaney, "Rapid geoaoustic characterization using a surface ship of opportunity," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 29, no. 1, pp. 88–99, 2004.
- [26] Q. Ren and J. Hermand, "Acoustic striation processing for ocean bottom characterization," in *Proc. OCEANS, 2011 IEEE-Spain*, 2011, pp. 1–6.
- [27] R. Goldhahn, G. Hickman, and J. Krolik, "A waveguide invariant adaptive matched filter for active sonar target depth classification," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 129, no. 4, pp. 1813–1824, 2011.
- [28] D. Rouseff and L. Zurk, "Striation-based beamforming for estimating the waveguide invariant with passive sonar," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 130, no. 2, pp. EL76–EL81, 2011.
- [29] G. D'Spain and W. Kuperman, "Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 106, no. 5, pp. 2454–2468, 1999.
- [30] D. Gao, N. Wang, and H. Wang, "A dedispersion transform for sound propagation in shallow water waveguide," *J. Comput. Acoust.*, vol. 18, no. 3, pp. 245–257, 2010.
- [31] L. Brekhovskikh, Y. Lysanov, I. Lysanov, and I. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*. New York: Springer Verlag, 2003.
- [32] E. Westwood, C. Tindle, and N. Chapman, "A normal mode model for acousto-elastic ocean environments," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 100, no. 6, p. 3631, 1996.
- [33] T. Yang, "Effectiveness of mode filtering: A comparison of matched-field and matched-mode processing," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 87, no. 5, p. 2072, 1990.
- [34] A. Newhall, Y. Lin, J. Lynch, M. Baumgartner, and G. Gawarkiewicz, "Long distance passive localization of vocalizing Sei whales using an acoustic normal mode approach," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 131, no. 2, p. 1814, 2012.
- [35] D. Rouseff and R. Spindel, "Modeling the waveguide invariant as a distribution," *AIP Conf. Proc.*, vol. 621, pp. 137–150, May 2001.
- [36] E. Shang, J. Wu, and Z. Zhao, "Relating waveguide invariant and bottom reflection phase-shift parameter P in a Pekeris waveguide," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 131, no. 5, pp. 3691–3697, 2012.
- [37] C. Pekeris, "Theory of propagation of explosive sound in shallow water," *Memoir Geol. Soc. Amer.*, vol. 27, 1948.
- [38] D. Tang, J. Moum, J. Lynch, P. Abbot, R. Chapman, P. Dahl, T. Duda, G. Gawarkiewicz, S. Glenn, J. Goff, H. Graber, J. Kemp, A. Maffei, J. Nash, and A. Newhall, "Shallow water 06: A joint acoustic propagation/nonlinear internal wave physics experiment," *Oceanography*, vol. 20, no. 4, pp. 156–167, 2007.
- [39] F. Desharnais, M. Laurinoli, D. Schillinger, and A. Hay, "A description of the workshop data sets," *Can. Acoust.*, vol. 32, no. 2, pp. 33–38, 2004.
- [40] J. Bonnel, G. Le Touzé, B. Nicolas, J. Mars, and C. Gervaise, "Automatic and passive whale localization in shallow water using gunshots," in *Conf. IEEE OCEANS 2008*, 2009, pp. 1–6.

Bayesian geoacoustic inversion of single hydrophone light bulb data using warping dispersion analysis

Julien Bonnel^{a)}

Lab-STICC, ENSTA Bretagne (Université Européenne de Bretagne), 2 rue François Verny,
29806 Brest Cedex 9, France

Stan E. Dosso and N. Ross Chapman

School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria, P.O. Box 3055, Victoria,
British Columbia V8W 3P6, Canada

(Received 22 February 2012; revised 12 September 2012; accepted 18 September 2012)

This paper presents geoacoustic inversion of a light bulb implosion recorded during the Shallow Water 2006 experiment. The source is low frequency and impulsive, the environment is shallow water, and the acoustic signal is recorded using a single receiver. In this context, propagation is described by modal theory, and inversion is carried out by matching modal dispersion curves in the time-frequency domain. Experimental dispersion curves are estimated using an advanced signal processing method called warping, allowing inversion to be carried out at a relatively short range (≈ 7 km). Moreover, the inversion itself is performed using Bayesian methodology. This allows inference of the seabed structure from the data, including the number of seabed layers resolved, optimal estimates of the seabed parameters, and quantitative uncertainty estimates. Inversion results of the experimental data are in good agreement with both ground truth and estimates from other experimental data in the same region. © 2013 Acoustical Society of America.
[http://dx.doi.org/10.1121/1.4809678]

PACS number(s): 43.30.Pc, 43.60.Pt, 43.30.Bp, 43.60.Hj [JIA]

Pages: 120–130

I. INTRODUCTION

Underwater oceanic remote sensing over great distances is usually performed using acoustic waves. In shallow water and littoral environments, the sound propagation is greatly influenced by the seabed properties. Estimating these properties *in situ* using ocean acoustics is an active research field, and various geoacoustic inversion methods have been developed. Most existing methods are based on the use of an array of synchronized sensors.^{1–3} Recently a few single receiver methods have been proposed.^{4–8} These methods sacrifice the spatial information provided by an array, but greatly reduce cost and complexity for at-sea recording systems. However, inversion can be performed by considering broadband sources, and taking advantage of the frequency diversity. This paper is based on time-frequency (TF) analysis of low-frequency ($f < 250$ Hz) single-sensor data recorded in shallow water ($D < 200$ m). It considers the use of new warping approaches in signal processing.^{9,10} At the ranges considered in this paper ($1 < r < 10$ km), warping provides high-resolution TF information that can be inverted for seabed properties. Inversion is here performed using a Bayesian methodology which provides optimal estimates of parameters of interest and rigorously quantifies the uncertainty of these estimates.¹¹

In the context studied in this paper ($f < 250$ Hz and $D < 200$ m), the oceanic environment acts as a dispersive waveguide, and propagation can be described by normal-mode theory.¹² The acoustic field consists of several modal

components, with each mode propagating dispersively. Because of waveguide dispersion, the source signal is distorted during propagation, which tends to complicate the received signal and often limits the ability to directly recover information from the signal. On the other hand, the dispersion effects convey information about the propagation medium. If properly characterized using suitable signal processing methods, dispersion can be used as the basis of an inversion approach.

Most dispersion based inversion schemes consist of two distinct steps. Dispersion is first characterized by estimating dispersion curves from the received signal. Inversion is then performed by matching the estimated dispersion curves with simulated replicas. The process has been successfully applied in underwater acoustics to infer seabed sound speed from water-borne mode dispersion using a single receiver and an impulsive low-frequency source.^{5,13–18} In this context, dispersion curves are estimated using TF analysis of the received signal. However, modal resolution (i.e., the ability to isolate individual modes) in the TF domain is range dependent: Because of dispersion, modal separation increases with range. Dispersion curve estimation is straightforward only when range is large enough,^{5,13} but requires advanced signal processing for shorter ranges.^{15–21} In this case, one solution is to transform the signal using warping^{9,10} so that it becomes adapted to the intrinsic limitations of TF analysis.^{16,17} Note that dispersion inversion for shear wave speed profiles has also been applied to interface waves (Rayleigh waves on land²² and Scholte waves on the seabed^{23,24}).

Once dispersion curves are estimated, they can be used as the input of any inversion algorithm. In this paper, inversion is applied to light bulb data collected during the

^{a)} Author to whom correspondence should be addressed. Electronic mail: julien.bonnel@ensta-bretagne.fr

Shallow Water 2006 (SW06) experiment, and dispersion curves are estimated using warping. Indeed, a preliminary study of this light bulb data has been reported by Bonnel and Chapman,¹⁷ showing that warping is a suitable tool that can be used at the core of a dispersion curve inversion algorithm. However, that work did not address fundamental questions about the amount of the seabed structure that can be resolved using low-frequency single-receiver data, and the uncertainty of the estimated geoacoustical parameters. To address these issues, this paper solves the inverse problem (dispersion curve matching) using non-linear Bayesian methodology with a rigorous evaluation of data errors and model parametrization.

The remainder of this paper is organized as follows. Section II briefly describes the SW06 experiment and justifies the choice of the particular light bulb data. Section III reviews the dispersion curve estimation while Sec. IV presents the inversion theory and algorithms. Section V presents and discusses the results of the experimental data inversion, and compares them with results from experiments carried out at the same SW06 site. Finally, Sec. VI summarizes the work and gives concluding remarks.

II. EXPERIMENT DESCRIPTION

A. The SW06 experiment

In the summer of 2006, a series of SW06 experiments was conducted on the New Jersey continental shelf.²⁵ One objective of these experiments was to characterize the seabed in a complex oceanic environment within the frequency band 50 to 20 000 Hz. This paper focuses on the low-frequency band ($f < 200$ Hz). On August 31, light bulbs were deployed as low-frequency impulsive sources: Their spectrum is roughly flat over the 30 to 200 Hz band. The corresponding acoustic field was recorded by the Marine Physical Laboratory vertical line array (MPL-VLA1).

B. Data description

A single light bulb implosion is used as the source for this paper. The source position was (39°04.72'N, 72°59.86'W) and its depth was $z_s \simeq 22$ m. The acoustic field was collected on MPL-VLA1 located around (39° 01.44'N, 73°02.39'W). The VLA consisted of 16 hydrophones, but only one hydrophone is used for this study. Its depth was $z_r = 67.1$ m, near the sea floor.

The source/receiver combination was carefully chosen so that the propagation track can be considered as range independent. The range, $r \simeq 7$ km, is relatively short for such a low-frequency configuration. This imposes special considerations for data processing (see Sec. III C), but enables study along a track for which seabed variability is small. The source/receiver orientation was chosen along the shelf, so that bathymetry is roughly constant along the track ($D \simeq 79$ m). Moreover, the experimental area has been extensively studied using CHIRP sonar survey in 2001 to 2002, and additional measurements (grab samples and *in situ* probes) were taken during the SW06 experiment.²⁶ Bottom properties along the source/receiver track are presented in Fig. 1. Note that the

vertical axis is two-way travel time. The main feature of the bottom is the R horizon, which is a strong reflector about 25 m below the seabed surface. The other continuous reflector, the Erose boundary, is much weaker. Based on the available ground truth information, the inversion will be carried out assuming a range-independent model of the bottom.

During the light bulb experiment, the water column was monitored using a conductivity-temperature-depth probe (CTD41). The measured sound speed profile is shown in Fig. 2 and is treated as known in our inversion scheme.

III. DISPERSION CURVE ESTIMATION

A. Modal propagation theory

In the studied context, low-frequency sound ($f < 250$ Hz) in shallow water ($D < 200$ m), propagation can be described by normal-mode theory. Considering a broadband source emitting at depth z_s in a range-independent waveguide, the spectral component of the pressure field $Y(f)$ received at depth z_r after propagation over a range r is given by¹²

$$Y(f) \approx \sum_{m=1}^K Q S(f) \Psi_m(f, z_s) \Psi_m(f, z_r) \frac{e^{i r k_{rm}(f) - r \beta_m(f)}}{\sqrt{k_{rm}(f)} r}, \quad (1)$$

where K is the number of propagating modes, and $k_{rm}(f)$, $\beta_m(f)$ and Ψ_m are the horizontal wavenumber, attenuation coefficient, and modal depth function of the mode m at frequency f , respectively. The quantity $S(f)$ is the source spectrum and $Q = e^{i\pi/4}/\sqrt{8\pi\rho(z_s)}$ represents a constant factor with $\rho(z_s)$ as the water density at the source depth z_s .

B. Single receiver context

The signal received on a single receiver can be represented in the TF domain using short-time Fourier transform (STFT).²⁷ A convenient representation of the signal is obtained by computing the spectrogram, i.e., the square modulus of the STFT. As an example, Fig. 3(a) shows the spectrogram of the light bulb signal recorded during the SW06 experiment.

In the TF domain, modes are concentrated along the dispersion curves with modal travel time given by^{5,16}

$$t_m(f) = \frac{r}{v_{gm}(f)}, \quad (2)$$

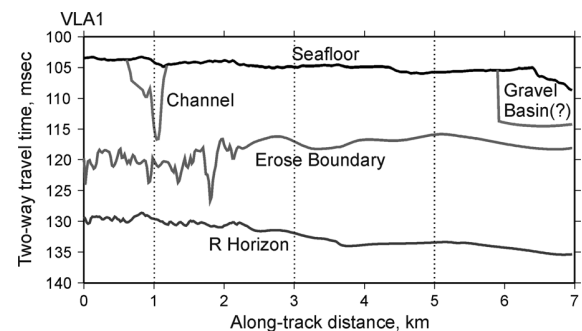


FIG. 1. Chirp sonar data along the source/receiver track obtained during the experiment (Ref. 26).

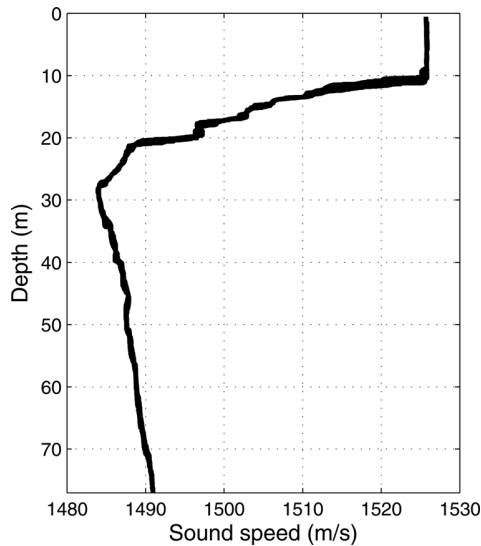


FIG. 2. Sound-speed profile in the water column measured on CTD41 during the SW06 experiment.

where $v_{gm}(f)$ is the group speed of mode m at frequency f . Dispersion curves, which include environmental information through v_{gm} , can be used as an input for a geoacoustic inversion algorithm. As an illustration, the estimated and the modeled dispersion curve computed for the inversion result are superimposed in Fig. 3(a). Note that in terms of signal processing, Eq. (2) can be derived using the group delay formulation.¹⁶

C. High resolution estimation of the dispersion curves

From a signal processing point of view, the received signal is multicomponent (several modes are propagating) and each component is a non-linear frequency modulation (dispersion curves are not straight lines). When the range is long enough, the modes are fully resolved in the TF domain, and dispersion curve estimation is not problematic.^{5,13} When the range is shorter, the modes interfere in the TF domain [for example, see modes 2 and 3 around 150 Hz in Fig. 3(a)], and dispersion curve estimation requires advanced signal

processing. One solution is to transform the received signal so that it becomes adapted to the resolution of the TF domain. This can be done using warping,⁹ a model-based transformation designed to linearize the signal phase. In our context, warped modes become continuous wave (CW) tones, and thus horizontal in the TF domain.

Warping operates on a given signal $y(t)$ according to⁹

$$\mathbf{W}y(t) = \sqrt{|w'(t)|}y[w(t)], \quad (3)$$

where $\mathbf{W}y(t)$ is the warped signal and $w(t)$ is the warping function with $w'(t)$ its time derivative. Note that warping is an invertible transformation. Any warped signal can be unwarped using $w^{-1}(t)$ as the new warping function.

Warping can be adapted to any physical situation by choosing the suitable $w(t)$. Dispersion based warping has been introduced by Le Touzé *et al.*¹⁰ The corresponding warping function is

$$w(t) = \sqrt{t^2 + t_r^2}, \quad (4)$$

with $t_r = r/c_w$ where c_w is the water sound speed. Note that with this definition, $w(t)$ is adapted to the case of an ideal iso-speed waveguide with a rigid bottom. However, Bonnel *et al.*^{16,28} have shown that warping defined using Eq. (4) is a robust transformation, which can be applied to most low-frequency shallow-water scenarios without detailed knowledge of the environment or the precise propagation range (t_r can be determined empirically without knowing r nor c_w). As an example, Fig. 3(b) presents the warped version of the SW06 received light bulb signal using parameters $r = 7000$ m and $c_w = 1500$ m/s. As the real environment differs from the ideal waveguide model, the modes are not perfect CW tones. Nevertheless, warping is robust enough so that the warped modes are fully resolved in the TF domain. Once the signal is properly warped, the (warped) modes can be easily filtered in the TF domain using a simple threshold, and then unwarped using $w^{-1}(t)$. Each filtered mode is a mono-component signal, and the dispersion curves can be estimated using classical signal processing methods. To obtain proper estimation, dispersion curves are extracted from the reassigned spectrogram²⁹ of each filtered mode. Reassignment is a process which

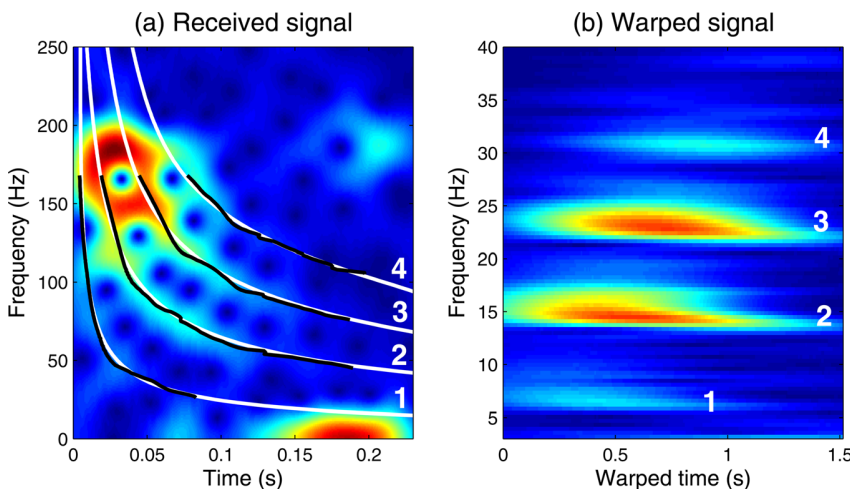


FIG. 3. (Color online) Experimental signals. (a) Spectrogram of the received signal and (b) spectrogram of the corresponding warped signal (arbitrary linear scale). Estimated (black) and modeled (white) dispersion curves are superimposed on the received signal spectrogram in (a). On each spectrogram, white numbers indicate the mode numbers.

improves the resolution of any bilinear TF (or timescale) representation. Its key point is to reallocate the energy in the TF plane from the point it is computed to the center of gravity of the energy concentration. Note that reassignment has previously been successfully applied in the context of modal dispersion analysis in the TF domain.³⁰ In the short-range context of this paper, the modes interfere together in the TF domain, and reassignment must be applied after modal separation (using warping).

The full dispersion curve estimation scheme has been used by Bonnel and Chapman on the SW06 light bulb data.¹⁷ The corresponding estimated dispersion curves are shown in black in Fig. 3(a). These estimated curves will be used as an input for the Bayesian inverse algorithm in this paper.

IV. INVERSE THEORY

This section describes a general Bayesian approach to geoaoustic inversion.^{11,31–37} Let $\mathcal{I}$ denote the model specifying the choice of parameterization for the physical system under investigation (e.g., the seabed), and let $\mathbf{m}$ be a vector of M free parameters representing a realization of $\mathcal{I}$. Let $\mathbf{d}$ represent N measured data which constrain the model. In a Bayesian approach, these quantities are considered random variables related via Bayes' rule

$$P(\mathbf{m}|\mathbf{d}, \mathcal{I}) = \frac{P(\mathbf{d}|\mathbf{m}, \mathcal{I})P(\mathbf{m}|\mathcal{I})}{P(\mathbf{d}|\mathcal{I})}. \quad (5)$$

Model selection is considered at the end of this section; until then the dependence on model $\mathcal{I}$ is suppressed for simplicity. In Eq. (5), $P(\mathbf{m}|\mathbf{d})$ is the posterior probability density (PPD), $P(\mathbf{m})$ is the prior distribution, and $P(\mathbf{d}|\mathbf{m})$ represents the conditional probability density for $\mathbf{d}$, which is interpreted as the likelihood of $\mathbf{m}$ for the (fixed) measured data

$$P(\mathbf{d}|\mathbf{m}) = L(\mathbf{m}) \propto \exp[-E(\mathbf{m})], \quad (6)$$

where E is the data misfit function (considered below). A generalized misfit combining data and prior can be defined as

$$\phi(\mathbf{m}) = E(\mathbf{m}) - \log_e P(\mathbf{m}), \quad (7)$$

and the PPD written as

$$P(\mathbf{m}|\mathbf{d}) = \frac{\exp[-\phi(\mathbf{m})]}{\int \exp[-\phi(\mathbf{m}', \mathbf{d})] d\mathbf{m}'}, \quad (8)$$

where the domain of integration spans the M -dimensional parameter space.

In Bayesian inversion, the multi-dimensional PPD is usually interpreted in terms of model-parameter estimates and uncertainties. Of interest in this paper are the maximum *a posteriori* (MAP) model, the mean model, the posterior model covariance matrix, and one- and two-dimensional marginal probability densities, defined, respectively, as

$$\hat{\mathbf{m}} = \arg \max_{\mathbf{m}} P(\mathbf{m}|\mathbf{d}) = \arg \max_{\mathbf{m}} \phi(\mathbf{m}), \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{m}} = \int \mathbf{m}' P(\mathbf{m}'|\mathbf{d}) d\mathbf{m}', \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_m = \int (\mathbf{m} - \bar{\mathbf{m}})(\mathbf{m} - \bar{\mathbf{m}})^T P(\mathbf{m}|\mathbf{d}) d\mathbf{m}, \quad (11)$$

$$P(m_i|\mathbf{d}) = \int \delta(m_i - m'_i) P(\mathbf{m}'|\mathbf{d}) d\mathbf{m}', \quad (12)$$

$$P(m_i, m_j|\mathbf{d}) = \int \delta(m_i - m'_i) \delta(m_j - m'_j) P(\mathbf{m}'|\mathbf{d}) d\mathbf{m}'. \quad (13)$$

MAP estimates in this paper are computed by minimizing $\phi(\mathbf{m})$ using adaptive simplex simulated annealing,³⁸ a hybrid optimization algorithm that combines the local downhill-simplex method³⁹ within a very fast simulated reannealing global search.⁴⁰ Integrals of the PPD, as in Eqs. (10)–(13), are estimated numerically using the Markov-chain Monte Carlo method of Metropolis-Hasting sampling,^{41,42} with parameter perturbations drawn in a principal-component parameter space for efficiency.³⁶

To define the data misfit, $E(\mathbf{m})$, it is required to specify the statistical distribution of the data errors. In cases where the error distribution is not known independently, a good strategy is to choose a simple distribution (e.g., Gaussian) and estimate the statistical parameters (variances/covariances as needed) from the data. *A posteriori* statistical tests on residuals should be carried to check whether there is evidence against the initial assumptions (carried out in Sec. V). Consider a data set composed of K subsets $\mathbf{d}_k$ corresponding to dispersion curves for K modes, with the k th set comprised of N_k data and $\sum_k N_k = N$. Assuming the data errors are Gaussian-distributed random variables with data covariance matrix $\mathbf{C}_k$ for the k th mode, the likelihood function is given by

$$L(\mathbf{m}) = \prod_{k=1}^K \frac{1}{(2\pi)^{N_k/2} |\mathbf{C}_k|^{1/2}} \times \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_k(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_k^{-1} (\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_k(\mathbf{m})) \right], \quad (14)$$

where $\mathbf{d}_k(\mathbf{m})$ represents modeled data.

In many cases the error statistics, including both measurement and theory errors, are unknown and the covariance matrices $\mathbf{C}_k$ must be estimated from the data. Consider first the common approximation of independent, identical errors and diagonal covariance matrices $\mathbf{C}_k = \nu_k \mathbf{I}$, where ν_k is the variance for the k th mode and $\mathbf{I}$ is the identity matrix. In this case, the likelihood function is

$$L(\mathbf{m}) = \prod_{k=1}^K \frac{1}{(2\pi\nu_k)^{N_k/2}} \exp[-|\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_k(\mathbf{m})|^2 / (2\nu_k)], \quad (15)$$

and variances can be estimated by maximizing the likelihood: setting $\partial L / \partial \nu_k = 0$ leads to

$$\hat{\nu}_k = |\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_k(\mathbf{m})|^2 / N_k. \quad (16)$$

To obtain an appropriate estimate for $\mathbf{m}$ in Eq. (16), $\hat{\nu}_k$ is substituted for ν_k in Eq. (15) to obtain the misfit function^{34,35}

$$E(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K N_k \log_e |\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_k(\mathbf{m})|^2. \quad (17)$$

The estimate $\hat{\mathbf{m}}$ is obtained by minimizing this misfit using numerical optimization.

Diagonal covariance matrices are adequate provided the data errors are uncorrelated. The statistical properties of the errors can be investigated by considering data residuals (the difference between measured and best predicted data), which may be considered a realization of the error process. In particular, if the assumption of Gaussian-distributed errors with covariance $\mathbf{C}_k$ is justified, the standardized residuals

$$\mathbf{r}_k(\hat{\mathbf{m}}) = \mathbf{C}_k^{-1/2} [\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_k(\hat{\mathbf{m}})], \quad (18)$$

should represent an uncorrelated Gaussian random process with unit standard deviation, where $\mathbf{C}_k^{1/2}$ is the Cholesky decomposition of $\mathbf{C}_k$. This can be investigated quantitatively using statistical tests.³² The runs test can be applied to determine if there is significant evidence against the null hypothesis that the standardized residuals are uncorrelated (i.e., that $\mathbf{C}_k$ adequately represents the error correlations). The Kolmogorov-Smirnov (KS) test can be applied to investigate the null hypothesis that errors are Gaussian distributed. Both tests are quantified in terms of a p value which gives the probability of obtaining a test statistic as extreme as that observed assuming the null hypothesis is true: Conventionally, $p > 0.05$ indicates no significant evidence against the null hypothesis.

