



HAL
open science

**ANALYSE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES
D'ORIGINE BIOLOGIQUE ENREGISTRES DANS
L'OCEAN INDIEN : IMPLICATIONS DANS LE
RECENSEMENT ET LE SUIVI DES MOUVEMENTS
SAISONNIERS DES CETACES**

Flore Samaran

► **To cite this version:**

Flore Samaran. ANALYSE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES D'ORIGINE BIOLOGIQUE ENREGISTRES DANS L'OCEAN INDIEN : IMPLICATIONS DANS LE RECENSEMENT ET LE SUIVI DES MOUVEMENTS SAISONNIERS DES CETACES. domain_other. Université de La Rochelle, 2008. Français. NNT: . tel-00365083

HAL Id: tel-00365083

<https://theses.hal.science/tel-00365083>

Submitted on 2 Mar 2009

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

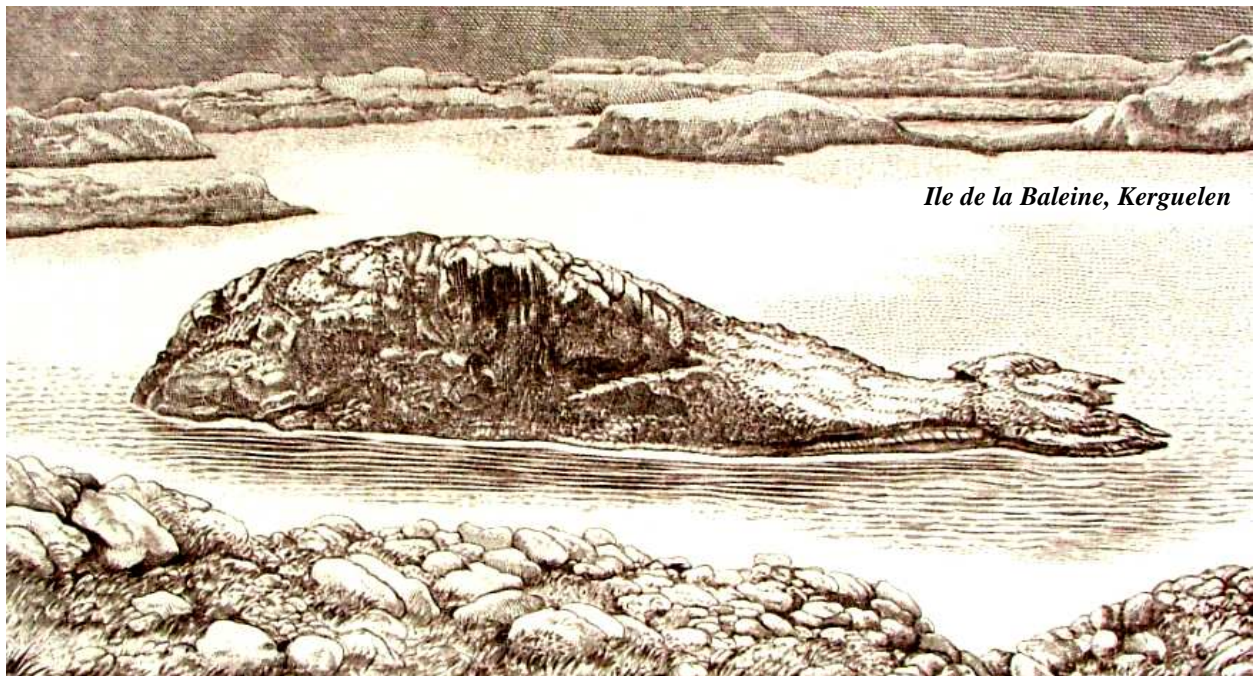
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LA ROCHELLE
BIOLOGIE-ECOLOGIE

PRESENTEE PAR

FLORE SAMARAN

**ANALYSE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES D'ORIGINE BIOLOGIQUE ENREGISTRES
DANS L'OCEAN INDIEN : IMPLICATIONS DANS LE RECENSEMENT ET LE SUIVI
DES MOUVEMENTS SAISONNIERS DES CETACES.**



Ile de la Baleine, Kerguelen

SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 14 NOVEMBRE 2008 DEVANT LE JURY COMPOSE DE:

Kate Stafford, Pr	Université de Washington.	<i>Rapporteur</i>
Jean-Yves Royer, DR	Université de Brest	<i>Rapporteur</i>
Isabelle Charrier, CR	Université Paris Sud	<i>Examineur</i>
Gérard Ruzié, Ingénieur	CEA / DAM – Ile de France	<i>Examineur</i>
Jean-François Motsch, Pr	Université Paris 12	<i>Examineur</i>
Vincent Ridoux, Pr	Université de La Rochelle	<i>Examineur</i>
Olivier Adam, MC-HDR	Université Paris 12	<i>Examineur</i>
Christophe Guinet, CR	CEBC-CNRS	<i>Directeur de thèse</i>

THESE PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LA ROCHELLE
BIOLOGIE-ECOLOGIE

PRESENTEE PAR

FLORE SAMARAN

**ANALYSE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES D'ORIGINE BIOLOGIQUE ENREGISTRES
DANS L'OCEAN INDIEN : IMPLICATIONS DANS LE RECENSEMENT ET LE SUIVI
DES MOUVEMENTS SAISONNIERS DES CETACES.**

SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 14 NOVEMBRE 2008 DEVANT LE JURY COMPOSE DE:

Kate Stafford, Pr	Université de Washington.	<i>Rapporteur</i>
Jean-Yves Royer, DR	Université de Brest	<i>Rapporteur</i>
Isabelle Charrier, CR	Université Paris Sud	<i>Examineur</i>
Gérard Ruzié, Ingénieur	CEA / DAM – Ile de France	<i>Examineur</i>
Jean-François Motsch, Pr	Université Paris 12	<i>Examineur</i>
Vincent Ridoux, Pr	Université de La Rochelle	<i>Examineur</i>
Olivier Adam, MC-HDR	Université Paris 12	<i>Examineur</i>
Christophe Guinet, CR	CEBC-CNRS	<i>Directeur de thèse</i>

REMERCIEMENTS

Presque dix années après avoir quitté mon nord natal et goûté aux vents et aux embruns de La Rochelle, avec des espoirs et des rêves de baleines plein la tête, me voici en train de rédiger les dernières pages de ce manuscrit. Je savais que la route serait longue et compliquée mais je ne soupçonnais pas que cette passion inaltérable pour les mammifères marins, à l'intérieur de moi depuis des années, me mènerait jusque là ... jusqu'à une thèse de doctorat.

Sur ce long chemin, j'ai tout d'abord rencontré les paisibles phoques du phare de Walde, appris la patience et goûté aux premières sensations du travail de terrain dans le froid et le vent. Puis quelques années et quelques milliers de kilomètres plus loin, ce fut la rencontre avec la grande baleine bleue et les magnifiques rorquals communs dans l'estuaire du Saint-Laurent. Là-bas, j'ai appris que les baleines peuvent se contempler sans les regarder, juste en les écoutant. J'ai également appris que les connaissances sur les grandes baleines n'étaient faites que d'interrogations ; l'Homme ayant été, pendant des années, plus enclin à les chasser qu'à les étudier ... A partir de cette prise de conscience là, à côté des peluches, figurines et photos de baleines sont venues alors s'ajouter des articles scientifiques, des rapports, des livres...Et dans ma tête, à côté des mots « mystère », « exaltation » et « contemplation », sont venus s'ajouter les mots « connaissance », « compréhension », « conservation » et « protection ».

Ce travail de thèse représente pour moi l'accomplissement d'un long chemin fait de magnifiques rencontres, d'inoubliables expériences et de grandes interrogations sur les baleines mais aussi sur moi-même. Durant ces trois années de thèse, je n'ai pas vu le moindre petit aileron de baleine bleue et les seuls spécimens que j'ai pu contempler, ce sont ces gigantesques et majestueux squelettes présents au Muséum d'Histoire Naturelle de Paris. Pourtant, c'est durant ces trois années que j'ai eu la sensation, plus que jamais, d'être au plus près de mon rêve.

Ces trois années ont été riches... riches de travail et d'investissement de soi, évidemment, mais surtout riches de rencontres, de discussions, de collaborations, mais aussi d'amitiés ... et de voyage entre Chizé et Paris ... Pour tout cela, j'aimerais adresser un grand merci...

À, **Christophe Guinet**, pour avoir accepté d'encadrer ce projet, mais surtout pour m'avoir fait confiance en m'accordant une grande liberté dans mes recherches. Merci également d'avoir conservé une vision globale de ce travail de thèse...vision que je n'arrivais parfois plus à avoir.

À, **Olivier Adam**, pour son total investissement (dévouement ?) dans ce travail. Sans toi cette thèse n'aurait jamais été ce qu'elle est. Je te remercie pour TOUT, tout simplement...

À, **Gérard Ruzié**, pour avoir initié et aidé à la réalisation de ce projet, en tenant bon face à une institution et une administration si éloignées des baleines ...

À, **Martine Bigan** du Ministère de l'Ecologie pour avoir soutenu ce projet et permis d'obtenir un financement. Merci également au CEA pour avoir apporté le complément.

À, **Jean-François Motsch**, pour avoir accepté de collaborer dans ce projet. Mais aussi pour avoir provoqué chez moi l'envie d'être rigoureuse et précise dans ce que je dis ou ce que je fais ... mais c'est un long travail et il faudra des années pour y arriver...

À, **Thierry Aubin et Isabelle Charrier**, pour qui la partie « bio » dans le mot « bioacoustique » est primordiale. Merci pour vos conseils et votre soutien durant ces trois années... J'en profite également pour remercier le reste de l'équipe du NAMC pour m'avoir toujours si bien accueillie. Ce fut un véritable plaisir de travailler dans cette équipe !

À, **Yves Cansi**, pour avoir pris un peu de son précieux temps pour m'accueillir au CEA et surtout pour avoir manifesté de l'intérêt pour mes recherches tout au long de ces trois années. Tes conseils et tes connaissances m'ont été vraiment très précieux.

À, **Kate Stafford**, pour m'avoir tellement inspiré dans mes recherches ... et surtout pour avoir eu la gentillesse d'accepter d'être rapporteur de ce travail.

À, **Jean-Yves Royer**, pour cette future et fructueuse collaboration qui me donne plein d'espoirs quant à la poursuite de ce travail. Merci également d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail.

À, **Vincent Ridoux**, pour son soutien et ses conseils, au tout début de cette aventure, et maintenant, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

À, **Antoine Roueff**, pour avoir vu, le premier, ces étranges signaux acoustiques dans la base des données du CEA et pour avoir manifesté aux bonnes personnes qu'il y en avait beaucoup et que ça pourrait « peut être servir à quelqu'un ...on ne sait jamais... »

À, **Pierre-Franck Piserchia**, pour m'avoir permis d'avoir accès au modèle de propagation du son, et pour avoir pris le temps de répondre à mes (nombreuses) interrogations en hydroacoustique.