If standardized residuals computed with a diagonal covariance matrix indicate correlated errors, an estimate of the full covariance matrix is required. Assuming the residuals represent a stationary, ergodic random error process, Toeplitz covariance matrices can be estimated from the residuals as³³

$$\hat{C}_{ij} = \frac{1}{N_k} \sum_{l=1}^{N_k - |i-j|} (r_l - \bar{r})(r_{l+|i-j|} - \bar{r}), \quad (19)$$

where $\bar{r}$ is the residual mean, and the dependence on $\hat{\mathbf{m}}$ and modal subscripts k are suppressed for clarity. If the residuals are quasi-stationary (statistics change slowly across the residuals), non-Toeplitz covariance matrices can be estimated in a three-step process as follows.³⁷ First, running standard-deviation estimates σ_i are computed as the root-mean-square (rms) average over residuals within a moving rectangular window centered on i th point and are used to weigh the residuals according to

$$r'_i = \frac{r_i}{\sigma_i} \quad (20)$$

(window length is set according to the correlation length scale of the residuals). Second, applying r'_i in Eq. (19) yields

a Toeplitz data covariance matrix $\hat{\mathbf{C}}'$. Third, the matrix is scaled by the rms standard deviations to yield non-Toeplitz matrices

$$\hat{C}_{ij} = \sigma_i \sigma_j \hat{C}'_{ij}. \quad (21)$$

Once appropriate covariance matrices are estimated (such that standardized residuals pass the runs test), they are applied in inversion to compute the final MAP model and parameter uncertainties.

Determining an appropriate model parameterization (e.g., number of seabed layers) is another important aspect of any inversion. Over-parameterization (too many layers) under-constrains parameters and can lead to a spurious model structure and to over-estimating uncertainties. Under-parameterization (too few layers) can leave a structure unresolved, biasing estimates and under-estimating uncertainties. The model should be chosen objectively as the simplest parameterization consistent with the resolving power of the data.

In Bayes' rule (5), the conditional probability $P(\mathbf{d}|\mathcal{I})$ of the measured data for a particular model parameterization can be considered the likelihood of the parameterization given the data, referred to as the Bayesian evidence for $\mathcal{I}$. Since the evidence serves as a normalizing factor in Bayes' rule, it can be written

$$P(\mathbf{d}|\mathcal{I}) = \int P(\mathbf{d}|\mathbf{m}, \mathcal{I}) P(\mathbf{m}|\mathcal{I}) d\mathbf{m}. \quad (22)$$

Unfortunately, this integral is particularly challenging to evaluate.^{43,44} Alternatively, an asymptotic point estimate, the Bayesian information criterion (BIC), can be used^{45,46}

$$-2 \log_e P(\mathbf{d}|\mathcal{I}) \approx \text{BIC} = -2 \log_e L(\hat{\mathbf{m}}) + M \log_e N. \quad (23)$$

For the development here, this can be written, within an additive constant, as

$$\text{BIC} = 2E(\hat{\mathbf{m}}) + M \log_e N. \quad (24)$$

The parameterization with the smallest BIC value represents the most appropriate model: The first term on the right of Eq. (24) favors models with low misfits; however, this is balanced by the second term which applies a penalty for additional free parameters.

V. INVERSION RESULTS

Figure 4 presents the estimated dispersion curves for the first four modes: $\mathbf{d}_1$, $\mathbf{d}_2$, $\mathbf{d}_3$, and $\mathbf{d}_4$.⁴⁷ These four vectors will be used as an input for the inversion algorithm described in Sec. IV. Note that the time axis origin has been set so that $t = 0$ corresponds roughly to the first arrival of the light bulb signal on the receiver (in the following, the shot instant dt will thus be negative).

A. Model selection and data error estimation

The seabed model parametrizations considered here consist of an unknown number of uniform sediment layers

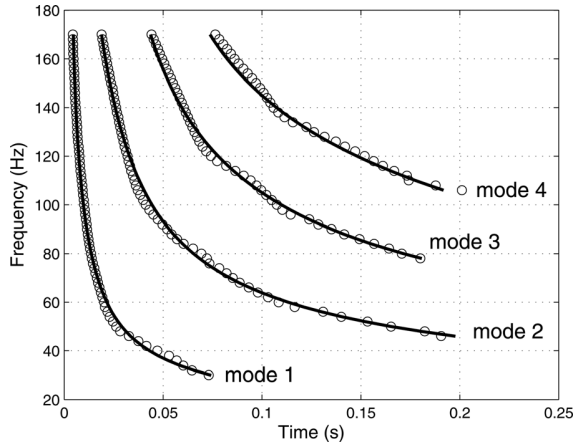


FIG. 4. Dispersion curves of the received signal. The circles correspond to the estimated dispersion curves using warping while the continuous lines show the curves predicted for the MAP model estimate.

over a semi-infinite bottom. Each layer is parametrized by its unknown thickness h , sound speed v_p , and density ρ , while the bottom is parametrized by its sound speed v_{pb} and density ρ_b . To estimate the number of layers that can be resolved in our single receiver context, the misfit $E(\mathbf{m})$ is minimized for several parametrizations, and MAP values are used to compute the BIC. All parameters are searched over relatively wide intervals and the corresponding search bounds are given in Table I.

As stated in Sec. IV, the BIC is first computed assuming Gaussian uncorrelated errors on the data, i.e., misfit is computed using Eq. (17). The preferred parametrization, i.e., the one with the lowest BIC value, consists of two uniform layers over the basement ($B + 2U$). The corresponding MAP model is then used to estimate the data error statistics. As an example, the mode 1 residuals are shown in Fig. 5(a). The residuals for the other three modes also show the same pattern, with high values for low frequencies and smaller values for higher frequencies. This phenomenon can be explained by our TF estimation of the dispersion curves. After modal filtering using warping, dispersion curves are estimated using the reassigned spectrogram.²⁹ Although this TF representation has a high resolution, the resolution is constant over the whole frequency domain. As each mode is a non-linear frequency modulation, a constant TF resolution cannot be adapted to the whole mode. To take into account this phenomenon, we have

TABLE I. Inversion parameter list. Prior information is uniform over the given search bound. The last two columns give the MAP estimation and the 95% HPD interval for an environment consisting of a single layer over a basement.

Parameter	Unit	Search bounds	MAP	95% HPD
Range r	km	[5, 12]	7.12	[7.03, 7.46]
Shot instant dt	s	[-10, 0]	-4.88	[-5.04, -4.75]
Layer sound speeds v_p	m/s	[1500, 1800]	1604	[1586, 1625]
Layer densities ρ	g/cm ³	[1.4, 2.2]	1.80	[1.6, 1.9]
Layer widths h	m	[1, 30]	25	[19.6, 31.1]
Basement sound speed v_{pb}	m/s	[1600, 2200]	2132	[1785, 2194]
Basement density ρ_b	g/cm ³	[1.4, 2.2]	1.48	[1.4, 2.1]

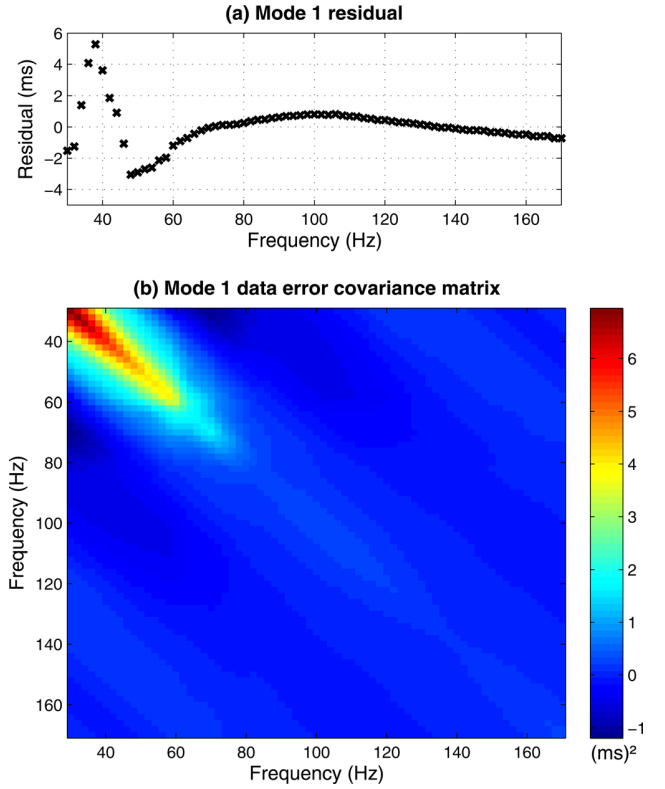


FIG. 5. (Color online) Data error estimation for mode 1. (a) Residual and (b) corresponding data error covariance matrix (arbitrary linear scale). Other modes show similar results.

chosen to compute the reassigned spectrogram using a relatively short sliding window ($\simeq 0.02$ s), so that dispersion curve estimation is good over a large frequency bandwidth. As a result, the data error cannot be considered as uncorrelated, and the data error covariance matrix is estimated using Eq. (19). The mode 1 data error covariance matrix is shown in Fig. 5(b), and other modes produce similar results.

Using estimated data error statistics enables an improved formulation of the inverse problem, i.e., computing the likelihood using Eq. (14). The BIC study is carried out again with the estimated data error covariance, and the corresponding results are summarized in Fig. 6. The preferred parametrization is now a single uniform layer over the basement ($B + 1U$). Indeed, considering a more complex structure (for example, $B + 2U$) does not decrease the misfit significantly but it increases the number of parameters, leading to an increase of the BIC. Note that uncertainty assumptions (correlated Gaussian data errors) are validated *a posteriori* as explained in Sec. IV. Table II summarizes the result of the quantitative statistical tests. The runs test results show that the estimated covariance matrices of each mode represents adequately the data error correlations, while the KS test results indicate no evidence against the hypothesis of Gaussian-distributed errors for modes 1, 2, and 3. The KS test indicates significant evidence against Gaussianity for mode 4. This may be related to the weakness of this arrival relative to modes 2 and 3 (Fig. 3); however, given the results of all other statistical tests, it is not expected to significantly impact the inversion results.

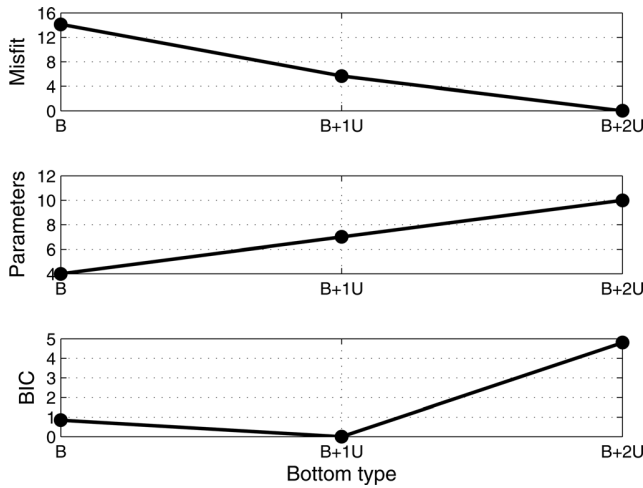


FIG. 6. Parametrization study that takes into account data error statistics. Models are B: basement only; B+1U: one layer over basement; B+2U: two layers over basement. For display purposes, misfit and BIC are shifted so that their minimum value is zero.

This two-stage BIC study is very informative. It demonstrates the importance of taking into account the data error covariance. Indeed, in our case, including the covariance impacts the model parametrization. For our particular dataset, the data do not carry enough information to resolve more than one layer over a basement. Although this parametrization seems simple, we have demonstrated quantitatively that it is the best that can be obtained from the data. Note also that it has been shown that parameter estimation uncertainty can be under-estimated if data error covariance is not properly taken into account.^{33,48}

B. Inversion results for the selected model

Once the model parametrization has been chosen using BIC analysis, the PPD can be estimated. Figure 7 presents marginal probability densities for each individual parameter. This figure shows the relative sensitivity of each parameter. One can see that the sediment parameters (v_{p1} , ρ_1 , and h) are well estimated, and so are the range (r) and shot instant (dt). The basement parameters (v_{pb} , ρ_b) indicate poor sensitivity. The inversion result can be summarized as

- (1) Sediment: $\hat{v}_{p1} = 1604$ m/s with HPD = [1586, 1625] m/s, $\hat{\rho}_1 = 1.80$ g/cm³ with HPD = [1.6, 1.9] g/cm³ and $h = 25$ m with HPD = [19.6, 31.1] m;
- (2) Basement: $\hat{v}_b = 2132$ m/s with HPD = [1785, 2194] m/s, $\hat{\rho}_b = 1.48$ g/cm³ with HPD = [1.4, 2.1] g/cm³;
- (3) Range $\hat{r} = 7.12$ km with HPD = [7.03, 7.46] km, and shot instant $\hat{dt} = -4.88$ s with HPD = [-5.04, -4.75] s;

TABLE II. Data error statistics: Runs test and KS test p -values for the standardized residuals after covariance weighted inversion.

Residual	runs test	KS test
Mode 1	$p = 0.05$	$p = 0.59$
Mode 2	$p = 0.81$	$p = 0.16$
Mode 3	$p = 0.08$	$p = 0.53$
Mode 4	$p = 0.48$	$p = 4.12 \times 10^{-6}$

where the estimated values are the MAP values and the uncertainties are given in terms of 95% Highest Probability Density (HPD) credibility interval (the interval of minimum width containing 95% of probability). These results are listed in Table I.

The parameter inter-relationship can be studied in terms of joint marginal probability densities. Figure 8 shows the most relevant of these distributions. One can see that shot-instant dt and range r are strongly correlated, which is logical as delaying the shot instant can be compensated by increasing the range. The sediment sound speed is also correlated with range (and thus with shot time). Indeed, increasing range not only delays the signal arrival, it also spreads the dispersion curve. This can be compensated by decreasing the sediment sound speed, which tends to decrease the modal cutoff frequency, and thus moves the dispersion curve back to its original location. All the other parameters do not indicate strong correlations. In particular, the observed (null) correlation between sediment sound speed v_{p1} and density ρ_1 differs from many other geoacoustic methods.

The inversion results can be illustrated in a more intuitive way by constructing marginal probability profiles for sound speed and density. These profiles are obtained by converting each model (from the PPD sample) into a profile, and then computing the probability of all profiles over a sound-speed-depth or density-depth grid. Figure 9(a) presents the obtained sound speed probability profile while Fig. 9(b) shows the density profile. Both profiles have the same feature which confirm the previous analysis: Sound speed and density in the sediment layer are well defined, the sediment/basement boundary is strong, but nothing can be said about the basement parameters.

C. Discussion of the estimated geoacoustic parameters

The region around the MPL-VLA1 was a central site in the SW06 experiment where several other methods were applied to estimate geoacoustic profiles from data. In this section, we compare our results from the inversion of the light bulb data with those from other experiments. The comparison with relevant geoacoustic parameters is presented in Table III.

The values reported by Yang *et al.*⁴⁹ and Turgut⁵⁰ are from *in situ* probes at several locations close to the VLA, and they indicate the high degree of spatial variability of sediment sound speed in surficial layers (within 0.5 m of the sea floor) in the area. Yang *et al.*⁵¹ report estimates from high frequency (2 to 5 kHz) bottom loss data in a highly localized area (≈ 0.3 km radius) at the VLA site. Their results indicate a high sound speed of 1650 m/s that is characteristic of surficial sediments within a few meters of the sea floor. The results from Ballard *et al.*⁵² are based on linear perturbative inversions of modal wavenumber estimates. Their inversion assumed two layers in the sediment based on the chirp sonar data (Fig. 1), and the low sound speed layer at depth is inferred from higher order modes that are trapped in the layer. However, the impedance change at the Erore boundary layer is very weak. Neither the matched field

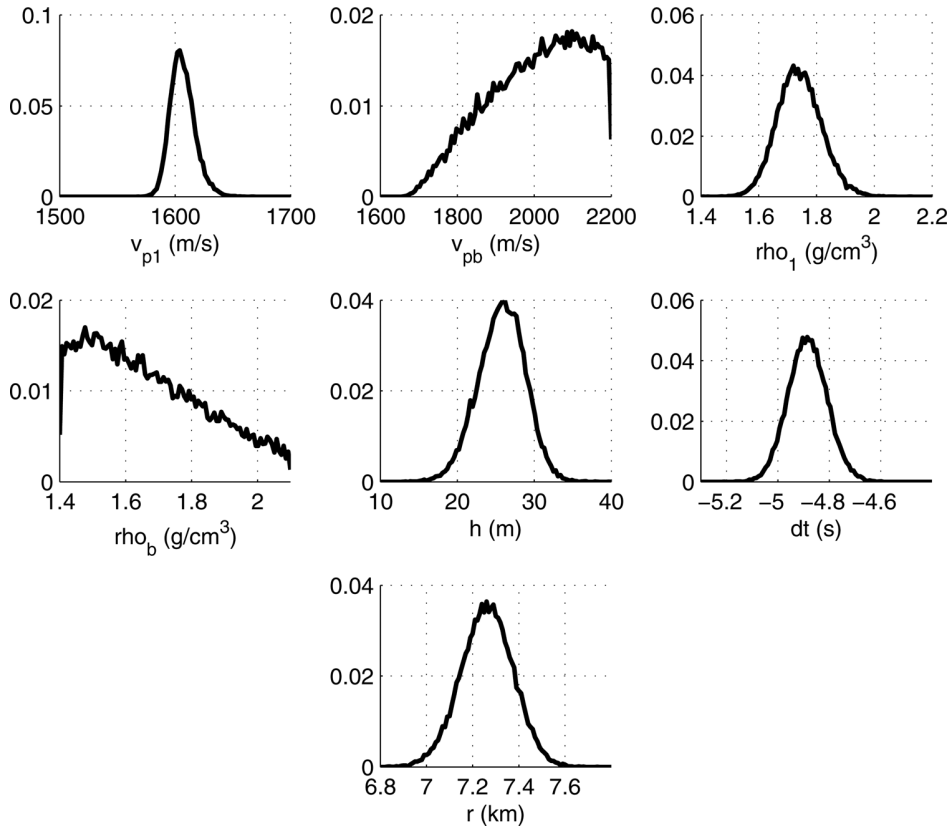


FIG. 7. Marginal probability densities from Bayesian inversion of the SW06 light bulb data.

inversions nor the travel time analysis detected its presence. Instead, the matched field inversions^{53–55} assumed a linear gradient sound speed profile in the sediment, and it is noteworthy that the average value of sound speed over the layer

depth is about the same for each inversion (≈ 1600 m/s). The negative gradient obtained by Jiang *et al.*⁵³ is consistent with the low sound speed layer at depth from the modal wave-number inversion.

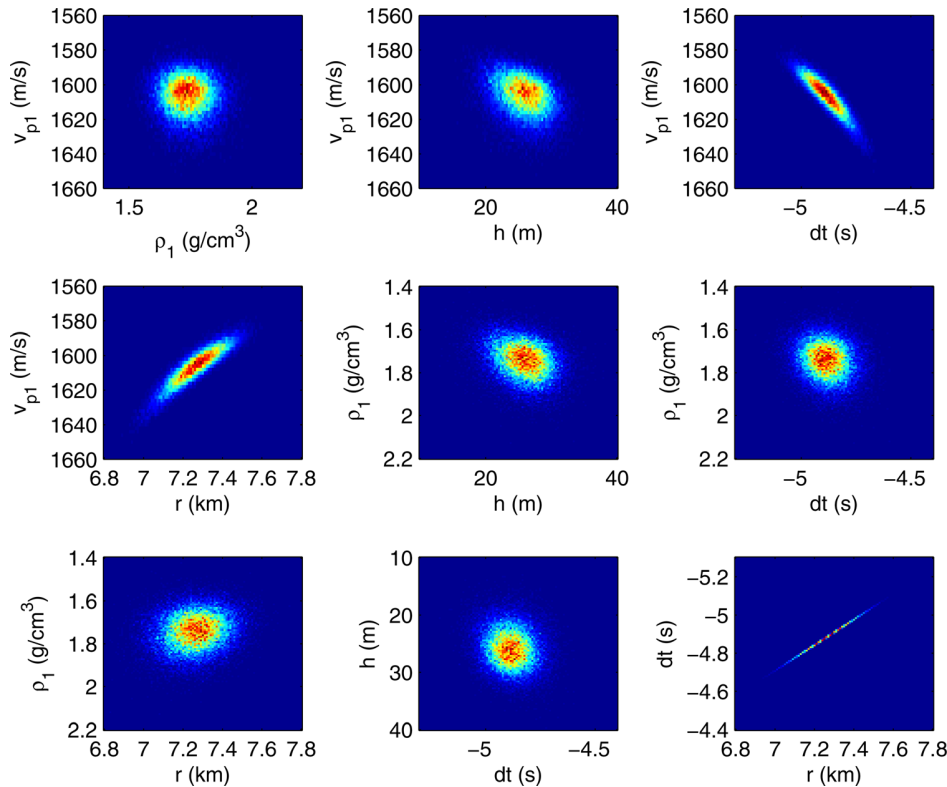


FIG. 8. (Color online) Selected joint marginal probability densities. Each distribution is normalized independently (arbitrary linear scale).

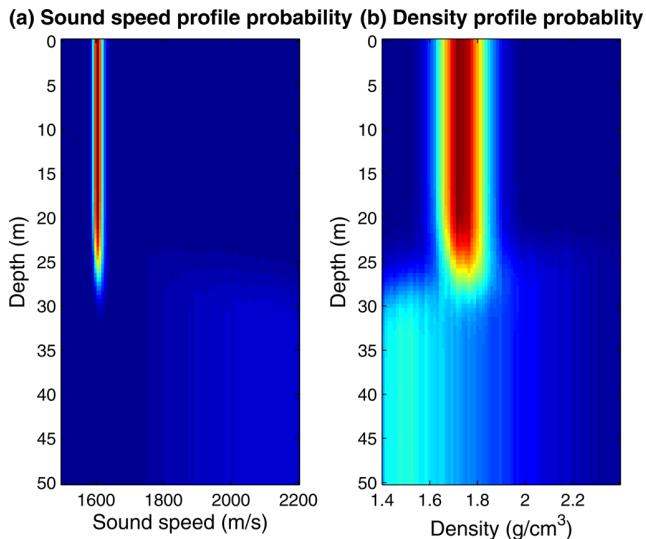


FIG. 9. (Color online) Marginal probability profiles: (a) Sound speed and (b) density. Each distribution is globally normalized over 0 to 50 m (arbitrary linear scale).

Our inversion, which is based on four propagating modes, is able to estimate sound speed and density for the sediment layer above the R -reflector. The modal energy for the first four modes is concentrated within $\simeq 15$ m of the sea floor, so the inversion is not sensitive to the basement geoaoustic parameters. This is confirmed by the 95% HPD credibility intervals of the basement parameters which nearly coincide with the *a priori* search bounds of these parameters.

The light bulb range estimate $\hat{r} = 7.12$ km is very close to the independent measure of range from the GPS data obtained during the experiment (7.08 km). The estimated value for the sediment sound speed $\hat{v}_{p1} = 1604$ m/s is consistent with the average values of sound speed obtained from the matched field inversions.^{53,55} The 95% HPD credibility interval for sediment thickness of [19.6, 31.1] m is consistent with both the ground truth and inversion results from other studies (see Table III).

The survey indicates an increasing water depth and layer thickness over the propagation path, whereas our inversion assumed range independence. The sediment density has been

less well estimated in other inversions. Our estimate of $\hat{\rho}_1 = 1.80 \pm 0.07$ g/cm³ is consistent with empirical relationships between sound speed and density in marine sediment developed by Bachman.⁵⁶

On the whole, inversion results are consistent with another study from Bonnel *et al.*⁸ Using the same dataset, inversion was carried out using modal reversal (i.e., single-receiver back propagation) without a Bayesian methodology. With modal reversal inversion, the estimated range is 6915 m, while the estimated sediment sound speed and density are 1621 m/s and 1.66 g/cm³. Both methods provide estimated parameter values that have the same order of magnitude. However, the results of this study should be more accurate: Dispersion curve inversion exploits the fact that the source signal is impulsive, which is not the case for modal reversal inversion.

VI. CONCLUSION

This paper presents Bayesian geoaoustic inversion of single-receiver light bulb data collected during the SW06 experiment. The methodology is adapted to the context of low-frequency propagation in shallow water. In this context, propagation is dispersive, and the signal is characterized by dispersion curves in the TF domain. These curves are first estimated using a signal processing method called warping. The estimated dispersion curves are then used as an input for the Bayesian inversion algorithm, leading to the estimation of the seabed properties, the source/receiver range, and the light bulb implosion time.

The key point of this paper is that applying Bayesian methodology to dispersion curve inversion quantifies the amount of the seabed structure that can be resolved from the data and estimates the uncertainty of the estimated geoaoustical parameters. In the studied configuration, a single sediment layer over a semi-infinite basement can be resolved, and the basement geoaoustic parameters cannot be properly estimated. However, the sediment parameters (sound speed, density, and layer width) are estimated with a relatively small uncertainty and the results are reliable. They agree both with ground truth and other inversion studies of the same area. Note that source/receiver range and light bulb

TABLE III. Comparison of the parameters estimated here (given in terms of 95% HPD interval) with other studies. When two sound speed values are separated by a dash, the given values constitute the estimation range. When two sound speed values are separated by a single slash, inversion was carried out assuming a sound speed gradient in the layer: The first value is the estimated sound speed at the top of the layer while the second one is the estimated sound speed at the bottom of the layer. When two sound speed values are separated by a double slash, inversion was carried out assuming two iso-speed layers over a basement; the first value is the estimated sound speed in the first layer while the second one is the estimated sound speed in the second layer. For layer width estimation, a dash signifies that this information was required *a priori*, a cross indicates that it was not properly estimated and HSB means that inversion was carried out assuming a half space bottom model.