À, **Julien Vergoz, Pierrick Mialle, Karl Antier et Pierre Gaillard** pour toute l'immense aide qu'ils m'ont apportée durant mes séjours au CEA. Et puis tant qu'à être au CEA, c'est-à-dire dans une structure où rien n'est très simple, je me dois de remercier **Véronique Blazy** pour ses demandes d'entrées, de PC et tout le reste...

À, **Stéphanie Steelandt et Thomas Musikas** pour avoir participé à cette aventure...

À, **Patrick Duncan** puis **Vincent Bretagnolle**, directeurs du CEBC, pour leur accueil au sein du laboratoire. Je remercie également tout le personnel du laboratoire et en particulier **Simone** puis **Aimé** pour m'avoir aidée à gérer le côté financier de cette thèse...

À, ceux et celles qui ont accepté généreusement de m'héberger (plus ou moins longtemps) lors de mes séjours parisiens. **Fafa, Violaine Dom & leur petit bonhomme, Dédé, Stéphanie, Elodie, Benoit, Pierrick et Karl**, vous m'avez accordé beaucoup plus qu'un toit et je ne vous en remercierai jamais assez.

À, mes amis de toujours **Axelle, Vincent et Dédé** pour avoir supporté tout ça, mes absences, mon manque de temps, mes faux plans et ma mauvaise humeur ... malgré tout cela vous êtes toujours là pour moi et vous me manquez...

À, **Stéphanie J, Cédric, Sophie, Hélène & David, Virginie, Fred & Valérie, Stéphanie G., Pierre, Karl, Pierrick, Elodie, Charlotte**...pour toutes ces nouvelles amitiés que ce travail de thèse au sein de trois laboratoires différents a fait naître.

À, ma famille, **mon père, ma mère, Benoit, Olivier** et **ma grand-mère** pour votre soutien, vos encouragements et votre patience ces trois dernières années. Je ne pourrai jamais vous être assez reconnaissante de m'avoir laissée librement poursuivre mes rêves.

Enfin, MERCI à **mon amoureux d'être tout simplement là...**et un petit clin d'œil à **Mouskie** pour avoir 'moussé' à mes pieds durant ces longues semaines de rédaction ...