Study	Method	Frequency band	Sound speed (m/s)	Layer width (m)
This study	Dispersion curves	30–150 Hz	[1586,1626]	[19.6,31.1]
Yang <i>et al.</i> (Ref. 49)	SAMS	2–20 kHz	1600 – 1620	—
Turgut (Ref. 50)	GeoProbe	20–50 kHz	1550 – 1650	22.4
Yang <i>et al.</i> (Ref. 15)	Bottom loss	2–5 kHz	1650 $\pm$ 20	HSB
Ballard <i>et al.</i> (Ref. 52)	Wavenumber	75–125 Hz	1670//1585	—
Jiang <i>et al.</i> (Refs. 53 and 54)	Matched field	50–700 Hz	1626/1590	23 $\pm$ 1
Huang <i>et al.</i> (Ref. 55)	Matched field	50–700 Hz	1589/1609	24.2
Bonnel <i>et al.</i> (Ref. 8)	Backpropagation	30–150 Hz	1621	X

implosion time are obtained as a by-product of the inversion. The range compares well with GPS measurement done during the experiment.

- ¹C. Lindsay and N. Chapman, "Matched field inversion for geoacoustic model parameters using adaptive simulated annealing," *IEEE J. Ocean. Eng.* **18**, 224–231 (1993).
- ²D. Gingras and P. Gerstoft, "Inversion for geometric and geoacoustic parameters in shallow water: Experimental results," *J. Acoust. Soc. Am.* **97**, 3589–3598 (1995).
- ³M. Fallat and S. Dosso, "Geoacoustic inversion via local, global, and hybrid algorithms," *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 3219–3230 (1999).
- ⁴J. Hermand, "Broad-band geoacoustic inversion in shallow water from waveguide impulse response measurements on a single hydrophone: Theory and experimental results," *IEEE J. Ocean. Eng.* **24**, 41–66 (1999).
- ⁵G. Potty, J. Miller, J. Lynch, and K. Smith, "Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **108**, 973–986 (2000).
- ⁶J. Le Gac, M. Asch, Y. Stephan, and X. Demoulin, "Geoacoustic inversion of broad-band acoustic data in shallow water on a single hydrophone," *IEEE J. Ocean. Eng.* **28**, 479–493 (2003).
- ⁷K. Heaney, "Rapid geoacoustic characterization using a surface ship of opportunity," *IEEE J. Ocean. Eng.* **29**, 88–99 (2004).
- ⁸J. Bonnel, C. Gervaise, B. Nicolas, and J. Mars, "Single receiver geoacoustic inversion using modal reversal," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**, 119–128 (2012).
- ⁹R. Baraniuk and D. Jones, "Unitary equivalence: A new twist on signal processing," *IEEE Trans. Signal Process.* **43**, 2269–2282 (1995).
- ¹⁰G. Le Touzé, B. Nicolas, J. Mars, and J. Lacoume, "Matched representations and filters for guided waves," *IEEE Trans. Signal Process.* **57**, 1783–1795 (2009).
- ¹¹S. Dosso, "Quantifying uncertainty in geoacoustic inversion. I. A fast Gibbs sampler approach," *J. Acoust. Soc. Am.* **111**, 129–142 (2002).
- ¹²F. Jensen, W. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics* (AIP, New York, 1994), Chap. 5.
- ¹³G. Potty, J. Miller, and J. Lynch, "Inversion for sediment geoacoustic properties at the New England Bight," *J. Acoust. Soc. Am.* **114**, 1874–1887 (2003).
- ¹⁴G. Potty, J. Miller, P. Dahl, and C. Lazauski, "Geoacoustic inversion results from the ASIAEX East China Sea experiment," *IEEE J. Ocean. Eng.* **29**, 1000–1010 (2004).
- ¹⁵G. Potty, J. Miller, P. Wilson, J. Lynch, and A. Newhall, "Geoacoustic inversion using combustive sound source signals," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, EL146–EL150 (2008).
- ¹⁶J. Bonnel, B. Nicolas, J. Mars, and S. Walker, "Estimation of modal group velocities with a single receiver for geoacoustic inversion in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **128**, 719–727 (2010).
- ¹⁷J. Bonnel and N. Chapman, "Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators," *J. Acoust. Soc. Am.* **130**, EL101–EL107 (2011).
- ¹⁸L. Zheng-Lin and Z. Ren-He, "Geoacoustic inversion based on dispersion characteristic of normal modes in shallow water," *Chin. Phys. Lett.* **24**, 471–474 (2007).
- ¹⁹C. Chen, J. Miller, G. Boudreaux-Bartels, G. Potty, and C. Lazauski, "Time-frequency representations for wideband acoustic signals in shallow water," in *Proceedings of IEEE OCEANS 2003*, Vol. 5, pp. SP2903–SP2907 (2003).
- ²⁰S. Rajan and K. Becker, "Inversion for range-dependent sediment compressional-wave-speed profiles from modal dispersion data," *IEEE J. Ocean. Eng.* **35**, 43–58 (2010).
- ²¹I. Zorych and Z. H. Michalopoulou, "Particle filtering for dispersion curve tracking in ocean acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, EL45–EL50 (2008).
- ²²J. Xia, R. Miller, and C. Park, "Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves," *Geophysics* **64**, 691–700 (1999).
- ²³H. Dong and S. Dosso, "Bayesian inversion of interface-wave dispersion for seabed shear-wave speed profiles," *IEEE J. Ocean. Eng.* **36**, 1–11 (2011).
- ²⁴H. Dong, J. M. Hovem, and N. Papantonopoulos, *Theoretical and Computational Acoustics* (University of Crete, Heraklion, 2008), pp. 47–55.
- ²⁵D. Tang, J. Moum, J. Lynch, P. Abbot, R. Chapman, P. Dahl, T. Duda, G. Gawarkiewicz, S. Glenn, J. Goff, H. Graber, J. Kemp, A. Maffei, J. Nash, and A. Newhall, "Shallow Water 06: A joint acoustic propagation/nonlinear internal wave physics experiment," *Oceanogr.* **20**(4), 156–167 (2007).
- ²⁶J. Goff and J. Austin, Jr., "Seismic and bathymetric evidence for four different episodes of iceberg scouring on the New Jersey outer shelf: Possible correlation to Heinrich events," *Mar. Pet. Geol.* **266**, 244–254 (2009).
- ²⁷F. Hlawatsch and G. Boudreaux-Bartels, "Linear and quadratic time-frequency signal representations," *IEEE Signal Process. Mag.* **9**, 21–67 (1992).
- ²⁸J. Bonnel, C. Gervaise, P. Roux, B. Nicolas, and J. Mars, "Modal depth function estimation using time-frequency analysis," *J. Acoust. Soc. Am.* **130**, 61–71 (2011).
- ²⁹F. Auger and P. Flandrin, "Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method," *IEEE Trans. Signal Process.* **43**, 1068–1089 (1995).
- ³⁰M. Taroudakis and G. Tzagkarakis, "On the use of the reassigned wavelet transform for mode identification," *J. Comput. Acoust.* **12**, 175–196 (2004).
- ³¹P. Gerstoft and C. Mecklenbrauker, "Ocean acoustic inversion with estimation of a posteriori probability distributions," *J. Acoust. Soc. Am.* **104**, 808–819 (1998).
- ³²S. Dosso and P. Nielsen, "Quantifying uncertainty in geoacoustic inversion. II. Application to broadband, shallow-water data," *J. Acoust. Soc. Am.* **111**, 143–159 (2002).
- ³³S. Dosso, P. Nielsen, and M. Wilmot, "Data error covariance in matched-field geoacoustic inversion," *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 208–219 (2006).
- ³⁴S. Dosso and M. Wilmot, "Data uncertainty estimation in matched-field geoacoustic inversion," *IEEE J. Ocean. Eng.* **31**, 470–479 (2006).
- ³⁵C. Huang, P. Gerstoft, and W. Hodgkiss, "Uncertainty analysis in matched-field geoacoustic inversions," *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 197–207 (2006).
- ³⁶S. Dosso and M. Wilmot, "Uncertainty estimation in simultaneous Bayesian tracking and environmental inversion," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, 82–97 (2008).
- ³⁷J. Dettmer, S. Dosso, and C. Holland, "Uncertainty estimation in seismo-acoustic reflection travel time inversion," *J. Acoust. Soc. Am.* **122**, 161–176 (2007).
- ³⁸S. Dosso, M. Wilmot, and A. Lapinski, "An adaptive-hybrid algorithm for geoacoustic inversion," *IEEE J. Ocean. Eng.* **26**, 324–336 (2001).
- ³⁹J. Nelder and R. Mead, "A Simplex method for function minimization," *Comput. J.* **7**, 308–313 (1965).
- ⁴⁰L. Ingber, "Very fast simulated re-annealing," *Math. Comput. Modell.* **12**, 967–973 (1989).
- ⁴¹N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines," *J. Chem. Phys.* **21**, 1087–1092 (1953).
- ⁴²W. Hastings, "Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications," *Biometrika* **57**, 97–109 (1970).
- ⁴³S. Chib, "Marginal likelihood from the Gibbs output," *J. Am. Stat. Assoc.* **90**, 1313–1321 (1995).
- ⁴⁴I. Murray, "Advances in Markov chain Monte Carlo methods," Ph.D. thesis, University College London (2007).
- ⁴⁵G. Schwarz, "Estimating the dimension of a model," *Ann. Stat.* **6**, 461–464 (1978).
- ⁴⁶J. Dettmer, S. Dosso, and C. Holland, "Model selection and Bayesian inference for high-resolution seabed reflection inversion," *J. Acoust. Soc. Am.* **125**, 706–716 (2009).
- ⁴⁷Mode identification is actually an unknown in the inverse problem. In our case, extracted modes are assumed to be modes 1 to 4, which is validated *a posteriori* by comparing modeled dispersion with the estimated dispersion curves.
- ⁴⁸S. Molnar, S. Dosso, and J. Cassidy, "Bayesian inversion of microtremor array dispersion data in southwestern British Columbia," *Geophys. J. Int.* **183**, 923–940 (2010).
- ⁴⁹J. Yang, D. Tang, and K. Williams, "Direct measurement of sediment sound speed in shallow water '06," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, EL116–EL121 (2008).
- ⁵⁰A. Turgut, "Validation of high-resolution inversion techniques for measuring seabed geoacoustic properties during the ONR-SW06 experiment," Technical Report, Defense Technical Information Center Document (2006).

- ⁵¹J. Yang, D. R. Jackson, and D. Tang, "Mid-frequency geoacoustic inversion using bottom loss data from the shallow water 2006 experiment," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**, 1711–1721 (2012).
- ⁵²M. Ballard, K. Becker, and J. Goff, "Geoacoustic inversion for the New Jersey shelf: 3-d sediment model," *IEEE J. Ocean. Eng.* **35**, 28–42 (2010).
- ⁵³Y.-M. Jiang and N. R. Chapman, "Bayesian geoacoustic inversion in a dynamic shallow water environment," *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, EL155–EL161 (2008).
- ⁵⁴Y.-M. Jiang and N. R. Chapman, "The impact of ocean sound speed variability on the uncertainty of geoacoustic parameter estimates," *J. Acoust. Soc. Am.* **125**, 2881–2895 (2009).
- ⁵⁵C. Huang, P. Gerstoft, and W. Hodgkiss, "Effect of ocean sound speed uncertainty on matched-field geoacoustic inversion," *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, EL162–EL168 (2008).
- ⁵⁶R. Bachman, "Acoustic and physical property relationships in marine sediment," *J. Acoust. Soc. Am.* **78**, 616–621 (1985).

Measuring the Marine Soundscape of the Indian Ocean with Southern Elephant Seals Used as Acoustic Gliders of Opportunity

DORIAN CAZAU AND JULIEN BONNEL

ENSTA Bretagne, Lab-STICC (UMR CNRS 6285), Brest, France

JOFFREY JOUMA'A, YVES LE BRAS, AND CHRISTOPHE GUINET

Centre d'Etudes Biologiques de Chizé, UMR 7372 Université de La Rochelle-CNRS, Villiers-en-Bois, France

(Manuscript received 17 June 2016, in final form 1 September 2016)

ABSTRACT

The underwater ambient sound field contains quantifiable information about the physical and biological marine environment. The development of operational systems for monitoring in an autonomous way the underwater acoustic signal is necessary for many applications, such as meteorology and biodiversity protection. This paper develops a proof-of-concept study on performing marine soundscape analysis from acoustic passive recordings of free-ranging biologged southern elephant seals (SES). A multivariate multiple linear regression (MMLR) framework is used to predict the measured ambient noise, modeled as a multivariate acoustic response, from SES (depth, speed, and acceleration) and environmental (wind) variables. Results show that the acoustic contributions of SES variables affect mainly low-frequency sound pressure levels (SPLs), while frequency bands above 3 kHz are less corrupted by SES displacement and allow a good measure of the Indian Ocean soundscape. Also, preliminary results toward the development of a mobile embedded weather sensor are presented. In particular, wind speed estimation can be performed from the passive acoustic recordings with an accuracy of 2 m s^{-1} , using a rather simple multiple linear model.

1. Introduction

In the frequency band from a few tens of a hertz up to 50 kHz, the dominant sources of ambient noise in the ocean can be broadly divided into sounds resulting from geophony (i.e., sounds from natural physical processes, e.g., wind-driven waves, rainfall, seismicity, breaking waves, current), biophony (i.e., sounds from biological activities, e.g., whale vocalizations, snapping shrimp beds), and anthropophony (i.e., man-made sounds, e.g., commercial shipping, sonar, seismic prospecting, oil and gas surveys) (Knudsen et al. 1948; Wenz 1962). All these sources contribute conjointly to the noise spectrum characteristics (e.g., pressure level, spectral slope) in varying degrees, depending on their strength and conditions prevailing at the measurement location. Thus, the underwater ambient sound field contains quantifiable

information about the physical and biological marine environment. To extract this information, passive acoustic systems have been used for monitoring, recording, and interpreting in a continuous and autonomous way the underwater acoustic signal, facilitating an all-weather and all-season ocean monitoring.

The study of ocean ambient noise plays a growing role in many different research fields. In biodiversity, it helps in preserving marine animal ecosystems by better understanding the impacts of human activities on their ecology (Sirovic et al. 2013). In meteorology, global climate models and local weather forecasts rely on field information about weather across oceans. Observations of rain and wind phenomena from underwater noise allow for better study of air-sea interactions, and increase greatly the spatio-temporal resolution provided by satellite (Vagle et al. 1990; Nystuen and Selsor 1997; Ma and Nystuen 2005; Pensieri et al. 2015). In cryogenics, the noise generated by glaciers allows for quantification of melting processes in the Arctic and is a good indicator of rapid climate processes (Urlick 1971; Glowacki et al. 2015). In oceanography, measurement and characterization of ambient noise

Corresponding author address: Dorian Cazau, ENSTA Bretagne, Lab-STICC (UMR CNRS 6285), 2 rue François Verny, 29806 Brest CEDEX 09, France.
E-mail: dorian.cazau@ensta-bretagne.fr

are essential to enhance the signal-to-noise ratio of acoustic-based underwater instruments (Rahmati et al. 2014). The need for better assessment of global change and its consequences have drawn attention and highlighted the need for an intense monitoring of underwater noise level and, consequently, for the development of innovative sensors and networks (Duennebie et al. 2002; Johnson and Tyack 2003; Aguzzi et al. 2011; Favali 2013) able to collect and analyze long-term underwater sound data.

Ambient noise studies mostly take place in the north-eastern Pacific (Chapman and Price 2011) and Atlantic Oceans (Nieukirk et al. 2004). Previous studies in the Indian Ocean have focused on the northwestern (Wagstaff 2005) and the tropical regions of the Indian Ocean (Miksis-Olds et al. 2013; Hawkins et al. 2014; Tsang-Hin-Sun et al. 2015). Tournadre (2014) showed that the ship traffic has had a global increase in the Indian Ocean in the last two decades. In the Southern Ocean, a recent study highlighted the predominant role of icebergs in the Southern Hemisphere soundscape (Matsumoto et al. 2014). Miksis-Olds et al. (2013) reported that the observed sound floor increases are consistent with concurrent increases in shipping, wind speed, wave height, and blue whale abundance in the Indian Ocean. Nair et al. (2015) developed a semiempirical model to predict surface ambient sound spectra in 1–50 kHz for rainfall rates in 2–200 mm h⁻¹ and wind speeds within 2–14 m s⁻¹.

Most often, hydrophones used for marine soundscape studies are bottom mounted, shore terminated, and fixed at a certain depth. Other studies have also used mobile hydrophones, either dragged behind a drifting buoy or boat (Nystuen and Selsor 1997), or attached to vertical profiler float (Ward et al. 2011; Küsel et al. 2011; Barclay and Buckingham 2013). More recently, with the development of miniaturized electronic devices, hydrophones have been embedded in underwater gliders (Baumgartner et al. 2008; Matsumoto et al. 2011; Klinck et al. 2012). These gliders can survey a large area by autonomously navigating the defined area (Rogers et al. 2004; Rudnick et al. 2004), and they have shown great promise in monitoring marine mammals (Baumgartner et al. 2008; Klinck et al. 2012), oceanographic phenomena (Matsumoto et al. 2011), and meteorological surface conditions (Cauchy et al. 2015).

In the same line of technological innovation, the use of animalborne autonomous recording tags, called biologging, is becoming widespread (Ropert-Coudert and Wilson 2005), and allows for the acquisition of huge quantitative datasets for inferences on movement, ecology, physiology, and behavior of animals moving freely in their natural environment. Multichannel dataloggers are used, and data are sampled at high resolution over large temporal and spatial ranges, including

geographical areas uncovered by satellite data. In addition to providing parameters related to the animal biological processes, environmental parameters (e.g., temperature, salinity, light, fluorescence) can also be continuously recorded.

In this project, southern elephant seals (SES) of the Kerguelen Islands are used as acoustic gliders of opportunity. SES are wide-ranging animals during their postbreeding and postmoulting migrations. Adult females (*Mirounga leonina*) from the Kerguelen Islands (49°20'S, 70°20'E) forage mainly in oceanic waters of the Antarctic and polar frontal zones (below 60°S) from October to February (Bailleul et al. 2010). Among top marine predators, air-breathing diving species such as SES are particularly well suited for biologging because their large size allows them to carry electronic devices with minimal disturbance. These devices are stuck on SES while they are on land in their breeding colonies. The strong east–west current speeds and the thick ice surface layers in this part of the austral ocean make the use of regular gliders very complicated, while these harsh environmental conditions are not a problem for SES.

So far, these biologged SES have been used to collect measurements of physical (Charrassin et al. 2008; Costa et al. 2008; Roquet et al. 2009) and biological (Guinet et al. 2013) oceanographic parameters, in often inaccessible regions. The SES and their closed-loop migratory route also provide the opportunity for using Acousondes¹ (Acoustimetrics, Greeneridge Sciences, Inc., Felton, California) that can be retrieved at the end of their migration. Acoustic data have already been recorded and used to investigate behavioral and eco-physiological (breathing rate) parameters (Genin et al. 2015). While at sea, SES dive repeatedly to mesopelagic depths (300–500 m up to 2000 m) and tend to follow the diel vertical migration of their mesopelagic prey, diving generally deeper during the day (Guinet et al. 2014). SES regularly perform dives during which they spend a large proportion of time descending passively through the water column (Richard et al. 2014). In the following, this type of dive will be referred to as drift dives.

The main objective of this current study is to demonstrate that marine soundscape can be measured with biologged SES used as acoustic gliders of opportunity. However, the SES movements (e.g., depth/speed variations) impact the measured sound spectra. It is thus first required to identify, characterize, and if possible remove the acoustic noise produced by SES movements that corrupts the measured soundscape. Under the

¹ Acousondes are miniature, self-contained, autonomous acoustic recorder designed for underwater applications.

assumption that different sound sources have unique acoustic signatures, passive acoustics can be used to make a classification of the ambient sound field. In this paper, a multivariate acoustic response in a multivariate multiple linear regression (MMLR) framework is used to decompose the measured ambient noise into different acoustic sources (acting as predictors) related either to the environment or to the SES. The ambient noise is modeled as a multivariate response of spectral parameters, namely, sound pressure levels (SPLs) and spectral slopes (SS), in various frequency bands. These acoustic features have been widely used in studies on marine soundscape and acoustical meteorology (Nystuen and Selsor 1997; Ma and Nystuen 2005; Pensieri et al. 2015). Ancillary datasets on wind speed and on SES diving behavior are used to define the predictors. Once we have fully characterized the acoustic noise induced by the SES displacements, we present results on the measured soundscape, and we focus on the effect of wind speed on the ambient noise level. These measures are compared with those made in other ocean environments at comparable depths, and also with theoretical models.

This paper is organized as follows. Section 1 provides details on acoustic measurements and on the different variables used in the regression framework. Section 2 presents exploratory and qualitative results, with an emphasis on the differences between spectra measured during the drift and active swimming phases of the SES. Then, more quantitative results are presented, in particular to evaluate the accuracy of estimating wind speed from our passive acoustic recordings. Section 3 proposes two general discussions on the relations between the external influence variables and the measured spectra, and on the marine soundscape resulting from our acoustic glider of opportunity.

2. Methods

a. Materials

In the austral winter of 2012, five different postbreeding female SES of similar body conditions were captured and equipped with dataloggers on the Kerguelen Islands. These loggers included an Acousonde 3A device (already used in similar research studies; e.g., Burgess et al. 1998; Burgess 2000) glued on the back of the seal on the longitudinal axis, 10 cm behind the scapula. The Acousonde 3A recorded sound at a sampling frequency F_s of 12.2 kHz with an acoustic sampling resolution of 16 bits, using a built-in low-frequency hydrophone. It also has a high-pass filter at 22 Hz (to remove powerful low-frequency flow noise) and an antialias (low pass) filter at 4640 Hz. The hydrophone response is flat in this band so that overall the

TABLE 1. Global overview of the passive acoustic recording database, with C as the cumulated duration. Each recording lasts approximately 4 h.

Acousonde	No. of recordings	Period	C (h)
A626019	20	30 Oct–18 Nov 2012	76.4
A626020	13	22 Sep–10 Nov 2012	51.2
A626021	4	30 Oct–2 Nov 2012	16
A626022	5	30 Oct–3 Nov 2012	18.6
A626040	24	31 Oct–23 Nov 2012	95.4

useable bandwidth is 22–4640 Hz (more details can be found at <http://acousonde.com/faqtechnical.html>). Total storage capacity is 64 GB. The unamplified raw sensitivity of the hydrophone is -201 dB (low-power-channel hydrophone) ref $1 \text{ V } (\mu\text{Pa})^{-1}$, that is, 0.089 mV Pa^{-1} . There is no onboard signal processing embedded into the Acousonde. The Acousonde's raw data have been converted to pressure data using a MATLAB (MathWorks, Natick, Massachusetts) program provided by Greeneridge Sciences, Inc. (the Acousonde manufacturer). The Acousonde also continuously recorded depth (pressure) and triaxial acceleration with a sampling frequency of 5 Hz.

b. Acoustic database

Table 1 provides a global overview of the sound database. The five Acousondes deployed were activated on the field almost at the same time, making their recordings overlap in time. The smaller number of recordings in Acousondes A626021 and A626022 was caused by technological deficiency. To save onboard storage space, a duty cycle was set up in each Acousonde that automatically turned it on for 4 h every 24 h. Each 4-h recording was segmented into 10-s time windows (except for the long-term averaged spectrogram, where we used 30-s time windows), using non-overlapping Hamming windows. We removed all the sound files for which the SES depth was less than 10 m, which includes phases when the SES is on land and phases when the SES is at the surface at sea. All data processing and analysis were conducted using MATLAB. A total of 184.2 h of audio recordings have eventually been used, providing 66 296 observations of 10 s long.

Figure 1 represents the migratory routes followed by the SES during which the Acousondes were active. The spatiotemporal coverage provided by SES routes ranges from 71° to 87° in longitude and from -46° to -52° in latitude.

c. Identification of drift phases

As already done in Dragon et al. (2012), pressure data were used to split the ascent and descent dive phases into two different categories based on diving behavior,

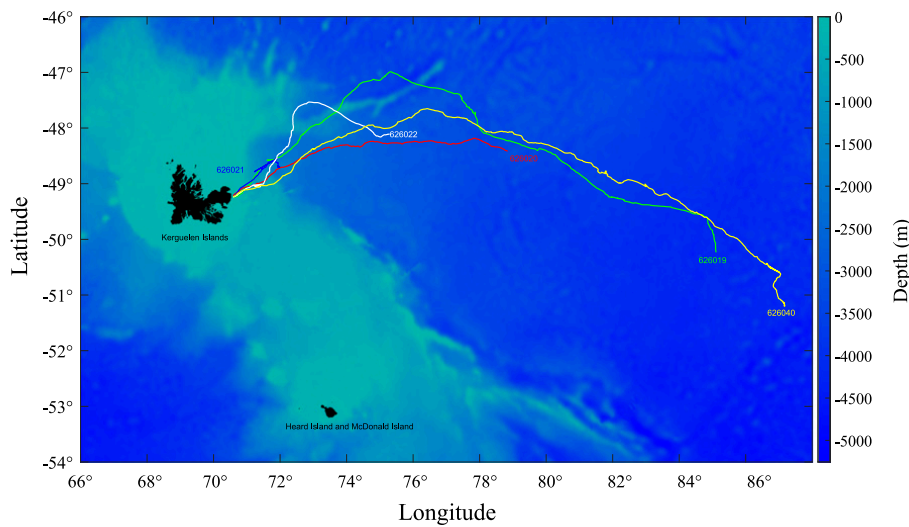


FIG. 1. Migratory routes of five different SES plotted on a map zoomed in on the Kerguelen Islands (49°20'S, 70°20'E), in the Indian Ocean. Details of individual SES are given in Table 1. These trajectories are based on GPS data from an *Argos* GPS satellite tag fixed on each SES. Only the segments of routes during which the Acousondes were active are drawn.

namely, drift dives and active swimming dives. In our study, drift dives are important, as they are expected to offer the cleanest acoustic measures. Drift dive identification was processed in two steps. First, we used first the complete time–depth recorder (TDR), which allowed us to (i) identify drift dives and (ii) isolate the passive drift phases during those dives (Dragon et al. 2012). For each drift dive, a drift rate was determined as the slope coefficient of a linear regression between depth and time (Bailleul et al. 2010; Mitani et al. 2010). In the second step, we used accelerometer data to exclude phases of active swimming during drift phases assessed by the TDR-only data. Active swimming was considered to take place when lateral acceleration exceeded the -0.2 to 0.2 m s^{-2} range. It is noteworthy that a more detailed taxonomy could have been used [e.g., Richard et al. (2014) subdivided the active swimming dives into exploratory dives, shallow active dives, and deep active dives], but in this paper diving characteristics of the SES will be limited to this two-class behavior, for the sake of clarity and conciseness with our acoustical meteorology application.