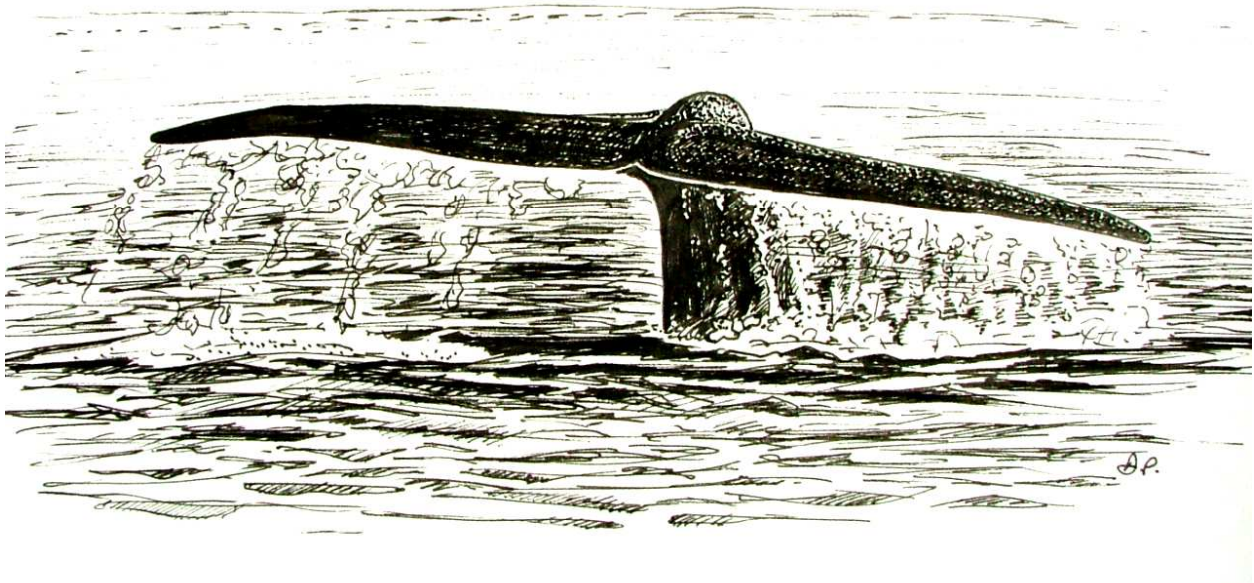


TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION	1
<hr/>	
LES BALEINES DE L'OCEAN AUSTRAL : DE LA CHASSE A L'ECOLOGIE	1
L'Océan Austral : du krill et des baleines	1
Des baleines et des Hommes...	4
Des baleines ?	9
UN NOUVEL OUTIL POUR L'ETUDE DES BALEINES : LA BIOACOUSTIQUE	13
Une méthode alternative...	14
...appliquée à l'Océan Austral	17
INTERET DE L'ETUDE ET OBJECTIFS	20
STRUCTURE DE LA THESE	23
II. MATERIEL & METHODES	25
<hr/>	
<u>PARTIE 1</u> : PRESENTATION DES MODELES BIOLOGIQUES ET DE LA STATION HYDROACOUSTIQUE DE CROZET	27
1.1. Les modèles biologiques	27
1.2. La station d'écoute de Crozet	30
1.2.1. Localisation géographique et configuration	30
1.2.2. Acquisition des données	32
1.2.3. La propagation des ondes hydroacoustiques dans le sud-ouest de l'Océan Indien	33
1.3. Le bruit ambiant à Crozet	35
1.3.1. Méthode de calcul	37
1.3.2. Résultats	38
1.3.3. Interprétations	40
<u>PARTIE 2</u> : LES SIGNAUX ACOUSTIQUES DES GRANDES BALEINES	43
2.1. Visualisation des signaux sonores et méthode de dépouillement	43
2.2. Repérage des signaux d'intérêts : signatures acoustiques des baleines bleues Antarctique et pygmée	46
2.3. Mesures des signatures acoustiques BMi et BMb	52
<u>PARTIE 3</u> : DETECTION AUTOMATIQUE : BORIE	55
3.1. Pourquoi un détecteur automatique ?	55
3.2. Description de la méthode retenue	57
3.2.1. Création des templates	57
3.2.2. Corrélation croisée et choix du seuil	57
3.3. Extraction de caractéristiques	59
3.4. Nombre de cris détectés	60
3.5. Calcul de l'intensité reçue des cris détectés.	61

<u>PARTIE 4 : LA LOCALISATION</u>	63
4.1. Présentation des méthodes utilisées et contraintes de la station hydroacoustique HA4	63
4.2. Méthode de triangulation (ou méthode hyperbolique)	64
4.2.1. Cadre théorique	65
4.2.2. Application à la configuration des hydrophones	70
4.2.2.1. Incertitude sur la valeur de la distance entre les hydrophones	70
4.2.2.2. Incertitude sur la célérité	71
4.2.2.3. Incertitude sur la précision de la mesure temporelle	71
4.2.2.4. Conclusion sur les incertitudes	72
4.2.3. Estimation des délais d'arrivée sur les hydrophones	73
4.2.3.1. Méthode 1	74
4.2.3.2. Méthode 2	75
4.2.3.3. Comparaison, conclusion et mise en oeuvre	76
4.2.4. Critères de validité et application	77
4.2.4.1. Les critères	77
4.2.4.2. Application aux deux réseaux	78
4.2.5. Application sur le réseau sud	79
4.2.5.1. Scénario 1 : la séquence indique un angle moyen avec un écart-type étroit	80
4.2.5.2. Scénario 2 : la séquence indique un angle moyen localisé au nord-est du réseau	80
4.2.5.3. Scénario 3 : la séquence indique un angle moyen avec un écart-type large	81
4.3. Estimation de la distance de détection des cris : RAM	83
4.3.1. Cadre théorique	83
4.3.1.1. Perte de l'énergie d'un signal hydroacoustique par propagation dans le milieu	83
4.3.1.2. Déduction de la distance de la source par mesures des pertes par propagation	85
4.3.2. Modèle de propagation du son	86
4.3.2.1. Choix du modèle	86
4.3.2.2. Définition mathématique du modèle RAM	89
4.3.3. Paramètres du modèle appliqué à l'étude	92
4.3.3.1. Paramètres environnementaux considérés	92
4.3.3.2. Paramètres du récepteur	95
4.3.3.3. Paramètres du signal étudié et de la source émettrice	95
4.3.4. Application du modèle	96
4.3.4.1. Courbe d'atténuation	96
4.3.4.2. Calcul des pertes	97
4.3.4.3. Estimation de la distance	98
4.3.5. Importance du choix de la fréquence du signal	99
4.3.5.1. Variation de l'atténuation selon la fréquence	99
4.3.5.2. Choix de la fréquence pour les deux espèces	101
4.3.6. Application	104
4.3.6.1. Effet spatial	104
4.3.6.2. Distance de détection des baleines	104

III. RESULTATS & DISCUSSION **105**

PARTIE 1 : LES SIGNATURES ACOUSTIQUES DES GRANDES BALEINES ENREGISTREES AU SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN **107**

1.1. Résultats	107
1.1.1. Analyses des enregistrements	107
1.1.2. Signatures acoustiques de baleine bleue Antarctique	108
1.1.3. Signatures acoustiques de baleine bleue pygmée de type « Madagascar »	112
1.1.4. Les autres signatures acoustiques	114
1.1.4.1. Signature acoustique de baleine bleue pygmée de type « Australie »	115
1.1.4.2. Signatures acoustiques « hautes fréquences »	118
1.1.4.3. Signatures acoustiques de rorqual commun	119
1.1.4.4. Signatures acoustiques non associées	121
1.2. Discussion	122

PARTIE 2 : VARIATION SAISONNIERE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES DES GRANDES BALEINES ENREGISTRES AU SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN **131**

2.1. Résultats	131
2.1.1. La baleine bleue : signaux principaux	131
2.1.1.1. Nombre de cris	132
A. Différences inter-hydrophones et inter-réseaux	132
B. Cris complets et incomplets	134
C. Saisonnalité de la baleine bleue Antarctique	135
D. Saisonnalité de la baleine bleue pygmée de type Madagascar	138
2.1.1.2. Intensité des cris mesurée aux hydrophones	141
A. Différences inter-hydrophones et inter-réseaux	141
B. Différences entre les parties du cri mesurées	142
C. Analyse des intensités des cris de baleine bleue Antarctique	144
D. Intensité des cris de baleine bleue pygmée	146
2.1.2. Autres signaux de baleine bleue	149
2.1.2.1. Baleine bleue pygmée type Australie	149
2.1.2.2. Signaux acoustiques « hautes fréquences »	149
2.1.3. Le rorqual commun	149
2.2. Discussion	150