Table 2 provides statistical information on three different dive phases of SES, namely, surface, drifting, and active swimming phases. The R package Biologging tools² were used to estimate automatically the drift phases of SES. Drift phases have an average duration of 2 min. Overall, they cover only 6% of the total recording

period, with a higher presence of more active swimming dives (83%). These estimated drift phases have already been used in previous biological studies (Vacqu  -Garcia et al. 2012; Guinet et al. 2014; Richard et al. 2014; Genin et al. 2015).

d. Regression variables

Table 3 presents details on the different variables used in the regression analysis. They are detailed in the following.

1) ACOUSTIC VARIABLES

Each 10-s time series has been fast Fourier transformed (FFT) to obtain a 512-point power spectrum. Each spectrum is integrated on one-third octave frequency bands. The SPLs averaged over the one-third octave subband centered around f_c kHz, and the SS between the frequencies f_1 and f_2 , have been extracted from the measured spectra; they are labeled $\text{SPL}(f_c)$ and $\text{SS}(f_1-f_2)$, respectively. SPL measures are computed as

$$\text{SPL}(f_c)^{(m)} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{P_{\text{ref}}^2} \sum_{f=f_{\text{lower}}}^{f=f_{\text{upper}}} \frac{P^{(m)}(f)}{B} \right], \quad (1)$$

TABLE 2. Statistics on dive phases, with D as the mean phase duration, C as the cumulated duration, and P_{tot} as the percentage over total acoustic recordings.

Dive phases	D (min)	C (h)	P_{tot} (%)
Surface	2.5	42.5	11
Drift phases	2	22.9	6
Active phases	3	311.8	83

² Developed by Yves le Bras (CEBC-CNRS-UMR 7372 Université de La Rochelle, Chiz  , France) and available at <https://github.com/SESman/rbl>.

TABLE 3. Details of variables used in the regression analysis, classified into four categories: acoustics, SES displacements, SES status dive, and environment. All center frequencies f_c in the SPL descriptors have been rounded to a multiple of 10 for clarity in the notation.

Variable categories	Variable description	Variable labels	Units
Acoustics	Sound pressure levels	SPL(0.05), SPL(0.2), SPL(0.5), SPL(1), SPL(1.6), SPL(2.5), SPL(3.2), SPL(4)	dB
SES displacements	Spectral slope	SS(1–2.5), SS(2.5–4)	dB f^{-1}
	Speed	V	m s^{-1}
	Triaxial acceleration	a_x, a_y, a_z	m s^{-2}
	Depth	d	m
Environment	Wind speed	W	m s^{-1}

where $f_{\text{lower}} = f_c 10^{1/20}$ and $f_{\text{upper}} = f_c 10^{(-1)/20}$, $p_{\text{ref}} = 1 \mu\text{Pa}$, and B is the noise power bandwidth of the window function ($B = 1.36$ for a Hamming window). The power spectrum $P^{(m)}(f)$ is defined as

$$P^{(m)}(f) = 2 \left| \frac{X^{(m)}(f)}{N} \right|^2, \quad (2)$$

where $X^{(m)}(f)$ is the FFT of the m th segment, given by

$$X^{(m)}(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{\text{win}}^{(m)}[n] e^{(-i2\pi fn)/N}, \quad (3)$$

where x_{win} is a windowed segment of a time series. SS are calculated using a least squares fit to the SPLs over the specified frequency band. After correlation analysis, it appeared that strong correlations exist between different pairs of acoustic features, implying that knowledge of one necessarily implies knowledge of the other. Then, to reduce the dimension of the acoustic feature vector, we kept only the $\text{SPL}(f_c)$ measures per octave and the two slopes that maximize the Pearson correlation coefficient with the regression variables SES and Environment presented in sections 2d(2) and 2d(3), respectively. The acoustic descriptors resulting from this process, listed in Table 3, form a ten-dimensional feature vector over all the observations consisting of the following descriptors: $\{\text{SPL}(0.05), \text{SPL}(0.2), \text{SPL}(0.5), \text{SPL}(1), \text{SPL}(1.6), \text{SPL}(2.5), \text{SPL}(3.2), \text{SPL}(4), \text{SS}(1-2.5), \text{SS}(2.5-5)\}$. In the following, all f_c values have been rounded to a multiple of 10 for clarity in the notation, and all sound pressure levels are given in dB μPa^2 .

2) SES DISPLACEMENTS

The raw triaxial acceleration data from the accelerometer of the Acousonde 3A were used and labeled a_x , a_y , and a_z (longitudinal, lateral, and vertical axes, respectively). To estimate swimming speed V , we first need to compute the pitch θ of the seal, defined as the angle θ between the SES body direction and the horizontal, that is,

$$\theta = \arctan \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right). \quad (4)$$

As explained in Sato et al. (2003) and Aoki et al. (2011), the acceleration data used to compute the pitch using Eq. (4) have been filtered with a low-pass filter at 0.2 Hz in order to isolate the gravity component of the movement. Then V was computed by combining information on the vertical speed and the seal pitch as follows:

$$V = \frac{U_{\text{vert}}}{\sin(\theta)}, \quad (5)$$

where U_{vert} corresponds to the vertical speed (as determined from the depth recorder) of the SES, and V corresponds to the vertical speed corrected by the orientation of the SES given by its pitch. As already reported in past studies (Miller et al. 2004; Richard et al. 2014; Genin et al. 2015), this method is reliable only for steeper body angles (with an absolute body pitch over 30°). As a result, we use this proxy for deep descents and ascents, that is, ending and starting below 400 m deep, respectively, and with an absolute pitch over 30° . Eventually, the variable depth d is directly read from the TDR, with negative values below the ocean surface. Figures 2a–c represent the histograms of speed, acceleration, and depth data, respectively, matched with the analyzed passive acoustic recordings. As expected, higher extrema values of speed and rms acceleration (labeled rms – a) are obtained for active swimming periods (going from a range of $[0.15-2] \text{ m s}^{-1}$ and $[0-6] \text{ m s}^{-2}$ to $[0.7-3] \text{ m s}^{-1}$ and $[0-10] \text{ m s}^{-2}$, respectively, for the drift and active swimming phases, respectively), while depth and wind speed are reasonably well balanced between the two categories.

3) ENVIRONMENT

The dataset on wind speed was extracted from the Advanced Scatterometer (ASCAT) retrievals³ and

³ Available at <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/MWF/L3/ASCAT/Daily/Netcdf/>.

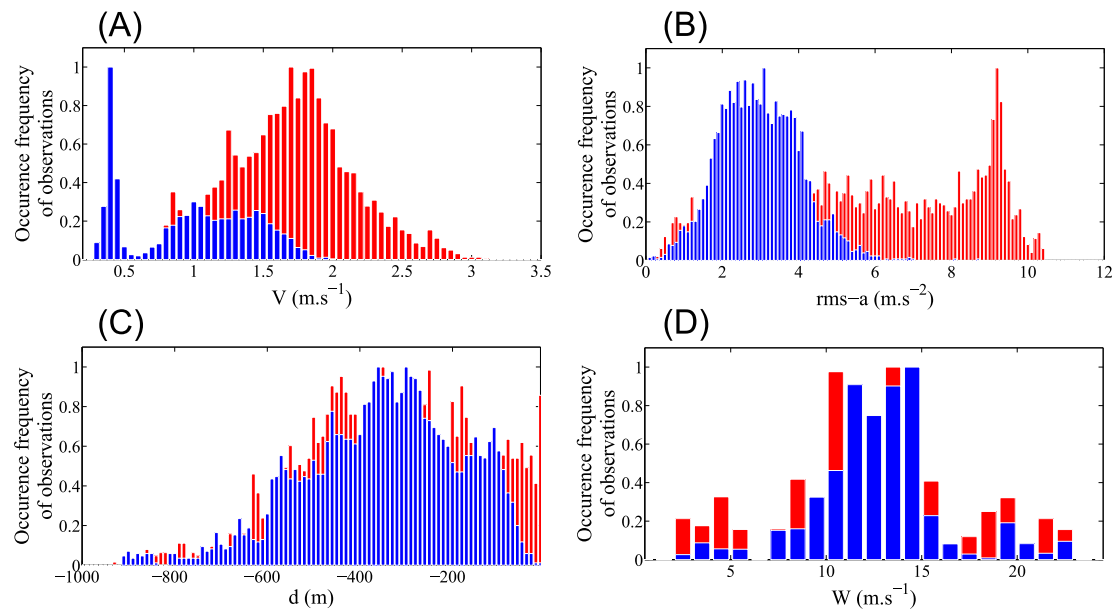


FIG. 2. Histograms of (a) SES swimming speed, (b) acceleration, (c) depth, and (d) wind speed data matched with the analyzed passive acoustic recordings. Each histogram has been individually unitary normalized. Each observation is labeled either as a drift phase (blue) or an active swimming phase (red).

provided gridded daily-averaged wind and wind stress fields over global oceans (Bentamy and Croize-Fillon 2012). The calculation of daily estimates uses ascending and descending available and valid retrievals. The objective method aims to provide daily-averaged gridded wind speed, zonal component, meridional component, wind stress, and the corresponding components at global scale. The error associated with each parameter, related to the sampling impact and wind space and time variability, is provided too. When compared with buoy measurements, this error for wind speed is below 2 m s^{-1} (Bentamy and Fillon 2015). More details about data, the objective method, and computation algorithm can be found in Bentamy and Croize-Fillon (2012). The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) analyses have been used as a temporal interpolation basis of ASCAT retrievals. The resulting fields are 10 m high above the ocean surface, and have spatial resolutions of 0.25° in longitude and latitude, and a 3-h temporal resolution.

An acoustic measurement is a spatially integrated measure, with an area of measurement at the ocean surface (also called the listening area in literature) that depends on the hydrophone depth and on the beam pattern of the ambient noise field. The listening area of a 500-m-depth hydrophone is around 8 km^2 (Nystuen et al. 2015), which is well included in the satellite pixel resolution (around 30 km^2 at the SES latitudes).

Figure 2d represents the histogram of wind speed data matched with the analyzed passive acoustic recordings.

From operational point of view, it is more significant to provide the correct classification of wind speed class than wind speed estimates. We thus identified from these data four different classes of wind speeds, labeled W_1 (below 7.5 m s^{-1}), W_2 (between 7.5 and 12.5 m s^{-1}), W_3 (between 12.5 and 17.5 m s^{-1}), and W_4 (higher than 17.5 m s^{-1}). Each class corresponds to an average increase of 5 m s^{-1} in wind speed, except for classes W_2 and W_3 . These classes correspond roughly to the sea states of the Beaufort scale from 2 to 5 (light wind) for W_1 , from 6 to 7 (high wind) for W_2 and W_3 , and from 8 to 9 (gale wind) for W_4 (Knudsen et al. 1948). Sea state 1 has not been used, as noise produced by weak wind speed is too low to be detected (Pensieri et al. 2013).

e. Multivariate multiple linear regression

1) MODEL FORMULATION

MMLR is a common statistical tool that informs about the linear relationship between dependent variables (i.e., the response) and independent variables (i.e., the predictors). With multiple response variables available, as in our case, the standard approach to modeling them is to regress each response variable separately on the same set of explanatory variables. However, although it is simple and popular, this univariate response approach may not be optimal, since they do not utilize the joint information among response variables. To solve this multiresponse regression problem, Breiman and Friedman (1997) proposed a method, called the curd

and whey, that uses the relationship among response variables to improve predictive accuracy. They showed that their method can outperform separate univariate regression approaches when there are correlations among the response variables. The multivariate general linear model is

$$\underbrace{\mathbf{Y}}_{(n,r)} = \underbrace{\mathbf{X}}_{(n,p+1)} \underbrace{\boldsymbol{\beta}}_{(p+1,r)} + \underbrace{\mathbf{E}}_{(n,r)}, \quad (6)$$

where $\mathbf{Y}$ is a matrix of n observations on r response variables. The $\mathbf{X}$ is a model matrix with columns for p regressors, including an initial column of ones for the regression constant, also called intercept. The $\boldsymbol{\beta}$ is a matrix of regression coefficients, one column for each response variable. The $\mathbf{E}$ is a matrix of errors that follows a Gaussian law $N(0, \sigma^2)$. Each response (dependent variable) gets its own linear equation of the form $\mathbf{Y}_r \sim \beta_{0p} + \sum_{p=1}^P \beta_{rp} \mathbf{X}_p + E_{n,r}$, conjointly estimated along with the other responses, and depending only on the predictors (independent variables), whose contributions are weighted by the regression coefficients β_{rp} (Breiman and Friedman 1997).

Parametric nonlinear models also exist, and represent the relationship between a continuous response variable and one or more continuous predictor variables in the form $\mathbf{Y} = f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\beta}) + \mathbf{E}$, where f is any function of $\mathbf{X}$ and $\boldsymbol{\beta}$ that evaluates each row of $\mathbf{X}$ along with the vector $\boldsymbol{\beta}$ to compute the prediction for the corresponding row of $\mathbf{Y}$.

In regression analysis terms, two noncorrelated predictors used in combination would predict unique variance in a response, while two more correlated predictors tend to predict shared variance, and so are less efficient. Prior to MMLR, a principal components analysis (PCA) can then be used to decorrelate predictors. PCA is a dimension reduction method that constructs independent new variables that are linear combinations of the original variables, by reducing redundancy (i.e., increasing standard deviation) between all variable dimensions. PCA was performed to see how our different SES and environmental variables were structured within the dataset, and whether the acoustic variables were responding to this structure. PCA also avoids multicollinearity problems in regression analysis (Zhang et al. 2006). Such problems make regression coefficients become unstable when highly correlated predictors are present. This further justifies the use of PCA in our study.

In this project, two different setups of the MMLR method were used. We first studied the contributions of SES and environment variables (i.e., the predictors $\mathbf{X}$, with $p = 6$) in the multivariate acoustic response characterizing the measured spectra (i.e., the responses $\mathbf{Y}$,

with $r = 10$) over all 10-s observations ($n = 66296$). Here, predictors are the different physical processes contributing independently to the distribution of acoustic energy in the measured spectra. In the second application, we evaluated the classification accuracy of an MMLR on PCA-processed acoustic measures ($p = 10$) in predicting wind speed ($r = 1$).

Also, all variables were standardized (i.e., zero mean and unitary variance), which allows a better comparison of regression weights between each predictor (especially with variables having different range values, as for depth and wind speed in our study), as the unstandardized weights are a function of the variance of the predictor variables. Standardization removes most of the correlation between linear and higher-order terms, which reduces the chance of adding these terms unnecessarily.

2) EVALUATION METRICS

To assess quantitatively the quality of our regression analysis and estimation, we provided as evaluation metrics the p value and the multiple correlation coefficient squared [ordinary R^2 (%)], also called the coefficient of determination. To further evaluate the impacts of each predictor in the MMLR model, we performed a sequential significance testing of each dependent variable through the metric ΔR_a^2 , defined as

$$\Delta R_a^2 = \frac{|R_a^2 - R_a^2(-p)|}{R_a^2}, \quad (7)$$

where R_a^2 refers to the adjusted R^2 metric, and $R_a^2(-p)$ refers to the adjusted R^2 metric obtained with an MMLR performed without the predictor p . This amount of change in R^2 is a measure of the increase in predictive power of a particular dependent variable, given the dependent variable or variables already in the model. In other words, this metric allows for performing significance testing to determine whether the addition of another dependent variable to the regression model significantly increases the value of R^2 . Also, the ordinary R^2 value systematically increases with the addition of terms to the regression model; consequently, in order to compare models with different numbers of predictors, we use the adjusted R^2 metric.

3. Results

a. Exploratory data analysis

Figure 3 shows a typical long-term spectral average computed over four acoustic recordings (i.e., a total of 16 h of recordings from four different days) from the SES individual A626019. SES variables and wind speed values are superimposed onto this spectrogram. It can

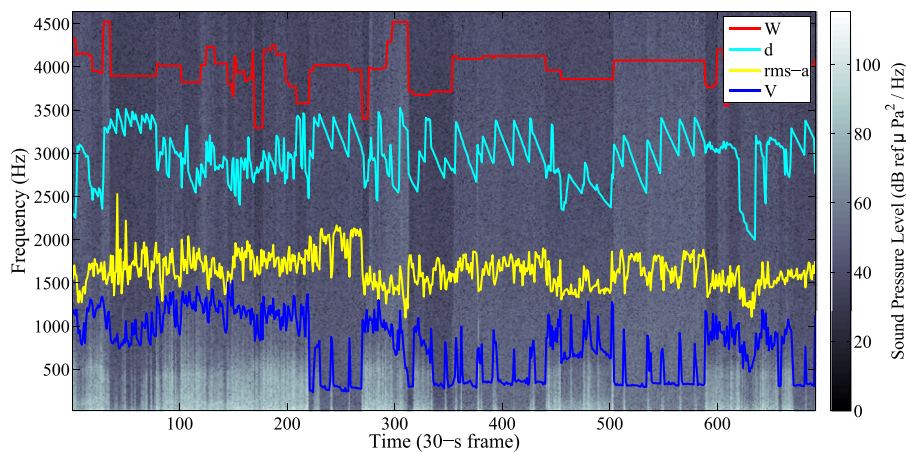


FIG. 3. Long-term spectrogram averaged over four acoustic recordings (i.e., a total of 16 h of recordings from four different days) from SES A626019. It was generated using 2048-point FFTs, Hamming windows, and no overlap, and averaged every 30 s. The four variables V , $\text{rms} - a$, d , and W are superimposed onto the spectrogram with relative linear scales ranging from 0.3 to 2.7 m s^{-1} , 0.2 to 10 m s^{-2} , -150 to 600 m, and 4 to 18 m s^{-1} , respectively.

be seen that the drift and active swimming phases are clearly identified through the acoustic energy in low-frequency bands that correlate well with the SES speed. Also, acoustic energy in higher-frequency bands appear to be reinforced with higher wind speed, independently from other SES-related variables. In other words, two frequency regions of the spectra are mainly impacted, showing first strong evidence of correlations: a first region in frequency subbands below 2.5 kHz, modulated accordingly to SES speed, and a second region above this frequency that is more dominated by wind speed.

To provide more details on the shape of spectra measured during drift phases, Fig. 4 represents an averaged spectrum computed during temporal phases with values of SES speed and acceleration belonging to their 5th percentiles. In the following, these phases will be referred to as extreme drift phases. Also, this averaged spectrum will be associated with our measured sound-scape. Regarding median levels across this acoustic dataset, they ranged between 47 and 70 $\text{dB ref } 1 \mu\text{Pa}^2 \text{Hz}^{-1}$. The spectrum slope falls off quickly from its highest level at 50 Hz at a rate of about -5 dB per octave up to

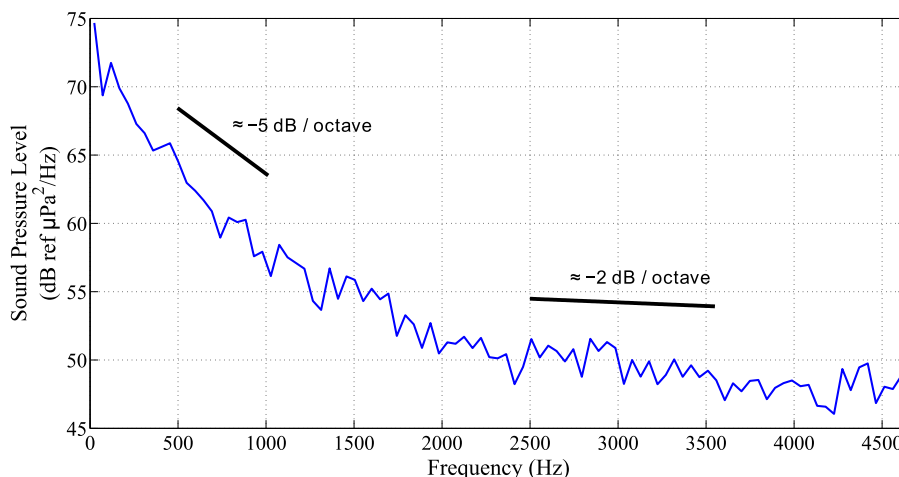


FIG. 4. Averaged spectrum computed during extreme drift phases, i.e., with values of SES speed and acceleration belonging to their 5th percentile. Two representative theoretical SS (dB per octave) are superimposed onto the spectrum. The approximate signs mean that these slopes are only locally correct in frequency (i.e., the first slope is a decrease of -5 dB within the octave 500–1000 Hz, and the second slope is a decrease of -2 dB within the octave 2500–5000 Hz).

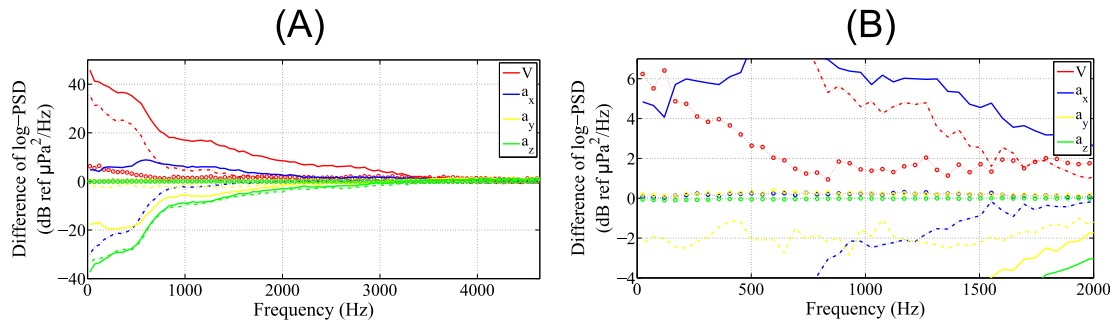


FIG. 5. Differences between averaged logarithmic PSD with values of SES speed and acceleration belonging to their 20th, 60th, and 95th percentiles (dot-plus-circle, dashed-dotted, and solid lines, respectively), and their 5th percentile. (a) The full spectrum, (b) a zoomed-in view of the frequency range [10; 2000] Hz and level range $[-8; 8]$ dB.

2 kHz, where it becomes flatter up to 5000 Hz, assuming a slope of -5 dB per octave.

We then quantified the averaged deformation of spectra due to SES displacements relative to this extreme drifting behavior. In Fig. 5, we computed the differences between averaged logarithmic power spectral density (PSD) with values of SES speed and acceleration belonging to their 20th, 60th, 95th percentiles (dot-plus-circle, dashed-dotted, and solid lines, respectively), and their 5th percentile. From Fig. 5a, we can observe that SES speed strongly impacts the acoustic data for frequencies lower than 2000 Hz, with variations that can reach 40 dB. The three acceleration components contribute to an increase in the measured noise below 800 Hz, with gains from -30 to -10 dB. From Fig. 5b, it can be observed from the dashed-dotted curves that the acoustic distortions from our marine soundscape spectrum above (see Fig. 4) are quite minimal, that is, in the order of magnitude of 5 dB with the SES speed and less than 1 dB with the acceleration variables. Also, we did not find any significant influences of depth on the acoustic features (see Fig. A1).

b. Correlation analysis

To provide a more global insight into the correlation structure of our variables, we performed a PCA on the complete variable dataset. Figure 6 shows both the orthonormal principal component coefficients of each variable on the first two principal axes and the principal component scores for each observation (i.e., the coordinates of the original data in the new coordinate system defined by the principal components). In the space of the principal components of the acoustic/SES/environmental variables, the first two principal components distinctly separate the different acoustic features. Indeed, these features move from the first to the second principal axis as their center frequencies increase. In other words, low-frequency SPL observations remain in

the bottom-right half-space, while the higher-frequency SPL observations are in the top-right half-space. We can now see how SES and wind speed variables distribute on the fan of SPL values. SES speed V is among low-frequency SPLs with a high score on the first PCA axis and a negative score on the second axis ($PCA_1 = 0.3$; $PCA_2 = -0.1$), while wind speed W contributes much more to the second PCA axis ($PCA_1 = -0.02$; $PCA_2 = 0.48$). The discriminative power over wind speeds with this PCA analysis is revealed by color mapping different classes of wind speed, W_1 to W_4 (defined in section 3) in Fig. 6. This plot illustrates the

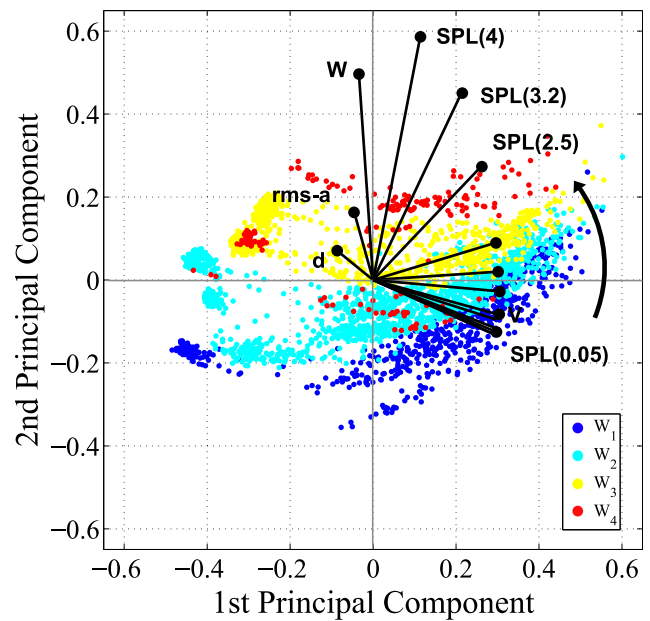


FIG. 6. Orthonormal PCA for each variable (blue lines), and the principal component scores for each observation resulting from the PCA in the first two PCA axes. For the sake of clarity, all the SPL acoustic features are located at their respective black bullet in increasing order, as illustrated by the black arrow. Also, observations are classified into four different classes of wind speeds, W_1 – W_4 , with different colors.

TABLE 4. Results of the MMLR model for the multivariate acoustic response. SES and environmental variables are taken as predictors. Results are reported in terms of regression coefficients, p values, ordinary R^2 , and ΔR_a^2 , as described in section 2. All numerical values have been rounded to the closest hundredth. Most significant regression results are in bold, and their P values are labeled with superscript letters.

	Regression coefficients							Ordinary R^2 (%)	ΔR_a^2					
	β_0	V	a_x	a_y	a_z	d	W		V	a_x	a_y	a_z	d	W
SPL(0.05)	0.1	0.33^a	0.09	0.11	0.07	-0.02	-0.01	88	0.76^b	0.12	0.1	0.11	<0.01	<0.01
SPL(0.2)	0.13	0.35^a	0.1	0.13	0.08	0.04	0.03	83	0.74^b	0.06	0.03	0.08	<0.01	<0.01
SPL(0.5)	0.04	0.37^a	0.09	0.05	0.04	0.03	0.04	76	0.88^b	0.04	0.02	0.06	<0.01	<0.01
SPL(1)	0.21	0.24^c	-0.03	0.07	0.04	0.07	0.05	54	0.66^b	0.04	0	0.05	0.01	0.1
SPL(1.6)	0.36	0.17^c	0.02	0.03	0.05	0.04	0.07	51	0.54^b	0.01	<0.01	0.02	0.08	0.26
SPL(2.5)	0.3	0.05	0.03	0.01	0.01	-0.01	0.08	45	0.37	0.09	<0.01	<0.01	0.1	0.41^b
SPL(3.2)	0.74	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.15^c	37	0.23	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	0.78^b
SPL(4)	0.8	0.03	0.01	0.02	0.01	-0.01	0.16^a	41	0.19	0.1	<0.01	<0.01	0.02	0.84^b
SS(1-2.5)	0.42	0.06	0.01	0.05	0.04	0.07	0.08	63	0.34	0.11	0.07	0.05	0.07	0.54
SS(2.5-4)	0.21	0.05	0.02	0.04	0.01	0.04	0.11^c	45	0.26	<0.01	0.04	0.03	0.01	0.72

^a $P < 0.01$.

^b $P > 0.05$.

^c $P < 0.05$.

positive correlation of wind speed over the second PCA axis. These first two principal components explained 80% (first component, 60%; second component, 20%) of the total variable variance.

These correlation tendencies were already highlighted through individual pairwise correlations between the acoustic, SES, and environmental features (see appendix B). To further compare the contributions of SES and environmental variables to the measured spectra, a multivariate regression analysis was eventually conducted. Previous correlation analysis (section 1) showed that our acoustic responses are at least moderately correlated, which is necessary for the multivariate regression analysis to make sense. Also, our acoustic database is assumed to be large enough so this analysis is reliable. We then modeled the multivariate ten-dimensional acoustic response with an MMLR model, and used SES and environment parameters as independent predictors. Table 4 shows the details of this analysis, with the regression coefficients β set up in the multivariate regression equations of the model displayed in the first column, and the evaluation metrics ordinary R^2 and ΔR_a^2 in the other two columns. The same results as in the previous analysis are reached, with this clear duality between the variables SES and wind speeds in explaining acoustic feature variations, largely dominating the other variables of SES depth and acceleration.

SES speed has coefficients at least around 10 times as superior as the other predictors in the response from SPL(0.05) to SPL(0.2). Wind speed becomes prevalent in the higher-frequency SPL responses, which is consistent with the correlation analysis results above. Above SPL(3.2), the coefficients of wind speed are at least around 4 times as superior as the other variables,

and as high as 10 times for SPL(4). The acoustic response SPL(4) is predicted by the equation $\text{SPL}(4) = 0.8 + 0.03 \times V + 0.01a_x + 0.02a_y + 0.01a_z - 0.01 \times d + 0.16 \times W$. Also, 41% of the variance in the measure of SPL(4) can be explained by measures of all predictors, with a relative contribution of the wind speed equal to 0.84. Observing the R^2 values, it can be stated that the model better fits the low-frequency data through the SES speed. Regarding depth and acceleration, their contributions remain quite constant in the different acoustic responses and are largely dominated by either the SES speed or the wind speed.

c. Wind dependence of ambient noise

1) QUALITATIVE OBSERVATIONS

In Fig. 7, passive acoustic recording spectra have been median averaged on the basis of our four wind speed classes, W_1 – W_4 , for the drift (Fig. 7a) and active swimming (Fig. 7b) phases. We superimposed onto these spectra the Wenz curves (Wenz 1962), expressed by

$$\text{SPL}(f, U) = \alpha - 5 \log_2(f) + 5 \log_2(U), \quad (8)$$

where we used the median of each wind speed class for the value of U , and arbitrarily set α so the first curve fits the first class W_1 . Note that because of α , Eq. (8) does not depict exactly Wenz curves. Adding an offset is necessary, probably because the global ambient noise level is site specific. The Wenz curves state that doubling frequency reduces the noise level by 5 dB, and that doubling wind speed (in kt; 1 kt = 0.51 m s⁻¹) increases the noise level by 5 dB. In Fig. 7, we can see that the averaged measured spectra follow the Wenz predictions. This is particularly true for frequencies above 2.5 kHz, both in terms of noise level (i.e., SPL increases of +5, 3, and

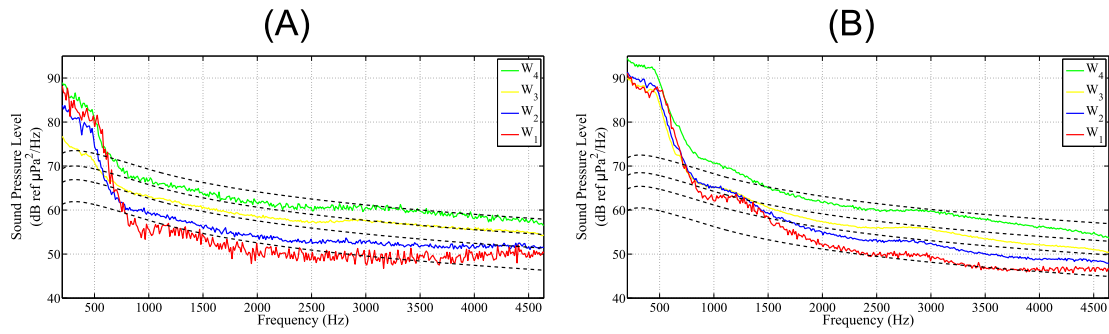


FIG. 7. Representation of four averaged ambient noise spectra corresponding to the different wind speed classes, W_1 – W_4 , for the (a) drift and (b) active swimming phases. The superimposed black dotted curves correspond to the Wenz curves, computed with the center wind speed value of each interval.

2.5 dB between our four classes at a given frequency) and in terms of spectral slope (for a given wind speed). Differences can also be observed between the measured spectra of the drift and active swimming phases, with a better fit to the Wenz curves for the drift phases. But still a strong discrimination is noticeable between the spectra of the different wind speed classes for both active swimming and drifting behavior.

2) QUANTITATIVE VALIDATION

In a further experiment, a sample fitting verification was performed to testify the effectiveness of different regression classifiers to predict wind speed. These classifiers were tested on a drift-only dataset and on the complete dataset. A fivefold cross validation with a stratified procedure has been applied to each dataset, meaning that each fold contains roughly the same proportions of observations from the different wind speed classes.

As listed in the first column of Table 5, we first tested a simple linear regression model, using the SPL(4) as the single predictor. This descriptor was the most correlated acoustic feature with wind speed ($r = 0.67$, $P < 0.001$, from Fig. B1). We also tested a multiple linear model and a nonlinear regression model, using as predictors the first three principal axes of a PCA performed on the ten-dimensional acoustic vector, labeled PCA_1 , PCA_2 , and PCA_3 , respectively.

As an evaluation metric, we use the rms difference ε_{ws} between the ground truth and the estimated wind speed.

The average error $\overline{\varepsilon}_{ws}$ was then computed on the resulting errors in each fold. We also report the median absolute deviation on these tests to assess the statistical significance of our experiments.

An example of wind speed prediction is represented in Fig. 8a using the multiple linear regression model superimposed onto the ground truth. Figure 8b represents the fitting plot of the adjusted model, showing that the model as a whole is significant (i.e., a horizontal line does not fit between the confidence bounds). The slope of this line is the slope of a fit to the predictors projected onto their best-fitting direction—in other words, the norm of the coefficient vector. Wind speed values are displayed in unstandardized (natural) units.

Table 5 displays for each regression model the average error $\overline{\varepsilon}_{ws}$ and coefficient R^2 , differentiating the drift and active swimming phases. The regression equations (with their standard deviation over the folds) set during training and used for prediction are $4.74(\pm 0.02) + 0.6(\pm 0.03)\text{SPL}(5)$ and $9.6(\pm 0.002) + 0.01(\pm 0.002)\text{PCA}_1 + 0.51(\pm 0.006)\text{PCA}_2 - 0.42(\pm 0.001)\text{PCA}_3$ for the simple linear model and the PCA-based multiple linear regression model, respectively. Globally, the classification performance with our models was very satisfactory, with ε_{ws} ranging from 1.9 to 3.4 m s^{-1} . The best-performing model for the drift phases was the PCA-based multiple linear regression model, although no major improvement was brought by any of our classifiers regarding the simple linear regression model. Indeed, taking the complete ten-dimensional

TABLE 5. Performance of different regression classifiers to estimate wind speed. Performance is reported in terms of the wind speed estimation error $\overline{\varepsilon}_{ws}$ (m s^{-1}), with its standard deviation.

Classifiers	Drift phases		Active swimming phases	
	$\overline{\varepsilon}_{ws}$ ($\pm$ std dev) (m s^{-1})	Ordinary R^2	$\overline{\varepsilon}_{ws}$ ($\pm$ std dev) (m s^{-1})	Ordinary R^2
Simple linear regression	2.2 ± 0.6	54	3.4 ± 0.8	74
PCA-based multiple linear regression	1.9 ± 0.3	63	2.7 ± 0.3	81
PCA-based nonlinear regression	2.1 ± 0.4	58	2.6 ± 0.5	65

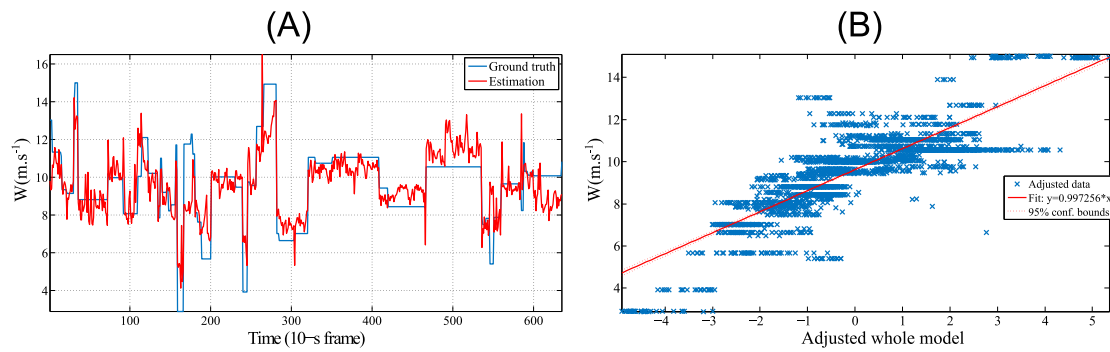


FIG. 8. Predictions of wind speeds obtained with an MMLR model, taking acoustic features as predictors. (a) The ground truth (blue) and the rms error of the model (orange) are superimposed. (b) The fitting plot of the adjusted model is represented.

acoustic feature vector instead of one single SPL feature only reduces ε_{ws} from 2.2 to $1.9^{-1} \text{ m s}^{-1}$. Similarly, the increase in model complexity with the nonlinear model did not induce noticeable performance improvement, reducing ε_{ws} from 2.2 to $2.1^{-1} \text{ m s}^{-1}$. For the active swimming phases, the use of more complex models brought more significant improvement, reducing the average error ε_{ws} from 3.4 to $2.7^{-1} \text{ m s}^{-1}$ and 3.4 to $2.6^{-1} \text{ m s}^{-1}$ for the multiple linear and nonlinear regression models, respectively, in reference to the simple linear regression model. For these phases, the multiple linear model includes a more complete modeling of the full spectrum that is beneficial to wind speed estimation. Also, we can note that the PCA-processed acoustic features stabilize wind speed predictions between the different folds.

4. Discussion

Our correlation and regression analysis allowed us to detail the acoustic contributions of different explanatory variables in the overall measured spectra. These variables depend on either the SES (displacements and dive types) or the environment. Our results show that the variables of SES swimming speed and acceleration impacted mostly low-frequency SPLs, with regression coefficients decreasing with the increase of SPL center frequencies (see Table 3). These high low-frequency SPL values most likely result from the turbulent flow noise generated by the SES body when moving in the fluid. Indeed, the turbulence of a flow is characterized by its Reynolds number, which mainly depends on a representative dimension of solid-fluid contact, and the speed of the solid. For the SES, the solid dimension D_h is taken as the dimension of the head, that is, 0.2 m, and with V between 1 and 3 m s^{-1} . The Reynolds number can then be computed as

$$R = \frac{\rho V D_h}{\mu} \approx 4 \times 10^5 \quad (9)$$

with $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ as the water density (rough approximation of the depth-dependent density of ocean water that is denser) and $\mu = 1 \text{ cP}$ is the water viscosity. For Reynolds numbers higher than 16000, a fully developed turbulent flow field is generated around the hydrophone, since the pressure fluctuations in the surrounding fluid are in direct contact with the active area of the hydrophone. As shown in specialized literature (Tennekes and Lumley 1972; Van Dyke 1982), for frequencies in the inertial subrange, the energy spectrum of turbulence is expected to scale with frequency as $f^{-5/3}$, which is equivalent to a spectral slope of $-17 \text{ dB decade}^{-1}$. To fully validate the hypothesis of a turbulent flow-generated noise, a comparison of the averaged spectra slope during active swimming phases and the theoretical slope of a chaotic flow noise, following a frequency decrease in $f^{-5/3}$, was performed over the band frequency ranging from 10 to 1000 Hz. A Pearson correlation of $r = 0.86$ ($P < 0.0001$) was found and then showed good agreement with turbulent self-noise. The effect of flow turbulence on the acoustic recordings has already been studied in previous studies. Barclay and Buckingham (2013) proposed a postprocessing method to remove from the computation of spatial coherence the contributions of pseudosound, while Burgess et al. (1998) showed that flow noise could be used as a proxy for the hydrophone carrier speed.

As SES speed and acceleration are highly reduced during drift phases (a strong negative correlation coefficient between drift phases and V , $r = -0.95$, $P < 0.0001$), the self-noise due to pressure fluctuations around the hydrophone is also reduced (Burgess et al. 1998). This tendency has already been documented in different moving hydrophone situations, like with vertical profilers (Barclay and Buckingham 2013). These drift phases then provide clean experimental conditions for acoustic analysis, with a domination of environment-related acoustic events over SES variables.

The SES depth d was seen to have much minor effects on the measured spectra, with regression coefficients inferior to 0.4 ($P < 0.0001$) over the different acoustic descriptors. This result can be explained easily. Indeed, the SES explanatory variables impacting the spectra are directly linked to the SES, and so independent from its depth. Also, our main explanatory variable for the environment, the wind speed, is assumed to be a uniformly distributed surface sound source, with an underwater propagation that is at near-vertical angle, as for most geophysical sound sources (wind/rain/drizzle). Refraction by the sound speed profile of the associated acoustic energy is then negligible, and is consequently independent of depth if absorption is neglected. In our data, absorption effects were not significant in comparison to the other explanatory variables of SES speed and wind speed. This property of depth independence has also been studied by Barclay and Buckingham (2013), validating experimentally Cron and Sherman's (1962) theory that predicts a constant (vertical) directional density function for wind-driven sources.

Our results from the marine soundscape part will be the focus now. To capture a marine soundscape, a full non-corrupted measured spectrum (typically from 10 to 10000 Hz) is needed. According to our correlation analysis, the most corrupted frequency bands are below 1 kHz, with major contributions from V . This ensures us that for low V values, corruption from nonenvironmental sources should be canceled out for these SPL responses. Following this idea, we performed a measure of our marine soundscape using only on the 5th percentile values of the SES speed and acceleration (see Fig. 4), referring to these dives as extreme drifts, when the SES is very slow. These V values range from 0.2 to 0.6 m s^{-1} and induce variations strictly inferior to 5 dB in the SPL(0.05) (from Fig. 5), which are negligible regarding SPL variations in the same frequency band from classical acoustic sources present in a marine soundscape [e.g., Tsang-Hin-Sun et al. (2015) reported, for the same geographical area, daily variations in the sound pressure level in the order of 20 dB at 10 Hz and 15 dB at 50 Hz, which are associated with tectonic and shipping noise, respectively]. The spectrum shape obtained during these drift phases is quite similar from standard deep-ocean ambient noise spectra. The deep-water Atlantic curve falls off rapidly from its highest level at 50 Hz at a rate of about -8 dB per octave. It is flat from 200 to 400 Hz and then assumes a slope of -4 dB to 1000 Hz (Perrone 1969; Marshall 2005). Our spectrum shape can also be well approximated by the standard Knudsen–Alford–Emling curves, which are straight lines of constant negative slope of 5 dB per octave over the full frequency range (Knudsen et al. 1948). Considering the median levels of our averaged spectrum, in the Kerguelen Islands region, they were the same order

of magnitude as those recently reported in the Indian Ocean by Tsang-Hin-Sun et al. (2015). For example, our SPLs ranged generally from 65 to 75 dB ref $1 \mu\text{Pa}^2 \text{Hz}^{-1}$ in the frequency band [50–100] Hz, whereas levels across the sites studied in Tsang-Hin-Sun et al. (2015) have been reported to be 75–85 dB ref and 65–70 dB ref $1 \mu\text{Pa}^2 \text{Hz}^{-1}$ (with the hydrophone WKER1, moored at 500 m below the sea surface) at 50 and 100 Hz, respectively. These levels are quite coherent with a measure done above the sound fixing and ranging (SOFAR) channel.

Regarding the measurement of wind speed, studies in acoustical meteorology (Vagle et al. 1990; Nystuen and Selsor 1997; Ma and Nystuen 2005; Pensieri et al. 2015) have shown that surface wind speed impacts the linearly ocean ambient noise level in such a way that relatively simple computational approaches (typically a constant threshold set to a one-third octave subband-averaged SPL) are sufficient to predict wind speed from underwater acoustics. Selecting the proper frequency bands is often the critical issue in such studies. It is known that SPL spectra associated with wind result from resonant acoustic radiation from bubbles generated by breaking waves (Medwin and Beaky 1989). The population size distribution of the bubbles defines the shape of the SPL spectra, and this shape of distribution is invariant with wind speed. However, as wind speed increases, the total bubble concentration increases because the fractional area coverage of breaking waves increases. The increase in bubble concentration leads to a concomitant increase in the SPL across all frequencies. This uniform increase as a function of frequency allows the SPL at a single frequency to be used to estimate wind speed. For example, the wind speed algorithm Wind Observations Through Ambient Noise (WOTAN) from Vagle et al. (1990) is based on the SPL at 8 kHz. More recently, Cauchy et al. (2015) applied the WOTAN algorithm to acoustic passive recordings from an underwater glider, with an error of 2 m s^{-1} in wind speed estimates. In this paper, we first observed a uniform increase of sound levels with an increasing wind speed over a range of approximately 15 dB (from Fig. 7) that was observed in other studies for similar wind speed values (e.g., Pensieri et al. 2015). We also tested the use of different regression models to predict the wind speed from the acoustic descriptors detailed in Table 4. Our simplest model consists of a linear regression using the acoustic feature SPL(4) as predictor, in a very similar way as the WOTAN algorithm. The classification performance of this simple model was satisfactory, with an accuracy of 2.1 m s^{-1} that validates the possibility of predicting wind speed from our spectra using similar methods as those found in literature (although the 8-kHz sample frequency could not be used in our study due to

technological limitations). Our numerical experiments also tested more complex models, such as a multiple linear regression model, using PCA-based acoustic features as predictors and a multiple nonlinear regression model. Using a higher number of acoustic predictors and nonlinear fitting models did not induce significant performance enhancement, leading to the conclusion that the SES passive acoustic recordings do not increase the processing complexity in the task of extracting wind speed information from a measured spectra.

Another interesting finding of our study is that wind speed estimation can be performed quite independently of SES diving behavior. Indeed, the error estimations between the drift and active swimming phases do not show discrepancies statistically significant, with average errors of $\varepsilon_{ws} = 1.9 \pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$ and $\varepsilon_{ws} = 2.7 \pm 0.3 \text{ m s}^{-1}$ for the multilinear regression model. This result can be explained as follows. Noise spectra for hydrophones in the deep ocean show little dependence on wind at frequencies below 400 Hz (Piggott 1964). Most “meteo bands” used in studies are between 2 and 10 kHz, which fit well with the frequency subbands identified in our study to extract wind speeds. This result shows great promise in using SES as an acoustic glider for wind speed estimation. Because so few passive drift dives are performed daily (Dragon et al. 2012), wind speed measures would become difficult to assess at a fine temporal scale using only these dives. In contrast, our ability to measure wind speed accurately over all dive phases provides a high-frequency time series, with SES performing approximately 60–70 dives daily (Dragon et al. 2012).

5. Conclusions

Measuring and interpreting marine soundscape require passive acoustic recordings that are free from nonenvironmental noise. This current study explored the possibility of measuring soundscape with recordings from biologged southern elephant seals (SES). This technological approach offers valuable advantages, such as a high temporal resolution in acoustic measurements (in comparison to satellite-based measures). Also, SES allow the exploration of regions that are inaccessible to other technologies (e.g., underwater gliders). Indeed, the strong east–west current speeds and the rough sea state in the Southern Ocean make the use of regular gliders very complicated, while these harsh environmental conditions are not a problem for SES.

In this study, a multivariate multiple linear regression framework was essentially used to discriminate the acoustic contributions between the processes related to SES and the ocean environment. Our results showed

that with passive acoustic recordings from a tagged free-ranging SES, minimal sound corruption from the SES could be obtained during extreme drift phases, allowing for the analysis of marine soundscape. Also, in frequency bands higher than 2.5 kHz, wind speed could be estimated using simple classification approaches (such as linear regression models), independently from the SES biological processes.

Future studies should use a more complete recording dataset, including additional environmental (e.g., rain, current, aquatic seisms), anthropological (e.g., ship traffic), and biological (e.g., whale vocalizations) variables that were not significantly present in our current dataset. This will be needed to fully validate our system as an operational measuring system to measure marine soundscape and to explain its characteristics with a full set of acoustic sources. Also, the ability to associate mobile acoustic data with estimates of surface weather conditions allows for a novel approach to studying air–sea interactions, which will need to be tested at a larger scale, that is, using different types of mobile platforms (e.g., gliders, profiling floats), in different ocean environments.

Acknowledgments. The authors are indebted to several researchers of the CEBC (Chizé, France), in particular Gaetan Richard, for assistance in sample preparation, data collection, processing algorithms, as well as numerous exchanges on SES biology. This study was conducted as part of the Institut Polaire program 109 (ecology of seabirds and marine mammals, P. I. H. Weimerskirch). The authors also would like to thank the Direction Générale de l’Armement (DGA, France) for supporting this work, the Fondation Total for funding the Acousonde as part of the Sea Bio-Sound project, the CNES-TOSCA, and the French Polar Institute for logistical and financial support, as well as all the Kerguelen fieldworkers for collecting data.

APPENDIX A

Influence of Depth on the Acoustic Features

Figure A1 shows the effect of depth on the SPL descriptors. We computed the differences between the SPLs above 100 m and at successive depths down to 800 m, averaged over 200 descending dives of the SES. We made the assumption that during the duration of these dives, the ocean ambient noise does not vary significantly. We can observe that the two lowest-frequency SPLs, SPL(0.05) and SPL(0.5), vary accordingly with the SES swimming speed V (represented by the black dashed curve) rather

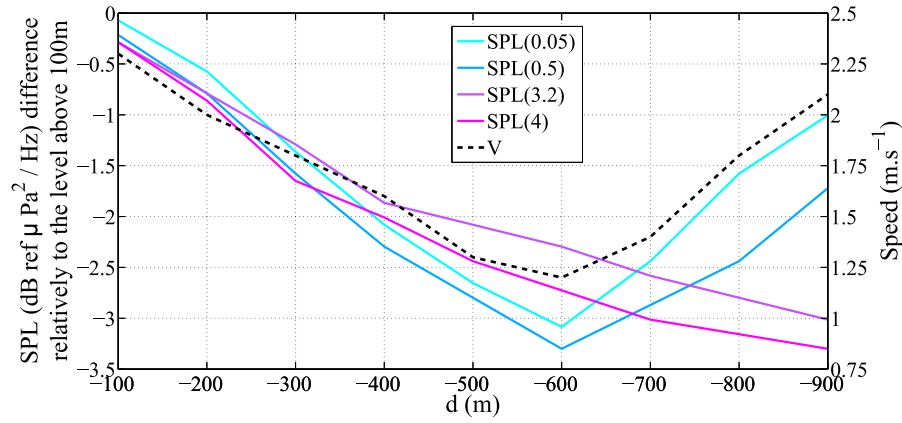


FIG. A1. Effects of depth on the SPL descriptors. The SES speed has also been superimposed onto these curves. Median values have been computed every 100 m in depth d .

than with depth, and remain nearly parallel from one depth measure point to another. On the contrary, the two highest-frequency SPLs, SPL(3.2) and SPL(4), have a lower decreasing rate that seems to be more decorrelated to V and could traduce some attenuation effects due to absorption or geometrical dispersion. Overall, depth induces some minor acoustic modifications that remain globally inferior to 2 dB above 500 m.