PARTIE 3 : LOCALISATION DES BALEINES BLEUES ANTARCTIQUE ET PYGMEES AU SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN : ELEMENTS DE REPONSE. **161**

3.1. Résultats	161
3.1.1. Localisation par méthode de triangulation	161
3.1.1.1. Scénario 1 : estimation de l'angle moyen de provenance de la baleine avec un réseau	162
3.1.1.2. Scénario 2 : estimation de la position de la baleine avec les deux réseaux	165
3.1.1.3. Scénario 3 : estimation des positions de la baleine et suivis de trajectoires.	166
A. Tracking de baleine bleue Antarctique	166
B. Tracking de baleine bleue Pygmée	169

3.1.2. Modélisation de la distance	171
3.1.2.1. Effet spatial	171
3.1.2.2. Distances estimés à partir des cris des deux sous-espèces de baleines bleues la station HA4	173
A. Baleine bleue Antarctique	173
B. Baleine bleue pygmée	177
3.2. Discussion	180

IV. DISCUSSION GENERALE	191
--------------------------------	------------

V. CONCLUSION & PERSPECTIVES	201
---	------------

BIBLIOGRAPHIE	207
----------------------	------------

ANNEXES

ANNEXE 1 : Definition of the Antarctic and pygmy blue whale call templates. Application to fast automatic detection.

ANNEXE 2 : Blue whale calls recorded on autonomous instruments in the Southwestern Indian Ocean. Présenté au Comité scientifique de la Commission Baleinière International CBI, Mai 2007, Anchoage, Etats-Unis.

ANNEXE 3 : Preliminary results of large whale calls recorded at low latitudes in the southwestern Indian Ocean. Commission Baleinière International SC/58/O2 présenté au Comité scientifique de la CBI, Mai 2006, St. Kitts and Nevis, West Indies.

ANNEXE 4 : Participation à des conférences scientifiques

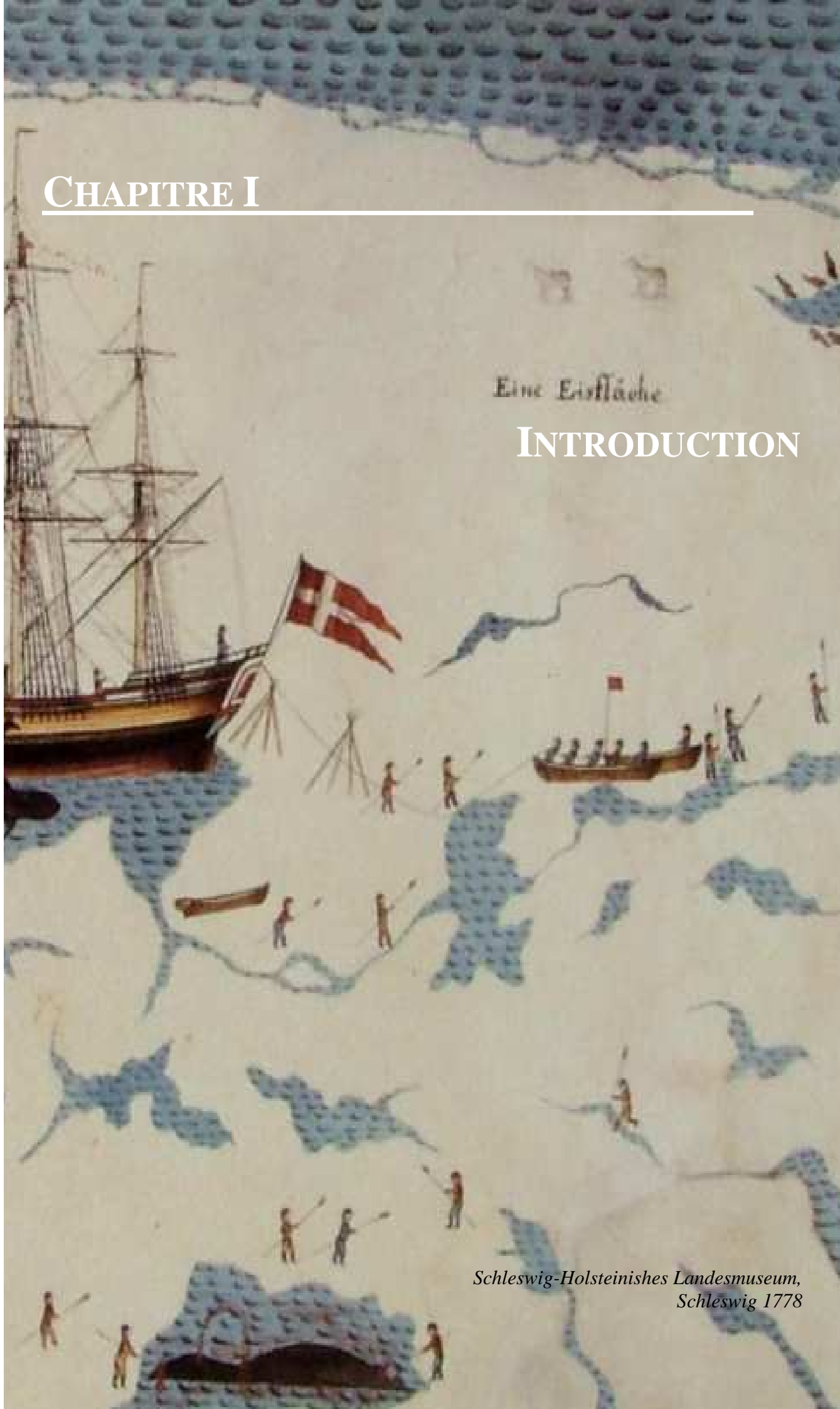
« L'homme, attiré par les trésors que pouvait lui livrer la victoire sur les cétacés, a troublé la paix de leurs immenses solitudes, a violé leur retraite, a immolé tous ceux que les déserts glacés des pôles n'ont pas dérobés à ses coups. (...) C'est ainsi que les géants des géants sont tombés sous ses armes ; et comme son génie est immortel (...) ils ne cesseront d'être les victimes de son intérêt que lorsque ces énormes espèces auront cessé d'exister. »