APPENDIX B

Pairwise Correlation and Scattering Plot of Variables

The pairwise correlation between the acoustic, SES, and environmental features was performed using standardized values. Resulting correlation coefficients are provided in Fig. B1 along with scattering plots. Strong

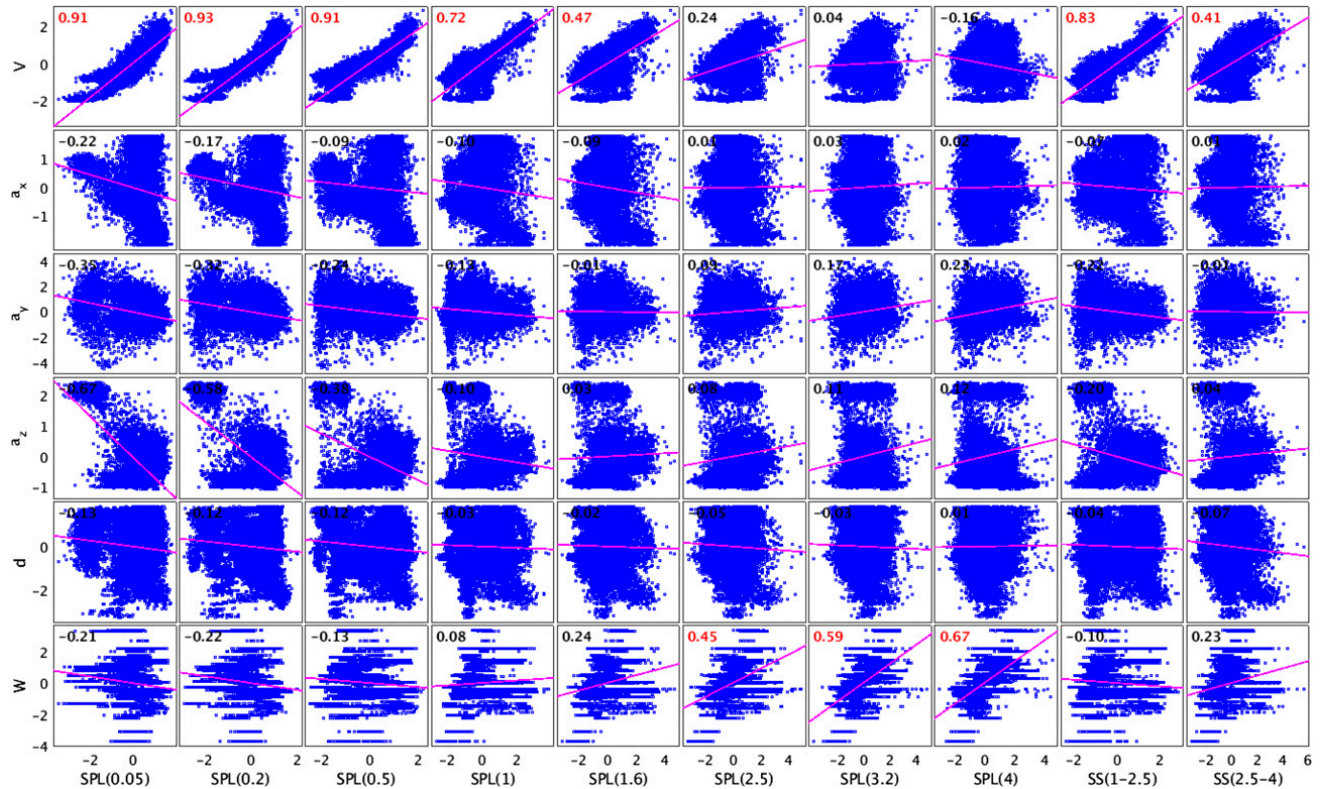


FIG. B1. Scattering plots and pairwise correlations between acoustic variables and SES and environment variables, using standardized values. Pearson correlation coefficients higher than 0.4, and with a P value below 0.001 (red).

correlation relations appear between specific parameters, such as SES speed with SPL(0.05), SPL(0.2), and SPL(0.5) ($r > 0.9$, $P < 0.001$), and wind speed with SPL(3.7) and SPL(4) (r of 0.59 and 0.67 with $P < 0.001$, respectively). Other variables, such as SES depth and acceleration, did not show significant correlation with any acoustic features, with coefficients remaining below 0.2 ($P < 0.001$). An analysis of pairwise correlations between SES and environment variables also informed us that they were relatively low ($r < 0.2$, with an average P value < 0.001). Also, we can observe that globally SPL descriptors explain better data variability than SS descriptors.

REFERENCES

- Aguzzi, J., and Coauthors, 2011: The new seafloor observatory (OBSEA) for remote and long-term coastal ecosystem monitoring. *Sensors*, **11**, 5850–5872, doi:10.3390/s110605850.
- Aoki, K., and Coauthors, 2011: Northern elephant seals adjust gliding and stroking patterns with changes in buoyancy: Validation of at-sea metrics of body density. *J. Exp. Biol.*, **214**, 2973–2987, doi:10.1242/jeb.055137.
- Bailleul, F., M. Authier, S. Ducatez, F. Roquet, J. B. Charrassin, Y. Cherel, and C. Guinet, 2010: Looking at the unseen: Combining animal bio-logging and stable isotopes to reveal a shift in the ecological niche of a deep-diving predator. *Ecography*, **33**, 709–719, doi:10.1111/j.1600-0587.2009.06034.x.
- Barclay, D. R., and M. J. Buckingham, 2013: Depth dependence of wind-driven, broadband ambient noise in the Philippine Sea. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **133**, 62–71, doi:10.1121/1.4768885.
- Baumgartner, M. F., S. M. Van Parijs, F. W. Wenzel, C. J. Tremblay, H. C. Esch, and A. M. Warde, 2008: Low frequency vocalizations attributed to sei whales (*Balaenoptera borealis*). *J. Acoust. Soc. Amer.*, **124**, 1339–1349, doi:10.1121/1.2945155.
- Bentamy, A., and D. Croize-Fillon, 2012: Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements. *Int. J. Remote Sens.*, **33**, 1729–1754, doi:10.1080/01431161.2011.600348.
- , and —, 2015: Daily ASCAT surface wind fields. IFREMER Tech. Rep., 15 pp.
- Breiman, L., and J. H. Friedman, 1997: Predicting multivariate responses in multiple linear regression. *J. Roy. Stat. Soc.*, **59B**, 3–54, doi:10.1111/1467-9868.00054.
- Burgess, W. C., 2000: The bioacoustic probe: A general-purpose acoustic recording tag. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **108**, 2583–2583, doi:10.1121/1.4743598.
- , P. Tyack, B. Le Boeuf, and D. P. Costa, 1998: A programmable acoustic recording tag and first results from free-ranging northern elephant seals. *Deep-Sea Res. II*, **45**, 1327–1351, doi:10.1016/S0967-0645(98)00032-0.
- Cauchy, P., T. Pierre, L. Mortier, and B. Marie-Noelle, 2015: Passive acoustics embedded on gliders—Weather observation through ambient noise. *Proc. Third Underwater Acoustics Conf. and Exhibition (UACE2015)*, Platanias, Crete, Greece, European Acoustics Association, 565–570.
- Chapman, N. R., and A. Price, 2011: Low frequency deep ocean ambient noise trend in the Northeast Pacific Ocean. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **129**, EL161, doi:10.1121/1.3567084.
- Charrassin, J. B., and Coauthors, 2008: Southern Ocean frontal structure and sea-ice formation rates revealed by elephant seals. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **105**, 11 634–11 639, doi:10.1073/pnas.0800790105.
- Costa, D. P., J. M. Klinck, E. E. Hofmann, M. S. Dinniman, and J. M. Burns, 2008: Upper ocean variability in west Antarctic Peninsula continental shelf waters as measured using instrumented seals. *Deep-Sea Res. II*, **55**, 323–337, doi:10.1016/j.dsr2.2007.11.003.
- Cron, B. F., and C. H. Sherman, 1962: Spatial-correlation functions for various noise models. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **34**, 1732–1736, doi:10.1121/1.1909110.
- Dragon, A.-C., A. Bar-Hen, P. Monestiez, and C. Guinet, 2012: Horizontal and vertical movements as predictors of foraging success in a marine predator. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **447**, 243–257, doi:10.3354/meps09498.
- Duennebie, F. K., and Coauthors, 2002: HUGO: The Hawaii Undersea Geo-Observatory. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **27**, 218–227, doi:10.1109/JOE.2002.1002476.
- Favali, P., 2013: NEMO-SN1 abyssal cabled observatory in the Western Ionian Sea. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **38**, 358–374, doi:10.1109/JOE.2012.2224536.
- Genin, A., G. Richard, J. Jouma'a, B. Picard, N. El Ksabi, J. Vacqu  -Garcia, and C. Guinet, 2015: Characterization of postdive recovery using sound recordings and its relationship to dive duration, exertion and foraging effort of southern elephant seals (*Mirounga leonina*). *Mar. Mammal Sci.*, **31**, 1452–1470, doi:10.1111/mms.12235.
- Glowacki, O., G. B. Deane, M. Moskalik, Ph. Blondel, J. Tegowski, and M. Blaszczyk, 2015: Underwater acoustic signatures of glacier calving. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 804–812, doi:10.1002/2014GL062859.
- Guinet, C., and Coauthors, 2013: Calibration procedures and first dataset of Southern Ocean chlorophyll *a* profiles collected by elephant seals equipped with a newly developed CTD-fluorescence tags. *Earth Syst. Sci. Data*, **5**, 15–29, doi:10.5194/essd-5-15-2013.
- , and Coauthors, 2014: Southern elephant seal foraging success in relation to temperature and light conditions: Insight into prey distribution. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **499**, 285–301, doi:10.3354/meps10660.
- Hawkins, R., J. Miksis-Olds, D. L. Bradley, and C. Smith, 2014: Periodicity in ambient noise and variation based on different temporal units of analysis. *Proc. Meet. Acoust.*, **17**, 070035, doi:10.1121/1.4772729.
- Johnson, M., and P. Tyack, 2003: A digital acoustic recording tag for measuring the response of wild marine mammals to sound. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **28**, 3–12, doi:10.1109/JOE.2002.808212.
- Klinck, H., and Coauthors, 2012: Correction: Near-real-time acoustic monitoring of beaked whales and other cetaceans using a Seaglider. *PLoS One*, **7**, 1–8, doi:10.1371/annotation/57ad0b82-87c4-472d-b90b-b9c6f84947f8.
- Knudsen, V., R. Alford, and J. Emling, 1948: Underwater ambient noise. *J. Mar. Res.*, **7**, 410–429.
- Küsel, E. T., D. K. Mellinger, L. Thomas, T. A. Marques, D. Moretti, and J. Ward, 2011: Cetacean population density estimation from single fixed sensors using passive acoustics. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **129**, 3610–3622, doi:10.1121/1.3583504.
- Ma, B. B., and J. A. Nystuen, 2005: Passive acoustic detection and measurement of rainfall at sea. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 1225–1248, doi:10.1175/JTECH1773.1.
- Marshall, S., 2005: Depth dependence of ambient noise. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **30**, 275–281, doi:10.1109/JOE.2005.850876.
- Matsumoto, H., J. H. Haxel, R. P. Dziak, D. Bohnenstiehl, and R. W. Embley, 2011: Mapping the sound field of an erupting

- submarine volcano using an acoustic glider. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **129**, EL94, doi:10.1121/1.3547720.
- , D. R. Bohnenstiehl, J. Tournadre, R. P. Dziak, J. H. Haxel, T.-K. A. Lau, M. J. Fowler, and S. A. Salo, 2014: Antarctic icebergs: A significant natural ocean sound source in the Southern Hemisphere. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **15**, 3448–3458, doi:10.1002/2014GC005454.
- Medwin, H., and M. M. Beaky, 1989: Bubble sources of the Knudsen sea noise spectra. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **86**, 1124–1130, doi:10.1121/1.398104.
- Miksis-Olds, J. L., D. L. Bradley, and X. M. Niu, 2013: Decadal trends in Indian Ocean ambient sound. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **134**, 3464–3475, doi:10.1121/1.4821537.
- Miller, P. J. O., M. P. Johnson, P. L. Tyack, and E. A. Terray, 2004: Swimming gaits, passive drag and buoyancy of diving sperm whales *Physeter macrocephalus*. *J. Exp. Biol.*, **207**, 1953–1967, doi:10.1242/jeb.00993.
- Mitani, Y., R. D. Andrews, K. Sato, A. Kato, Y. Naito, and D. P. Costa, 2010: Three-dimensional resting behaviour of northern elephant seals: Drifting like a falling leaf. *Biol. Lett.*, **6**, 163–166, doi:10.1098/rsbl.2009.0719.
- Nair, N. R., N. Elizabeth Shani, R. Raju, and S. Satheeshkumar, 2015: Underwater ambient noise variability from satellite data—An Indian Ocean perspective. *2015 IEEE Underwater Technology (UT)*, 4 pp., doi:10.1109/UT.2015.7108285.
- Nieukirk, S. L., K. M. Stafford, D. K. Mellinger, R. P. Dziak, and C. G. Fox, 2004: Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **115**, 1832–1843, doi:10.1121/1.1675816.
- Nystuen, J. A., and H. D. Selsor, 1997: Weather classification using passive acoustic drifters. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**, 656–666, doi:10.1175/1520-0426(1997)014<0656:WCUPAD>2.0.CO;2.
- , M. A. Anagnostou, E. M. Anagnostou, and A. Papadopoulos, 2015: Monitoring Greek seas using passive underwater acoustics. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 334–349, doi:10.1175/JTECH-D-13-00264.1.
- Pensieri, S., R. Bozzano, M. Anagnostou, E. Anagnostou, R. Bechini, and J. Nystuen, 2013: Monitoring the oceanic environment through passive underwater acoustics. *2013 MTS/IEEE OCEANS—Bergen*, 10 pp., doi:10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607995.
- , —, J. A. Nystuen, E. N. Anagnostou, M. N. Anagnostou, and R. Bechini, 2015: Underwater acoustic measurements to estimate wind and rainfall in the Mediterranean Sea. *Adv. Meteor.*, **2015**, 612512, doi:10.1155/2015/612512.
- Perrone, A. J., 1969: Deep-ocean ambient-noise spectra in the northwest Atlantic. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **46**, 762, doi:10.1121/1.1911759.
- Piggott, C. L., 1964: Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of the Scotian Shelf. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **36**, 2152, doi:10.1121/1.1919337.
- Rahmati, M., P. Pandey, and D. Pompili, 2014: Separation and classification of underwater acoustic sources. *2014 Underwater Communications and Networking*, Sestri Levante, Italy, CMRE, doi:10.1109/UComms.2014.7017145.
- Richard, G., J. Vacqu  -García, J. Jouma'a, B. Picard, A. G  nin, J. P. Y. Arnould, F. Bailleul, and C. Guinet, 2014: Variation in body condition during the post-moult foraging trip of southern elephant seals and its consequences on diving behaviour. *J. Exp. Biol.*, **217**, 2609–2619, doi:10.1242/jeb.088542.
- Rogers, E. O., J. G. Genderson, W. S. Smith, G. F. Denny, and P. J. Farely, 2004: Underwater acoustic glider. *2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, Vol. 3, IEEE, 2241–2244, doi:10.1109/IGARSS.2004.1370808.
- Ropert-Coudert, Y., and R. P. Wilson, 2005: Trends and perspectives in animal-attached remote sensing. *Front. Ecol. Environ.*, **3**, 437–444, doi:10.1890/1540-9295(2005)003[0437:TAPIAR]2.0.CO;2.
- Roquet, F., Y.-H. Park, C. Guinet, F. Bailleul, and J.-B. Charrassin, 2009: Observations of the Fawn Trough Current over the Kerguelen Plateau from instrumented elephant seals. *J. Mar. Syst.*, **78**, 377–393, doi:10.1016/j.jmarsys.2008.11.017.
- Rudnick, D. L., R. E. Davis, C. C. Eriksen, D. M. Fratantoni, and M. J. Perry, 2004: Underwater gliders for ocean research. *Mar. Technol. Soc. J.*, **34**, 73–84, doi:10.4031/002533204787522703.
- Sato, K., Y. Mitani, M. F. Cameron, D. B. Siniff, and Y. Naito, 2003: Factors affecting stroking patterns and body angle in diving Weddell seals under natural conditions. *J. Exp. Biol.*, **206**, 1461–1470, doi:10.1242/jeb.00265.
- Sirovic, A., S. M. Wiggins, and E. M. Oleson, 2013: Ocean noise in the tropical and subtropical Pacific Ocean. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **134**, 2681–2689, doi:10.1121/1.4820884.
- Tennekes, H., and J. L. Lumley, 1972: *A First Course in Turbulence*. MIT Press, 300 pp.
- Tournadre, J., 2014: Anthropogenic pressure on the open ocean: The growth of ship traffic revealed by altimeter data analysis. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 7924–7932, doi:10.1002/2014GL061786.
- Tsang-Hin-Sun, E., J.-Y. Royer, and E. C. Leroy, 2015: Low-frequency sound level in the southern Indian Ocean. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **138**, 3439–3446, doi:10.1121/1.4936855.
- Urlick, R., 1971: Noise of melting icebergs. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **50**, 337–341, doi:10.1121/1.1912637.
- Vacqu  -García, J., F. Royer, A.-C. Dragon, M. Viviant, F. Bailleul, and C. Guinet, 2012: Foraging in the darkness of the Southern Ocean: Influence of bioluminescence on a deep diving predator. *PLoS One*, **8**, e43565, doi:10.1371/journal.pone.0043565.
- Vagle, S., W. G. Large, and D. M. Farmer, 1990: An evaluation of the WOTAN technique for inferring oceanic wind from underwater sound. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 576–595, doi:10.1175/1520-0426(1990)007<0576:AEOTWT>2.0.CO;2.
- Van Dyke, M., 1982: *An Album of Fluid Motion*. 14th ed. Parabolic Press, 176 pp.
- Wagstaff, R., 2005: An ambient noise model for the northeast Pacific Ocean basin. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **30**, 286–294, doi:10.1109/JOE.2004.836993.
- Ward, J., and Coauthors, 2011: Beaked whale (*Mesoplodaon densirostris*) passive acoustic detection in increasing ambient noise. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **129**, 662–669, doi:10.1121/1.3531844.
- Wenz, G. M., 1962: Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **34**, 1936–1956, doi:10.1121/1.1909155.
- Zhang, Z., J. Neubauer, and D. A. Berry, 2006: Aerodynamically and acoustically driven modes of vibration in a physical model of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **120**, 2841–2849, doi:10.1121/1.2354025.

RESEARCH ARTICLE

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

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

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

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



OPEN ACCESS

Citation: Leroy EC, Samaran F, Bonnel J, Royer J-Y (2016) Seasonal and Diel Vocalization Patterns of Antarctic Blue Whale (*Balaenoptera musculus intermedia*) in the Southern Indian Ocean: A Multi-Year and Multi-Site Study. PLoS ONE 11(11): e0163587. doi:10.1371/journal.pone.0163587

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

Received: May 19, 2016

Accepted: September 12, 2016

Published: November 9, 2016

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

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

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

Abstract

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

Introduction

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

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

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

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

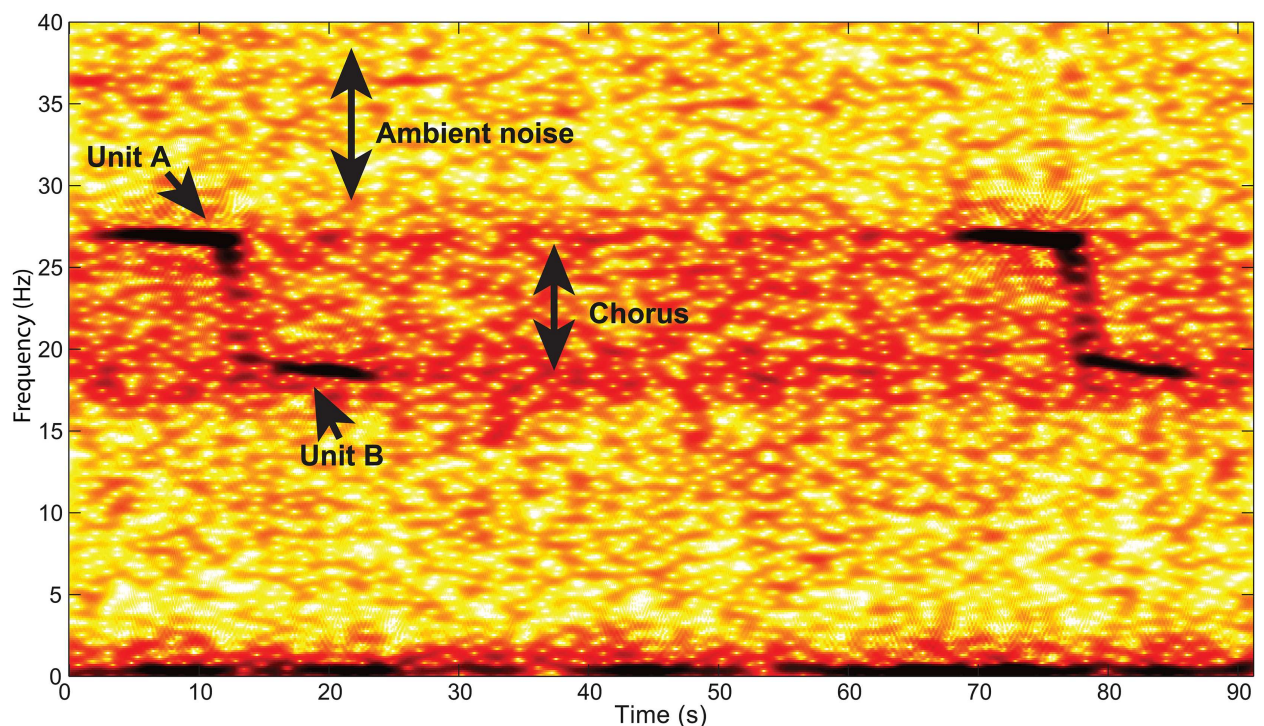


Fig 1. Spectrogram of two consecutive Z-calls. The noisy frequency band between 18 and 28 Hz is formed by the Antarctic blue whale and fin whale chorus.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g001

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

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

Materials and Methods

Data Acquisition

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

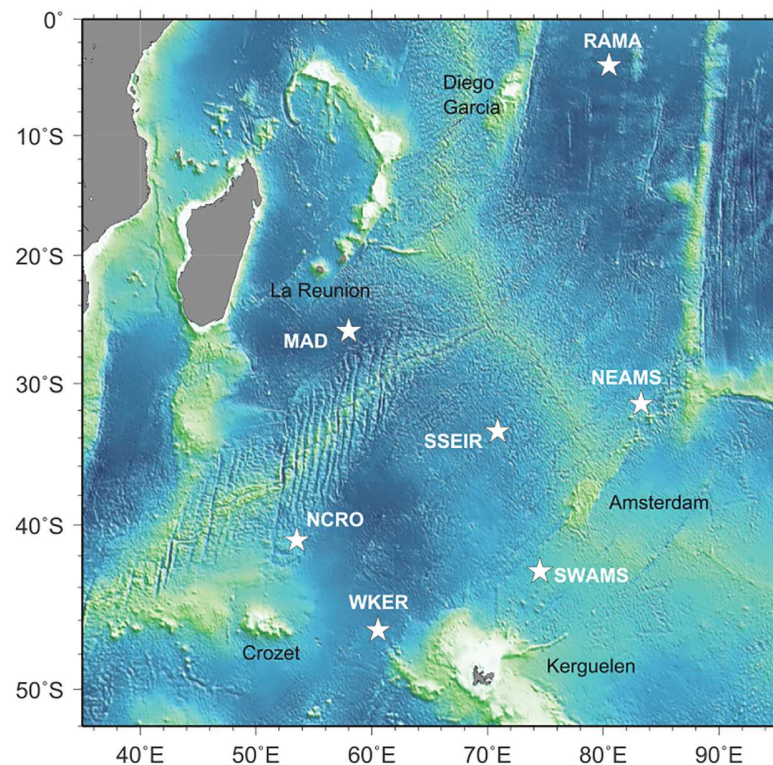


Fig 2. Hydrophone locations of the OHASISBIO network in the Indian Ocean (stars).

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g002

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

Acoustic data processing

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

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

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

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

doi:10.1371/journal.pone.0163587.t001

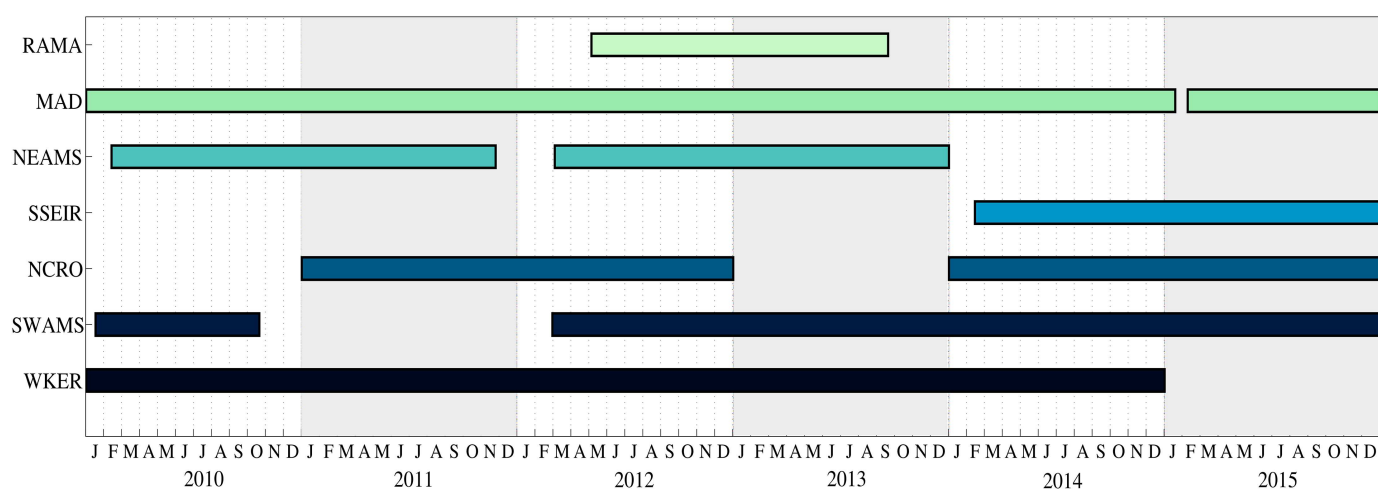


Fig 3. Periods of continuous recordings analysed for each site.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g003

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

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

doi:10.1371/journal.pone.0163587.t002

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

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

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

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

Detection results analysis

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

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

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

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

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

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

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

Results

Ambient noise level

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

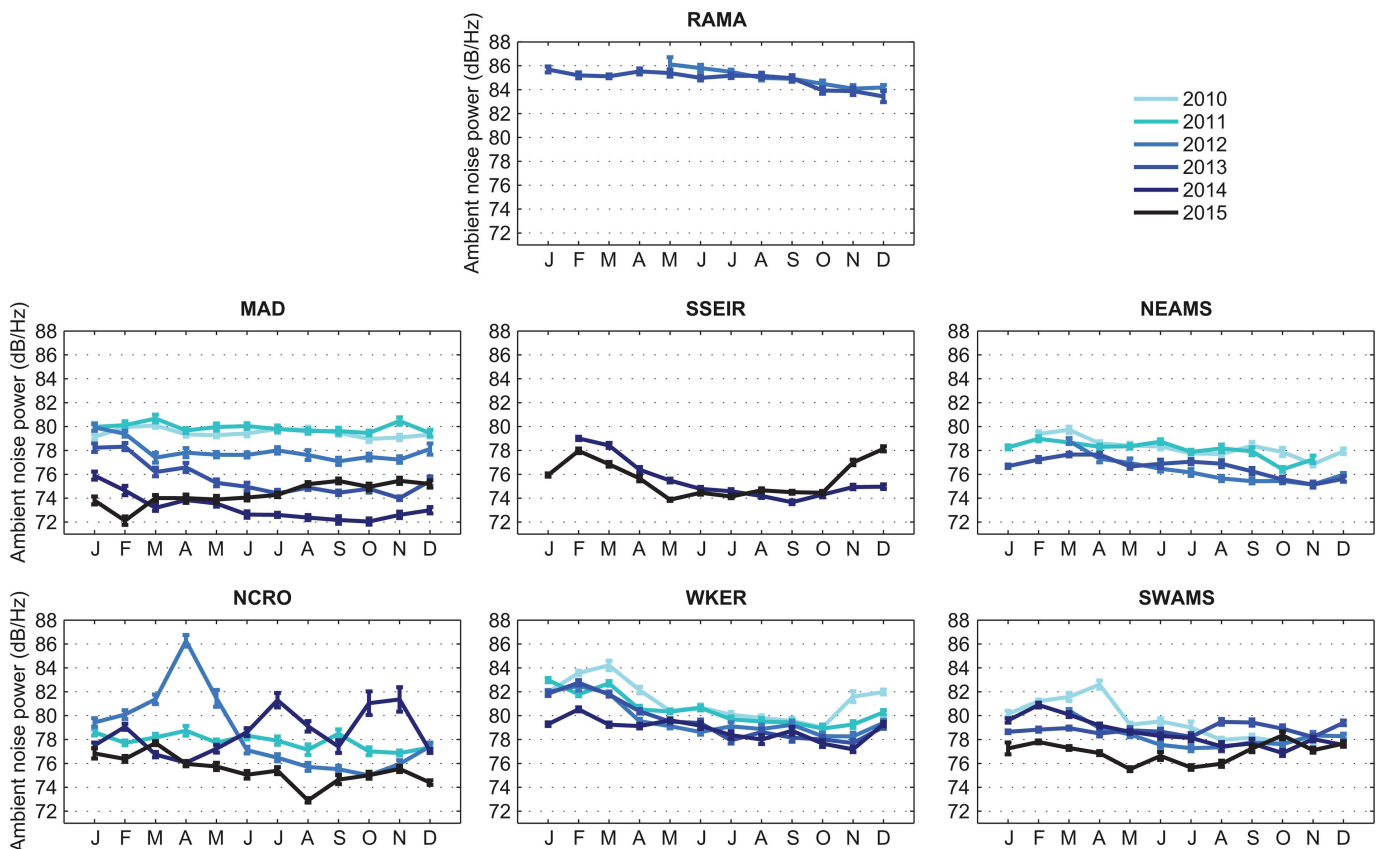


Fig 4. Ambient noise level in the 40–60 Hz frequency band for each available year at each site.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g004

Inside triad comparison

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

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

Site frequentation and inter-annual variation

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

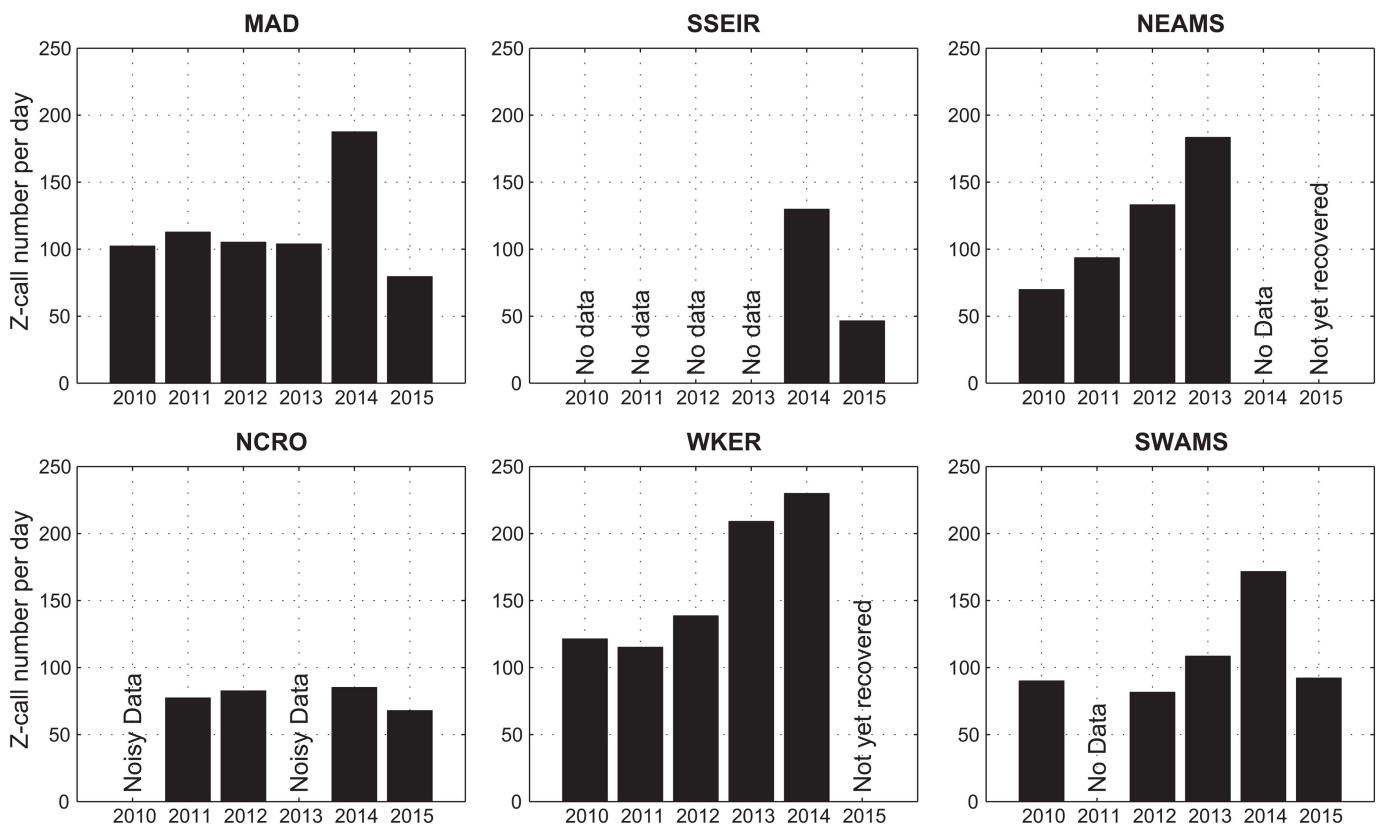


Fig 5. Number of Z-calls per day for each available year at each station.

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g005

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

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

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

Seasonal patterns

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

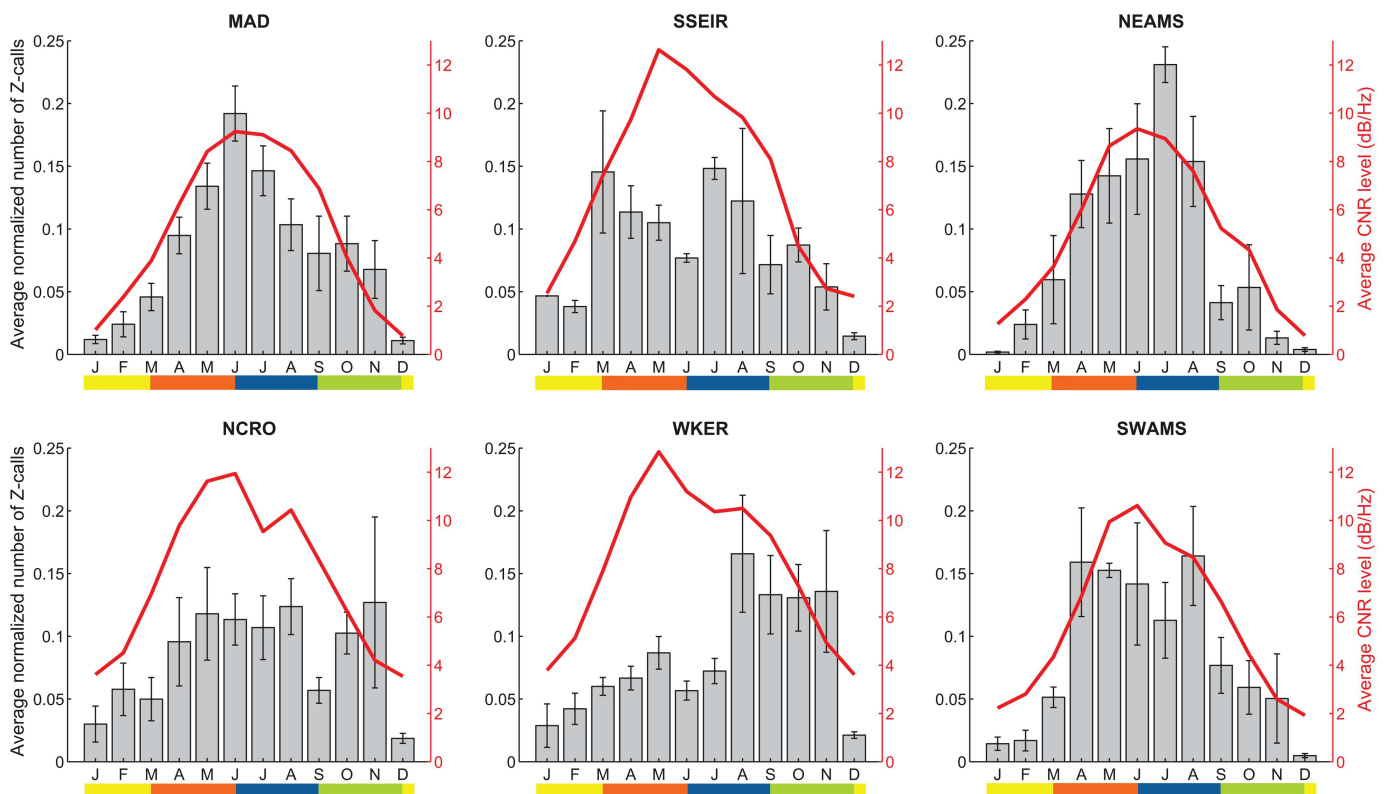


Fig 6. Normalized number of Z-calls detected per month averaged over the available years of data for each station, and corresponding Chorus to Noise-without-chorus Ratio (CNR) level (red curves). The color bar represents the seasons (yellow: summer; brown: autumn; blue: winter; green: spring).

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g006

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

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

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

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

Diel pattern

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

Discussion

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

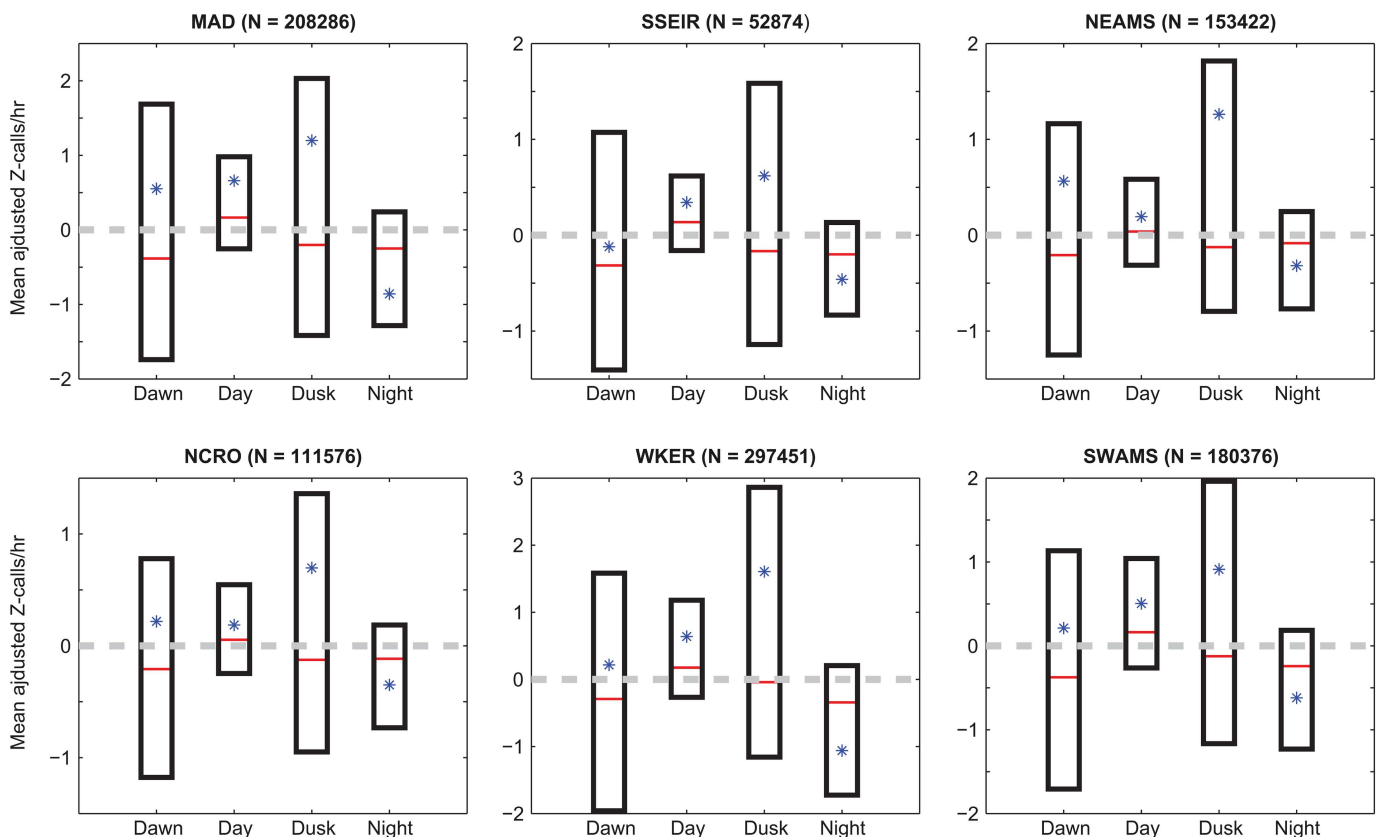


Fig 7. Boxplot of mean-adjusted number of detections per hour during four light regimes, averaged over available years of data for each station and over seasons of Antarctic blue whale presence of the corresponding station (autumn, winter and spring for MAD, NEAMS, SSEIR and SWAMS; the entire year for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

doi:10.1371/journal.pone.0163587.g007

Ambient noise

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

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

Site frequentation

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

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

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

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

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

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

Seasonal patterns

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

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

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

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

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

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

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

Diel pattern

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

Conclusion

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

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

Acknowledgments

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

Author Contributions

Conceptualization: ECL JB FS JYR.

Formal analysis: ECL.

Funding acquisition: JYR.

Investigation: ECL JB FS JYR.

Methodology: ECL JB FS JYR.

Project administration: JYR.

Supervision: JYR JB FS.

Validation: JYC XBL.

Visualization: ECL.

Writing – original draft: ECL.

Writing – review & editing: ECL JB FS JYR.

References

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

4. Branch T. Abundance of Antarctic blue whales south of 60 S from three complete circumpolar sets of surveys. *J Cetacean Res Manage*. 2007; 9(3):253–262.
5. Branch T, Stafford K, Palacios D, Allison C, Bannister J, Burton C, et al. Past and present distribution, densities and movements of blue whales *Balaenoptera musculus* in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean. *Mammal Review*. 2007; 37(2):116–175. doi: [10.1111/j.1365-2907.2007.00106.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00106.x)
6. Stafford KM, Bohnenstiehl DR, Tolstoy M, Chapp E, Mellinger DK, Moore SE. Antarctic-type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans. *Deep Sea Research Part I*. 2004; 51(10):1337–1346. doi: [10.1016/j.dsr.2004.05.007](https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.05.007)
7. Širović A, Hildebrand JA, Wiggins SM, Thiele D. Blue and fin whale acoustic presence around Antarctica during 2003 and 2004. *Marine Mammal Science*. 2009; 25(1):125–136. doi: [10.1111/j.1748-7692.2008.00239.x](https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2008.00239.x)
8. Gedamke J, Gales N, Hildebrand J, Wiggins S. Seasonal occurrence of low frequency whale vocalisations across eastern Antarctic and southern Australian waters, February 2004 to February 2007. White paper presented to the Scientific Committee of the International Whaling Commission. 2007.
9. Tripovich JS, Klinck H, Nieukirk SL, Adams T, Mellinger DK, Balcazar NE, et al. Temporal segregation of the Australian and Antarctic blue whale call types (*Balaenoptera musculus* spp.). *Journal of Mammalogy*. 2015; 96(3):603–610. doi: [10.1093/jmammal/gyv065](https://doi.org/10.1093/jmammal/gyv065) PMID: [26937046](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26937046/)
10. McDonald MA. An acoustic survey of baleen whales off Great Barrier Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 2006; 40(4):519–529. doi: [10.1080/00288330.2006.9517442](https://doi.org/10.1080/00288330.2006.9517442)
11. Samaran F, Adam O, Guinet C. Discovery of a mid-latitude sympatric area for two Southern Hemisphere blue whale subspecies. *Endangered Species Research*. 2010; 12(2):157–165. doi: [10.3354/esr00302](https://doi.org/10.3354/esr00302)
12. Samaran F, Stafford KM, Branch TA, Gedamke J, Royer JY, Dziak RP, et al. Seasonal and geographic variation of southern blue whale subspecies in the Indian Ocean. *PLoS ONE*. 2013; 8(8):e71561–e71561. doi: [10.1371/journal.pone.0071561](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071561) PMID: [23967221](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23967221/)
13. Mellinger DK, Stafford KM, Moore S, Dziak RP, Matsumoto H. Fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*. 2007; 20(4):36–45. doi: [10.5670/oceanog.2007.03](https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.03)
14. Miller BS, Barlow J, Calderan S, Collins K, Leaper R, Olson P, et al. Validating the reliability of passive acoustic localisation: a novel method for encountering rare and remote Antarctic blue whales. *Endangered Species Research*. 2015; 26(3):257–269. doi: [10.3354/esr00642](https://doi.org/10.3354/esr00642)
15. Ljungblad DK, Clark CW, Shimada H. SC/49/SH17 A comparison of sounds attributed to pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) recorded south of the Madagascar Plateau and those attributed to 'true' blue whales (*Balaenoptera musculus*) recorded off Antarctica. Report-International Whaling Commission. 1998; 48:439–442.
16. Rankin S, Ljungblad D, Clark C, Kato H. Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 IWC/SOWER circumpolar cruises, Area V, Antarctica. *Journal of Cetacean Research and Management*. 2005; 7(1):13–20.
17. McDonald MA, Hildebrand JA, Mesnick S. Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs. *Endangered Species Research*. 2009; 9(1):13–21. doi: [10.3354/esr00217](https://doi.org/10.3354/esr00217)
18. Gavrilov AN, McCauley RD, Salgado-Kent C, Tripovich J, Burton C. Vocal characteristics of pygmy blue whales and their change over time. *The Journal of Acoustical Society of America*. 2011; 130(6):3651–3660. doi: [10.1121/1.3651817](https://doi.org/10.1121/1.3651817) PMID: [22225022](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22225022/)
19. Gavrilov AN, McCauley RD, Gedamke J. Steady inter and intra-annual decrease in the vocalization frequency of Antarctic blue whales. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012; 131(6):4476–4480. doi: [10.1121/1.4707425](https://doi.org/10.1121/1.4707425) PMID: [22712920](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22712920/)
20. Miller BS, Leaper R, Calderan S, Gedamke J. Red Shift, Blue Shift: Investigating Doppler Shifts, Blubber Thickness, and Migration as Explanations of Seasonal Variation in the Tonality of Antarctic Blue Whale Song. *PLoS ONE*. 2014; 9(9):e107740. doi: [10.1371/journal.pone.0107740](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107740) PMID: [25229644](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25229644/)
21. Širović A, Hildebrand JA, Wiggins SM, McDonald MA, Moore SE, Thiele D. Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II*. 2004; 51(17):2327–2344.
22. Samaran F, Adam O, Motsch JF, Guinet C. Definition of the Antarctic and pygmy blue whale call templates. Application to fast automatic detection. *Canadian Acoustics*. 2008; 36(1):93–103.
23. Croll DA, Clark CW, Acevedo A, Tershy B, Flores S, Gedamke J, et al. Bioacoustics: Only male fin whales sing loud songs. *Nature*. 2002; 417(6891):809–809. doi: [10.1038/417809a](https://doi.org/10.1038/417809a) PMID: [12075339](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12075339/)

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

47. Helble TA, Gerald L, Campbell GS, Hildebrand JA. Calibrating passive acoustic monitoring: correcting humpback whale call detections for site-specific and time-dependent environmental characteristics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013; 134(5):EL400–EL406. doi: [10.1121/1.4822319](https://doi.org/10.1121/1.4822319) PMID: [24181982](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24181982/)
48. Brown SG. Dispersal in blue and fin whales. Cambridge University Press; 1954.
49. Samaran F, Guinet C, Adam O, Motsch JF, Cansi Y. Source level estimation of two blue whale subspecies in southwestern Indian Ocean. *J Acoust Soc Am*. 2010; 127(6):3800–3808. doi: [10.1121/1.3409479](https://doi.org/10.1121/1.3409479) PMID: [20550278](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20550278/)
50. Mackintosh NA, Wheeler JFG, Clowes AJ. Southern blue and fin whales. University Press; 1929.
51. Aroyan JL, McDonald MA, Webb SC, Hildebrand JA, Clark D, Laitman JT, et al. Acoustic models of sound production and propagation. In: Au WWL, Fay RR, Popper AN (Eds), *Hearing by whales and dolphins*. Springer; 2000. p. 409–469.
52. Thode AM, DSpain G, Kuperman W. Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2000; 107(3):1286–1300. doi: [10.1121/1.428417](https://doi.org/10.1121/1.428417) PMID: [10738784](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10738784/)
53. Nemoto T. Feeding pattern of baleen whales in the ocean. In: Steele JH (Ed.), *Marine food chains*. University of California Press. 1970;p. 241–252.
54. Atkinson A, Ward P, Williams R, Poulet S. Diel vertical migration and feeding of copepods at an oceanic site near South Georgia. *Marine Biology*. 1992; 113(4):583–593. doi: [10.1007/BF00349702](https://doi.org/10.1007/BF00349702)
55. Hamame M, Antezana T. Vertical diel migration and feeding of *Euphausia vallentini* within southern Chilean fjords. *Deep Sea Research Part II*. 2010; 57(7):642–651. doi: [10.1016/j.dsr2.2009.10.013](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.10.013)
56. Duhamel G, Koubbi P, Ravier C. Day and night mesopelagic fish assemblages off the Kerguelen Islands (Southern Ocean). *Polar Biology*. 2000; 23(2):106–112. doi: [10.1007/s0030000050015](https://doi.org/10.1007/s0030000050015)
57. Gaten E, Tarling G, Dowse H, Kyriacou C, Rosato E. Is vertical migration in Antarctic krill (*Euphausia superba*) influenced by an underlying circadian rhythm? *Journal of genetics*. 2008; 87(5):473–483. doi: [10.1007/s12041-008-0070-y](https://doi.org/10.1007/s12041-008-0070-y) PMID: [19147936](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19147936/)
58. Gill PC, Morrice MG, Page B, Pirzl R, Levings AH, Coyne M, et al. Blue whale habitat selection and within-season distribution in a regional upwelling system off southern Australia. *Marine Ecology Progress Series*. 2011; 421:243–263. doi: [10.3354/meps08914](https://doi.org/10.3354/meps08914)

Bibliographie

- [Abadi et al., 2014] Abadi, S., Thode, A., Blackwell, S., and Dowling, D. (2014). Ranging bowhead whale calls in a shallow-water dispersive waveguide. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1) :130–144.
- [Altes, 1990] Altes, R. (1990). Wide-band, proportional-bandwidth Wigner-Ville analysis. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 38(6) :1005–1012.
- [Arisdakessian, 2014] Arisdakessian, C. (2014). Bowhead whale localization in the beaufort sea. Technical report, ENSTA Bretagne & Scripps Institution of Oceanography.
- [Baggeroer et al., 1993] Baggeroer, A., Kuperman, W., and Mikhalevsky, P. (1993). An overview of matched field methods in ocean acoustics. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(4) :401–424.
- [Ballard et al., 2014] Ballard, M. S., Frisk, G. V., and Becker, K. M. (2014). Estimates of the temporal and spatial variability of ocean sound speed on the new jersey shelf. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(6) :3316–3326.
- [Baraniuk and Jones, 1995] Baraniuk, R. and Jones, D. (1995). Unitary equivalence : A new twist on signal processing. *IEEE Transactions on signal processing*, 43(10) :2269–2282.
- [Baumgartner et al., 2013] Baumgartner, M. F., Fratantoni, D. M., Hurst, T. P., Brown, M. W., Cole, T. V., Van Parijs, S. M., and Johnson, M. (2013). Real-time reporting of baleen whale passive acoustic detections from ocean gliders. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(3) :1814–1823.
- [Baumgartner et al., 2014] Baumgartner, M. F., Stafford, K. M., Winsor, P., Statscewich, H., and Fratantoni, D. M. (2014). Glider-based passive acoustic monitoring in the arctic. *Marine Technology Society Journal*, 48(5) :40–51.
- [Bonnell, 2010] Bonnell, J. (2010). *Analyse de la dispersion acoustique UBF (0-150 Hz) pour la surveillance et la caractérisation du milieu marin*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.