Lacépède, 1804

CHAPITRE I

Eine Eisfläche

INTRODUCTION



*Schleswig-Holsteinisches Landesmuseum,
Schleswig 1778*

LES BALEINES DE L'OCEAN AUSTRAL : DE LA CHASSE A L'ECOLOGIE

L'Océan Austral : du krill et des baleines...

L'Océan Austral est formé par la réunion de trois océans : l'Océan Atlantique, l'Océan Pacifique et l'Océan Indien entourant le continent antarctique ainsi que de nombreuses îles ou archipels d'îles (Figure 1.1). Sa limite nord peut se définir par la confrontation des eaux froides antarctiques et des eaux plus chaudes subantarctiques. Cette limite, appelée convergence Antarctique ou zone frontale, est large (150 km) et située vers 45°S (Laws 1985). De par ses structures hydrologiques (zones frontales) et la dynamique de la banquise Antarctique, l'Océan Austral est un écosystème riche abritant, d'abondantes populations de prédateurs.

L'abondance du phytoplancton dans l'Océan Austral suit un cycle saisonnier très fort, imposé par les grandes variations de lumière. A la fin de l'hiver, la fonte de la glace de mer libère des quantités importantes de nutriments qui deviennent alors disponibles pour le phytoplancton. On observe une forte augmentation de la biomasse phytoplanctonique à cette époque, caractérisée par une floraison (ou « bloom ») localisée en bordure de glace. La floraison phytoplanctonique est la base trophique du zooplancton, en particulier le krill Antarctique (*Euphausia superba*). Or, le krill Antarctique est une espèce clef dans l'écosystème de l'Océan Austral (Laws 1985) ; il représente la principale ressource alimentaire de nombreuses espèces de poissons, oiseaux et mammifères marins. Par conséquent, sa forte disponibilité à la fin de l'hiver et durant le printemps et l'été fait de l'Océan Austral une zone d'alimentation exceptionnelle.

Dans l'Océan Austral, le krill est la principale ressource alimentaire des mysticètes encore appelés baleines à fanons (Nemoto 1970, Laws 1977, Kawamura 1980, 1994, Lockyer 1981). On y trouve par conséquent sept espèces ou sous-espèces de baleines à fanons dont 6 de la famille des *balaenopteridae* ou rorqual : la baleine bleue Antarctique (*Balaenoptera musculus intermedia*), la baleine bleue pygmée (*B. m. brevicauda*), le rorqual commun (*B. physalus*), le rorqual boréal (*B. borealis*), le petit rorqual (*B. acutorostrata*), la baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*) et une espèce de la famille des *balaenae*, la baleine franche australe (*Eubalaena*

I. INTRODUCTION

glacialis). Le krill étant disponible uniquement durant les quelques mois de l'été austral, les mysticètes vont s'en nourrir intensivement durant toute cette période pour stocker d'importantes réserves adipeuses. Le reste de l'année, elles ne se nourriront pas ou peu et vivront entièrement sur ces réserves.

Chez de nombreuses espèces de mammifères marins, il apparaît que les environnements favorables à l'alimentation ne sont pas toujours propices à la reproduction et inversement. En réponse aux variations saisonnières de la ressource et à leurs besoins, certaines baleines, et plus particulièrement les mysticètes, ont divisé leur cycle de vie en deux périodes bien distinctes : la période d'alimentation et la période de reproduction. Ces deux périodes sont localisées le plus souvent dans deux aires géographiques éloignées avec des caractéristiques environnementales, notamment thermiques, différentes. Les aires d'alimentation sont le plus souvent situées aux pôles alors que les aires de reproduction se situent dans les eaux chaudes des tropiques. Par conséquent, cette disparité géographique a amené les populations de baleines à effectuer de longues migrations saisonnières (Figure 1.2 ; Mackintosh & Wheeler 1929, Dawbin 1966, Mackintosh 1966, Mate et al 1999). Ainsi, dans l'hémisphère sud, au printemps et au début de l'été austral, une grande partie des espèces de grandes baleines¹ migrent vers les eaux froides de l'Antarctique pour se nourrir sur les grandes concentrations de krill disponibles. A l'automne, elles retournent vers des eaux plus chaudes des basses latitudes (tropicales et subtropicales) pour se consacrer à la reproduction, la mise bas et l'allaitement (Kellogg 1929, Brown 1962a, Mackintosh 1966, Kasamatsu & Joyce 1995, Kasamatsu et al 2000). Hormis pour la baleine à bosse (Dawbin 1966), les aires de reproduction des grandes baleines de l'hémisphère sud ne sont pas très bien définies (Mackintosh 1965, Mizroch et al 1984, Laws 1985).