- [Bonnell et al., 2017] Bonnell, J., Caporale, S., and Thode, A. (2017). Waveguide mode amplitude estimation using warping and phase compensation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 141. in press.
- [Bonnell and Chapman, 2011] Bonnell, J. and Chapman, N. (2011). Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130 :EL101–EL107.
- [Bonnell et al., 2013a] Bonnell, J., Dosso, S., and Chapman, R. (2013a). Bayesian geoacoustic inversion of single hydrophone light bulb data using warping dispersion analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134 :120–130.
- [Bonnell et al., 2012] Bonnell, J., Gervaise, C., Nicolas, B., and Mars, J. (2012). Single-receiver geoacoustic inversion using modal reversal. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1) :119–128.
- [Bonnell et al., 2011] Bonnell, J., Gervaise, C., Roux, P., Nicolas, B., and Mars, J. (2011). Modal depth function estimation using time-frequency analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130 :61–71.
- [Bonnell et al., 2013b] Bonnell, J., Le Touzé, G., B., N., and Mars, J. (2013b). Représentations temps-fréquence de la classe de puissance basées sur l’invariant océanique. In *GRETSI, Brest, France*.
- [Bonnell et al., 2013c] Bonnell, J., Le Touzé, G., Nicolas, B., and Mars, J. (2013c). Physics-based time-frequency representations for underwater acoustics : Power class utilization with waveguide-invariant approximation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30(6) :120–129.
- [Bonnell et al., 2010] Bonnell, J., Nicolas, B., Mars, J., and Walker, S. (2010). Estimation of modal group velocities with a single receiver for geoacoustic inversion in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128 :719–727.
- [Bonnell and Thode, 2014a] Bonnell, J. and Thode, A. (2014a). Bowhead whale call localization using a single receiver and warping processing. In *Underwater Acoustics international conference and exhibition (Rhode, Grece)*.
- [Bonnell and Thode, 2014b] Bonnell, J. and Thode, A. (2014b). Range and depth estimation of bowhead whale calls in the arctic using a single hydrophone. In *Sensor Systems for a Changing Ocean (SSCO), 2014 IEEE*, pages 1–4. IEEE.
- [Bonnell et al., 2014] Bonnell, J., Thode, A., Blackwell, S., Kim, K., and Macrander, A. (2014). Range estimation of bowhead whale (*balaena mysticetus*) calls in the arctic using a single hydrophone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1) :145–155.

- [Branch, 2007] Branch, T. A. (2007). Abundance of antarctic blue whales south of 60 s from three complete circumpolar sets of surveys.
- [Branch et al., 2004] 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 et al., 2007] Branch, T. A., Stafford, K., Palacios, D., Allison, C., Bannister, J., Burton, C., Cabrera, E., Carlson, C., Galletti Vernazzani, B., Gill, P., et al. (2007). Past and present distribution, densities and movements of blue whales *balaenoptera musculus* in the southern hemisphere and northern indian ocean. *Mammal Review*, 37(2) :116–175.
- [Buck et al., 1998] Buck, J. R., Preisig, J. C., and Wage, K. E. (1998). A unified framework for mode filtering and the maximum a posteriori mode filter. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(4) :1813–1824.
- [Burgess et al., 1998] Burgess, W., Tyack, P., Le Boeuf, B., and Costa, D. (1998). A programmable acoustic recording tag and first results from free-ranging northern elephant seals. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 45(7) :1327–1351.
- [Carriere et al., 2009] Carriere, O., Hermand, J.-P., and Stephan, Y. (2009). Acoustic monitoring of the ushant front : a feasibility study. In *IEEE OCEANS 2009-EUROPE*, pages 1–5.
- [Cazau et al., 2017] Cazau, D., Bonnel, J., Jouma’a, J., le Bras, Y., and Guinet, C. (2017). Measuring the marine soundscape of the indian ocean with southern elephant seals used as acoustic gliders of opportunity. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, (34) :207–223.
- [Chen et al., 2003] Chen, C., Miller, J., Boudreaux-Bartels, G., Potty, G., and Lazauski, C. (2003). Time-frequency representations for wideband acoustic signals in shallow water. In *OCEANS 2003. Proceedings*, volume 5, pages SP2903–SP2907.
- [Chevallier et al., 2014] Chevallier, C., Herbette, S., Marié, L., Le Borgne, P., Marsouin, A., Péré, S., Levier, B., and Reason, C. (2014). Observations of the ushant front displacements with msg/seviri derived sea surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 146 :3–10.
- [Chuprov, 1982] Chuprov, S. (1982). Interference structure of a sound field in a layered ocean. *Ocean Acoustics, Modern State*, pages 71–91.
- [Clark and Ellison, 2000] Clark, C. and Ellison, W. (2000). Calibration and comparison of the acoustic location methods used during the spring migration of the bowhead whale, *balaena mysticetus*, off Point Barrow, Alaska, 1984–1993. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107 :3509–3517.

- [Cockrell, 2011] Cockrell, K. (2011). *Understanding and utilizing waveguide invariant range-frequency striations in ocean acoustic waveguides*. PhD thesis, MIT / WHOI.
- [Conan et al., 2016] Conan, E., Bonnel, J., Chonavel, T., and Nicolas, B. (2016). Source depth discrimination with a vertical line array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(5) :EL434–EL440.
- [Crance et al., 2015] Crance, J. L., Berchok, C. L., Bonnel, J., and Thode, A. M. (2015). Northeasternmost record of a north pacific fin whale (*balenoptera physalus*) in the alaskan chukchi sea. *Polar Biology*, pages 1–7.
- [Day et al., 2017] Day, L., Joumaa, J., Bonnel, J., and Guinet, C. (2017). Acoustic measurements of post-dive cardiac responses in southern elephant seals (*mirounga leonina*) during surfacing at sea. *Journal of Experimental Biology*, (in press).
- [Dosso and Wilmut, 2009] Dosso, S. E. and Wilmut, M. J. (2009). Comparison of focalization and marginalization for bayesian tracking in an uncertain ocean environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(2) :717–722.
- [Dremeau et al., 2017] Dremeau, A., Le Courtois, F., and Bonnel, J. (2017). Reconstruction of dispersion curves in the frequency-wavenumber domain using compressed sensing on a random array. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, (in press).
- [Duan et al., 2016] Duan, R., Chapman, N. R., Yang, K., and Ma, Y. (2016). Sequential inversion of modal data for sound attenuation in sediment at the new jersey shelf. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(1) :70–84.
- [Emmetiere, 2015] Emmetiere, R. (2015). Détection et localisation de baleines bleues par acoustique passive. Master’s thesis, ENSTA Bretagne.
- [Emmetiere, 2016] Emmetiere, R. (2016). Bilan sur l’invariant océanique et son application en discrimination en immersion. Technical report, ENSTA Bretagne, Thales Underwater Systems.
- [Emmetiere et al., 2017] Emmetiere, R., Bonnel, J., Gehant, M., and Chonavel, T. (2017). Source depth discrimination using the array invariant. In *Acoustics’17 Boston*.
- [Feng-Hua et al., 2014] Feng-Hua, L., Bo, Z., and Yong-Gang, G. (2014). A method of measuring the in situ seafloor sound speed using two receivers with warping transformation. *Chinese Physics Letters*, 31(2) :024301 :1–4.

- [Génin et al., 2015] Génin, A., Richard, G., Jouma'a, J., Picard, B., El Ksabi, N., Vacquié Garcia, J., and Guinet, C. (2015). Characterization of postdive recovery using sound recordings and its relationship to dive duration, exertion, and foraging effort of southern elephant seals (*mirounga leonina*). *Marine Mammal Science*, 31(4) :1452–1470.
- [Gervaise et al., 2012] Gervaise, C., Kinda, B., Bonnel, J., Stéphan, Y., and Vallez, S. (2012). Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3) :1999–2010.
- [Greene Jr et al., 2004] Greene Jr, C., McLennan, M., Norman, R., McDonald, T., McDonald, T., R.S., J., and Richardson, W. (2004). Directional frequency and recording (difar) sensors in seafloor recorders to locate calling bowhead whales during their fall migration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116 :799–813.
- [Guinet et al., 2013] Guinet, C., Xing, X., Walker, E., Monestiez, P., Marchand, S., Picard, B., Jaud, T., Authier, M., Cotté, C., Dragon, A.-C., et al. (2013). Calibration procedures and first dataset of southern ocean chlorophyll a profiles collected by elephant seals equipped with a newly developed ctd-fluorescence tags. *Earth System Science Data*, 5(1) :15–29.
- [Guthrie, 1974] Guthrie, K. (1974). The connection between normal modes and rays in underwater acoustics. *Journal of Sound Vibration*, 32 :289–293.
- [Jensen et al., 2011] Jensen, F., Kuperman, W., Porter, M., and Schmidt, H. (2011). *Computational Ocean Acoustics*. American Institute of Physics, New York, second edition.
- [Jouma'a et al., 2015] Jouma'a, J., Le Bras, Y., Richard, G., Vacquié-Garcia, J., Picard, B., El Ksabi, N., and Guinet, C. (2015). Adjustment of diving behaviour with prey encounters and body condition in a deep diving predator : the southern elephant seal. *Functional Ecology*.
- [Kinda and Bonnel, 2015] Kinda, B. and Bonnel, J. (2015). Passive acoustic observations of tide height in the iredise sea using ambient noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3) :EL299–EL304.
- [Kuz'kin et al., 2011] Kuz'kin, V., Lin, Y.-T., Lunkov, A., Lynch, J., and Petnikov, V. (2011). Frequency shifts of the sound field interference pattern on oceanic shelf in summer conditions. *Acoustical Physics*, 57(3) :381–390.
- [Le Boeuf et al., 2000] Le Boeuf, B. J., Crocker, D., Grayson, J., Gedamke, J., Webb, P. M., Blackwell, S. B., and Costa, D. P. (2000). Respiration and heart rate at the surface between dives in northern elephant seals. *Journal of Experimental Biology*, 203(21) :3265–3274.

- [Le Boyer et al., 2009] Le Boyer, A., Cambon, G., Daniault, N., Herbette, S., Le Cann, B., Marie, L., and Morin, P. (2009). Observations of the ushant tidal front in september 2007. *Continental Shelf Research*, 29(8) :1026–1037.
- [Le Courtois and Bonnel, 2014a] Le Courtois, F. and Bonnel, J. (2014a). Autoregressive model for high-resolution wavenumber estimation in a shallow water environment using a broadband source. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(4) :EL199–EL205.
- [Le Courtois and Bonnel, 2014b] Le Courtois, F. and Bonnel, J. (2014b). Wavenumber tracking in a low resolution frequency-wavenumber representation using particle filtering. In *ICASSP, Florence, Italie*.
- [Le Courtois and Bonnel, 2015] Le Courtois, F. and Bonnel, J. (2015). Compressed sensing for wideband wavenumber tracking in dispersive shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(2) :575–583.
- [Le Gall, 2015] Le Gall, Y. (2015). *Problèmes inverses en acoustique sous-marine : prediction de performances et localisation de source en environnement incertain*. PhD thesis, Telecom Bretagne.
- [Le Gall and Bonnel, 2013a] Le Gall, Y. and Bonnel, J. (2013a). Débruitage et séparation dans le plan temps-fréquence des contributions sonores de navires en mouvement. *TS. Traitement du signal*, 30(3-5) :149–168.
- [Le Gall and Bonnel, 2013b] Le Gall, Y. and Bonnel, J. (2013b). Passive estimation of the waveguide invariant per pair of modes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(2) :EL230–EL236.
- [Le Gall and Bonnel, 2014] Le Gall, Y. and Bonnel, J. (2014). Méthode d’estimation de l’invariant océanique par couple de modes en acoustique sous-marine passive. Technical report, ENSTA Bretagne.
- [Le Gall et al., 2016a] Le Gall, Y., Dosso, S., Socheleau, F., and Bonnel, J. (2016a). Bayesian source localization with uncertain green’s function in an uncertain shallow water ocean. *Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3) :993–1004.
- [Le Gall et al., 2014] Le Gall, Y., Socheleau, F., and Bonnel, J. (2014). Matched-field processing performance under the stochastic and deterministic signal models. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 62(22) :5825–5838.
- [Le Gall et al., 2016b] Le Gall, Y., Socheleau, F., and Bonnel, J. (2016b). Matched-field performance prediction with model mismatch. *IEEE Signal Processing Letters*, 23(4) :409–413.
- [Le Roux, 1996] Le Roux, S. (1996). *Propagation acoustique océanique UBF : 5-50 Hz. Approche expérimentale de l’influence du fond marin*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.

- [Le Touzé, 2007] Le Touzé, G. (2007). *Localisation de source par petits fonds en UBF (1-100 Hz) à l'aide d'outils temps-fréquence*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Le Touzé et al., 2009] Le Touzé, G., Nicolas, B., Mars, J., and Lacoume, J. (2009). Matched representations and filters for guided waves. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57(5) :1783–1795.
- [Lee and Makris, 2006] Lee, S. and Makris, N. C. (2006). The array invariant. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(1) :336–351.
- [Leroy et al., 2016] Leroy, E., Samaran, F., Bonnel, J., and Royer, J.-Y. (2016). Seasonal and diel vocalization patterns of antarctic blue whale (*balænoptera musculus intermedia*) in the southern indian ocean : A multi-year and multi-site study. *PLOS ONE*, 11(11) :e0163587.
- [Liu et al., 2013] Liu, Z., Sun, C., Yang, Y., and Du, J. (2013). Robust source localization using predictable mode subspace in uncertain shallow ocean environment. In *Oceans-San Diego, 2013*, pages 1–5.
- [Mackintosh, 1966] Mackintosh, N. (1966). The distribution of southern blue and fin whales. *Whales, dolphins, and porpoises*, pages 125–144.
- [Marques et al., 2013] 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.
- [Meillour, 2016] Meillour, M. (2016). *Caractérisation des vocalises de baleines bleues antarctiques dans l’océan indien*. Master’s thesis, ENSTA Bretagne.
- [Moore and Reeves, 1993] Moore, S. and Reeves, R. (1993). Distribution and movement. *The bowhead whale*, 2 :313–386.
- [Nardin, 1998] Nardin, M. (1998). *Ondes sismo-acoustiques guidées en milieu marin (de 2 à 200 Hz par petits fonds)*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Nicolas, 2004] Nicolas, B. (2004). *Identification du milieu océanique et localisation de source en ultra basse fréquence (1-100 Hz)*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Niu et al., 2014] Niu, H., Zhang, R., and Li, Z. (2014). Theoretical analysis of warping operators for non-ideal shallow water waveguides. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1) :53–65.
- [Oleson et al., 2007] Oleson, E. M., Calambokidis, J., Burgess, W. C., McDonald, M. A., LeDuc, C. A., and Hildebrand, J. A. (2007). Behavioral context of call production by eastern north pacific blue whales. *Marine Ecology-Progress Series*, 330.

- [Ollivier, 2013] Ollivier, B. (2013). Estimation d’une distance maximale de détection de baleines bleues par acoustique passive. Master’s thesis, ENSTA Bretagne.
- [Papandreou-Suppappola et al., 2001] Papandreou-Suppappola, A., Murray, R., Iem, B., and Boudreaux-Bartels, G. (2001). Group delay shift covariant quadratic time-frequency representations. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 49(11) :2549–2564.
- [Parks et al., 2011] Parks, S., Searby, A., Celerier, A., Johnson, M., Nowacek, D., and Tyack, P. (2011). Sound production behavior of individual north atlantic right whales : implications for passive acoustic monitoring. *Endangered Species Research*, 15(1) :63–76.
- [Petrov, 2014] Petrov, P. (2014). A method for single-hydrophone geoacoustic inversion based on the modal group velocities estimation : Application to a waveguide with inhomogeneous bottom relief. In *Days on Diffraction (DD), 2014*, pages 186–191. IEEE.
- [Pignot, 1997] Pignot, P. (1997). *Analyse globale du milieu de propagation pour la tomographie acoustique oceanique*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Potty et al., 2000] Potty, G., Miller, J., Lynch, J., and Smith, K. (2000). Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108 :973–986.
- [Premus, 1999] Premus, V. (1999). Modal scintillation index : A physics-based statistic for acoustic source depth discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105 :2170.
- [Premus and Helfrick, 2013] Premus, V. E. and Helfrick, M. N. (2013). Use of mode subspace projections for depth discrimination with a horizontal line array : Theory and experimental results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133 :4019–4031.
- [Qi et al., 2014] Qi, Y., Zhou, S., Zhang, R., Zhang, B., and Ren, Y. (2014). Modal characteristic frequency in a range-dependent shallow-water waveguide and its application to source range estimation. *Acta Phys. Sin*, 63 :044303.
- [Qi et al., 2015] Qi, Y. B., Zhou, S. H., Zhang, R. H., and Ren, Y. (2015). A waveguide-invariant-based warping operator and its application to passive source range estimation. *Journal of Computational Acoustics*, 23(01) :1550003.
- [Richard, 2015] Richard, G. (2015). Acoustic tracking of sperm whales and killer whales in a context of fisheries interaction. Master’s thesis, ENSTA Bretagne.

- [Richard et al., 2014] Richard, G., Vacquié-Garcia, J., Joumaa, J., Picard, B., Génin, A., Arnould, J. P., Bailleul, F., and Guinet, C. (2014). Variation in body condition during the post-moult foraging trip of southern elephant seals and its consequences on diving behaviour. *Journal of Experimental Biology*, 217(14) :2609–2619.
- [Riser et al., 2008] Riser, S., Nystuen, J., and Rogers, A. (2008). Monsoon effects in the bay of bengal inferred from profiling float-based measurements of wind speed and rainfall. *Limnology and Oceanography*, 53(5) :2080.
- [Roquet et al., 2009] Roquet, F., Park, Y.-H., Guinet, C., Bailleul, F., and Charrassin, J.-B. (2009). Observations of the fawn trough current over the kerguelen plateau from instrumented elephant seals. *Journal of Marine Systems*, 78(3) :377–393.
- [Rouseff and Spindel, 2002] Rouseff, D. and Spindel, R. (2002). Modeling the waveguide invariant as a distribution. In *AIP Conference Proceedings*, volume 621, page 137.
- [Royer et al., 2015] Royer, J.-Y., Chateau, R., Dziak, R., and Bohnenstiehl, D. (2015). Seafloor seismicity, antarctic ice-sounds, cetacean vocalizations and long-term ambient sound in the indian ocean basin. *Geophysical Journal International*, 202(2) :748–762.
- [Samaran et al., 2010] Samaran, F., Guinet, C., Adam, O., Motsch, J.-F., and Cansi, Y. (2010). 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 et al., 2013] 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) :e71561.
- [Scharf and Friedlander, 1994] Scharf, L. L. and Friedlander, B. (1994). Matched subspace detectors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(8) :2146–2157.
- [Širović et al., 2007] 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.
- [Small et al., 1997] Small, J., Shackleford, L., and Pavey, G. (1997). Ocean feature models—their use and effectiveness in ocean acoustic forecasting. In *Annales Geophysicae*, volume 15, pages 101–112.
- [Socheleau et al., 2015] Socheleau, F., Leroy, E., Carvallo Pecci, A., Samaran, F., Bonnel, J., and Royer, J. (2015). Automated detection of antarctic blue whale calls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 138(5) :3105–3117.

- [Sostrand, 2005] Sostrand, K. (2005). Range localization of 10-100 km explosions by means of an endfire array and a waveguide invariant. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 30(1) :207–212.
- [Stotts et al., 2010] Stotts, S., Koch, R., Joshi, S., Nguyen, V., Ferreri, V., and Knobles, D. (2010). Geoacoustic Inversions of Horizontal and Vertical Line Array Acoustic Data From a Surface Ship Source of Opportunity. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 35(1) :79–102.
- [Sturm and Bonnel, 2015] Sturm, F. and Bonnel, J. (2015). Time-frequency features of three-dimensional sound propagation in wedge-shaped oceanic waveguides. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 41(3) :731–739.
- [Thieury, 2016] Thieury, M. (2016). Localisation de signaux transitoires en guide d’onde dispersif pour l’étude de grandes baleines en arctique. Master’s thesis, ENSTA Bretagne.
- [Thode et al., 2017] Thode, A., Bonnel, J., Thieury, M., Fagan, A., Verlinden, C., Wright, D., Berchok, C., and Crance, J. (2017). Using nonlinear time warping to estimate north pacific right whale calling depths in the bering sea. *Journal of the Acoustical Society of America*, (in press).
- [Thode et al., 2007] Thode, A., Gerstoft, P., Burgess, W., Sabra, K., Guerra, M., Stokes, M., Noad, M., and Cato, D. (2007). A portable matched-field processing system using passive acoustic time synchronization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(3) :696–710.
- [Thode et al., 2012] Thode, A., Kim, K., Blackwell, S., Greene Jr, C., Nations, C., McDonald, T., and Macrander, A. (2012). Automated detection and localization of bowhead whale sounds in the presence of seismic airgun surveys. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131 :3726–3747.
- [Thode and Bonnel, 2015] Thode, A. M. and Bonnel, J. (2015). Experimental demonstration of time warping to invert for array tilt and mode shape on a vertical array in a shallow arctic environment. In *OCEANS 2015, Genova (Italy)*, pages 1–7. IEEE.
- [Tolstoy et al., 1998] Tolstoy, A., Chapman, N., and Brooke, G. (1998). Workshop’97 : Benchmarking for geoacoustic inversion in shallow water. *Journal of Computational Acoustics*, 6 :1–28.
- [Tolstoy and Clay, 1987] Tolstoy, I. and Clay, C. (1987). *Ocean acoustics : theory and experiment in underwater sound*. Acoustical Society of Amer.
- [Turgut et al., 2007] Turgut, A., Orr, M., and Pasewark, B. (2007). Acoustic monitoring of the tide height and slope-water intrusion at the new jersey shelf in winter conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5) :2534–2541.

- [Vagle et al., 1990] Vagle, S., Large, W. G., and Farmer, D. M. (1990). An evaluation of the wotan technique of inferring oceanic winds from underwater ambient sound. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 7(4) :576–595.
- [Wade et al., 2006] Wade, P., Heide-Jørgensen, M. P., Shelden, K., Barlow, J., Carretta, J., Durban, J., LeDuc, R., Munger, L., Rankin, S., Sauter, A., et al. (2006). Acoustic detection and satellite-tracking leads to discovery of rare concentration of endangered north pacific right whales. *Biology letters*, 2(3) :417–419.
- [Warner et al., 2016] Warner, G. A., Dosso, S. E., Hannay, D. E., and Dettmer, J. (2016). Bowhead whale localization using asynchronous hydrophones in the chukchi sea. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1) :20–34.
- [Wright, 2015] Wright, D. L. (2015). Simultaneous identification of four mysticete species in the bering sea using passive acoustic monitoring increases confidence in acoustic identification of the critically endangered north pacific right whale (*eubalaena japonica*). Technical report, Final Report for the International Fund for Animal Welfare. Alaska Fisheries Science Center Marine Mammal Laboratory, NOAA.
- [Xu et al., 2011] Xu, W., Xiao, Z., and Yu, L. (2011). Performance analysis of matched-field source localization under spatially correlated noise field. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 36(2) :273–284.
- [Yang et al., 2015] Yang, J., Riser, S. C., Nystuen, J. A., Asher, W. E., and Jessup, A. T. (2015). Regional rainfall measurements using the passive aquatic listener during the spurs field campaign. *Oceanography*, 28(1) :124–133.
- [Yang, 1984] Yang, T. (1984). Dispersion and ranging of transient signals in the arctic ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 76(1) :262–273.
- [Yang, 1990] Yang, T. (1990). Effectiveness of mode filtering : A comparison of matched-field and matched-mode processing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(5) :2072–2084.
- [Yang, 2003] Yang, T. (2003). Beam intensity striations and applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3) :1342–1352.
- [Yardim et al., 2010] Yardim, C., Gerstoft, P., and Hodgkiss, W. S. (2010). Geoacoustic and source tracking using particle filtering : Experimental results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(1) :75–87.

- [Zeng et al., 2013] Zeng, J., Chapman, N. R., and Bonnel, J. (2013). Inversion of seabed attenuation using time-warping of close range data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5) :EL394–EL399.
- [Zhou et al., 2009] Zhou, J.-X., Zhang, X.-Z., and Knobles, D. (2009). Low-frequency geoacoustic model for the effective properties of sandy seabottoms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(5) :2847–2866.