¹ Le terme *grande baleine* désigne ici les baleines à fanons. C'est une traduction de *large whale* et de *baleen whale*.

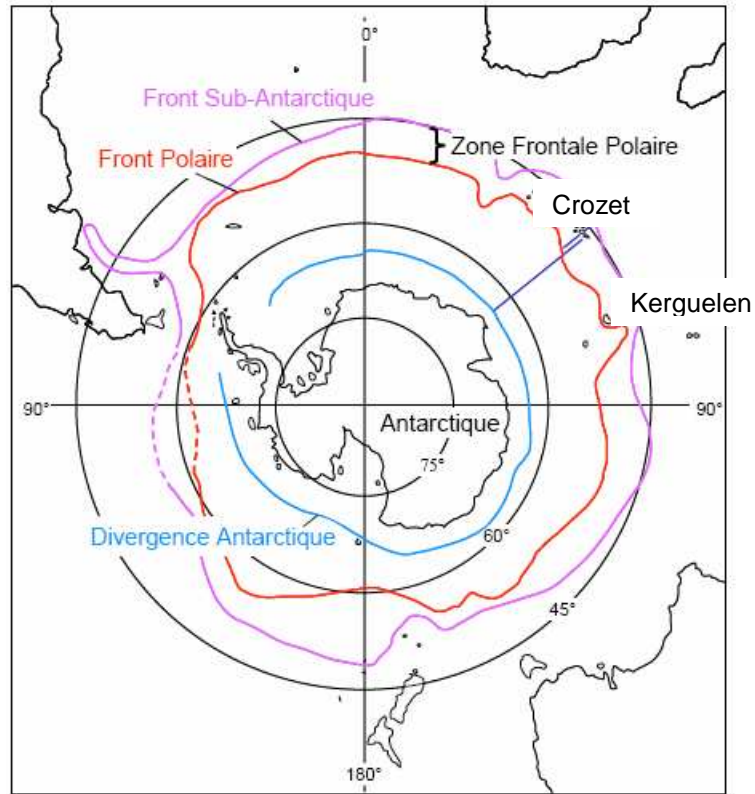


Figure 1.1 : Carte de l’Océan Austral et des principaux fronts (d’après Belkin & Gordon 1996, Park & Gambéroni 1997).

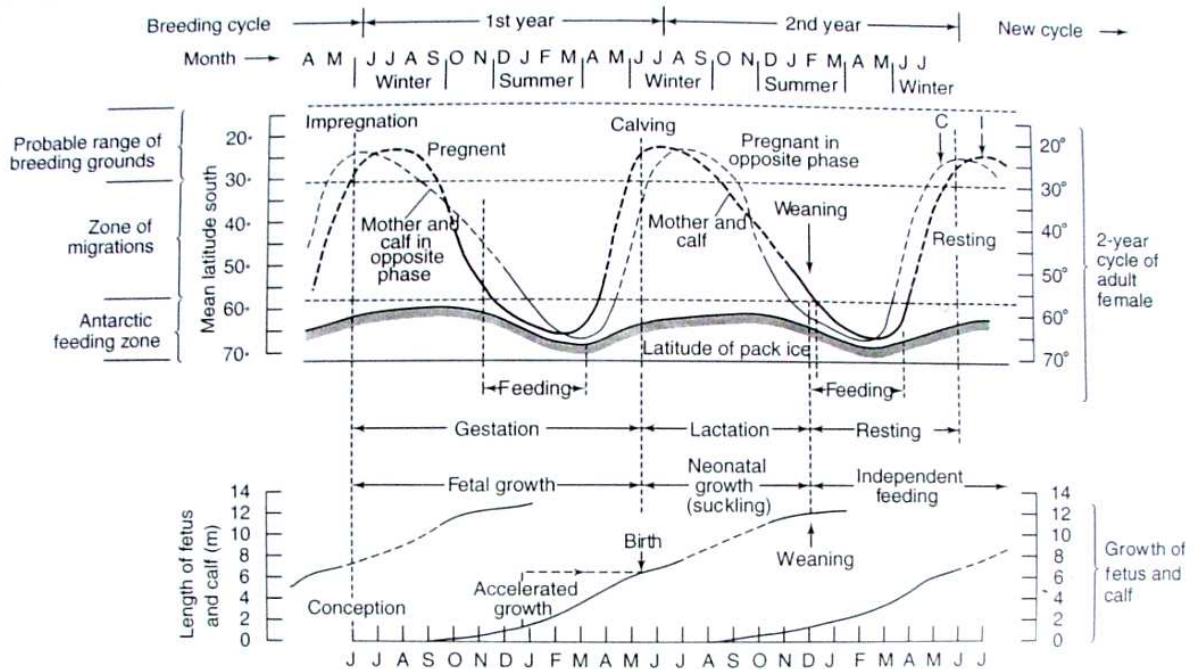


Figure 1.2 : Cycle de vie « typique » des grandes baleines dans l’hémisphère sud (modifié par Bonner 1980 d’après Mackintosh 1965).

Des baleines et des Hommes...

Pratiquée à une échelle réduite, de la préhistoire et jusqu'au IX^e siècle, la chasse à la baleine permettait de subvenir aux besoins alimentaires des hommes. Au IX^e siècle, la véritable chasse commerciale en pleine mer (la chasse pélagique) débuta par les Basques qui chassaient intensivement la baleine franche de Biscaye pour en extraire de la viande mais surtout de la graisse qui, une fois fondue, devenait la principale source d'éclairage des villes. Au début du XVIII^e siècle, de nombreux pays comme la Grande Bretagne, la Hollande, l'Amérique du nord ou encore la Norvège se sont mis à explorer l'océan Atlantique et les mers arctiques pour la capture des baleines. La rareté de la baleine franche amena les baleiniers à capturer d'autres espèces comme la baleine à bosse et le cachalot, dont l'énorme quantité d'huile contenue dans sa tête (le *spermaceti*) le désignait comme une cible préférentielle. Puis, la chasse à la baleine diminua pour diverses raisons : le pétrole et l'électricité remplaçaient l'huile de baleine pour l'éclairage et les espèces de baleines suffisamment lentes pour être chassées au harpon à main devenaient de plus en plus rares. A cette époque, les baleiniers rapportaient que seuls les rorquals semblaient abondants mais trop rapides et puissants pour être harponnés.

A la fin du XIX^e siècle les baleiniers commencèrent à s'attaquer aux rorquals grâce aux inventions combinées du canon lance-harpon et des navires à vapeur. La baleine intéressa à nouveau les industries et la chasse commerciale s'intensifia. En 1904, les nouvelles technologies alliées à la réduction des populations de baleines côtières amenèrent vers une expansion de la chasse en Antarctique, où les fortes concentrations de baleines découvertes dans ces eaux rendaient la chasse à grande échelle extrêmement rentable. Jusqu'en 1929, la chasse à la baleine dans l'Océan Austral se limitait aux zones proches des stations baleinières terrestres. Dès 1929, la chasse prit un nouvel essor avec la création des navires-usines qui accompagnaient les navires de chasse autorisant alors à exploiter largement l'Océan Austral sans être inféodé aux stations baleinières terrestres. Les stocks de baleines en Antarctique diminuaient de plus en plus et en 1925, la Ligue des Nations reconnut que les baleines de l'hémisphère sud étaient surexploitées et qu'il était nécessaire de réglementer les activités de chasse. En 1930, le Bureau des Statistiques Baleinières Internationales fut créé afin de surveiller les captures et une première réglementation internationale nommée « Convention pour la réglementation de la chasse à la baleine » fut signée en 1931. Durant cette décennie, divers pays se réunirent pour tenter de réglementer l'industrie mais ce n'est finalement qu'en 1948 que la « Convention Internationale pour la Réglementation

I. INTRODUCTION

de la Chasse à la Baleine » (ICRW) entra en vigueur. Cette convention visait à « sauvegarder les grandes ressources naturelles que représentaient les stocks de baleines (...) en créant une protection efficace et un développement coordonné de l'industrie de la chasse ». Ainsi, la Commission Baleinière Internationale (CBI) fut créée pour imposer une réglementation sur les quotas de capture, les méthodes de chasse, les zones protégées et bien plus tard la conservation des espèces. A ces débuts, la CBI imposait peu de restriction et conservait des quotas élevés entraînant un effondrement spectaculaire des populations de nombreuses espèces de grands cétacés en Antarctique où, pour la seule saison 1961/1962, plus de 66 000 baleines furent tuées. Dans ces circonstances, les baleiniers avaient de plus en plus de difficultés à trouver des animaux et le déclin des populations se poursuivra jusqu'à ce que la CBI adopte une Nouvelle Procédure de Gestion en 1974, un moratoire sur la chasse en navire-usine en 1979, et enfin un moratoire sur toute la chasse commerciale. Les océans Indien et Antarctique furent définis comme des sanctuaires baleiniers pour permettre « le rétablissement des populations de baleine ayant le plus souffert de la chasse ».

En 1905, quand la chasse débuta dans l'Océan Austral, la principale cible était la baleine bleue. Sa taille et sa quantité de graisse en faisaient une proie très rentable et la plupart des industries se focalisaient sur cette espèce à tel point que 75% de l'huile de baleine provenait de la baleine bleue (Tomilin 1967). Dans les années 30, les captures atteignirent des niveaux records (jusqu'à 29 409 individus durant l'été austral 1931/1932) et ce jusqu'à ce qu'en 1963 cette espèce soit déclarée « en sérieux danger d'extermination » (Chapman 1964). En 1967, la baleine bleue fut protégée mais une chasse illégale soviétique continua à capturer quelques centaines d'individus jusqu'en 1973, en particulier en zone subantarctique (Zemsky et al 1995, 1999, Zemsky & Sazhinov 1994, Branch et al 2008). On estime que 96% des captures de baleines bleues dans l'hémisphère sud et au nord de l'Océan Indien (Branch et al 2007) ont été faites avant que les deux sous-espèces de baleine bleue « Antarctique » et « pygmée » ne furent identifiées comme telles au début des années 60 (Ichihara 1961, 1963, 1966). Par conséquent, on estime que la plupart des captures de baleines bleues faites en zone subantarctique (40-55°S et 0-80°E) à proximité des Iles Marion, Crozet et Kerguelen sont en réalité des captures de baleines bleues pygmées (Ichihara 1966). La baleine bleue Antarctique aurait été chassée de 1904 à 1973 alors que la baleine bleue pygmée n'a été chassé qu'à partir de 1959 et ce jusqu'en 1973 (Branch et al 2007b).

I. INTRODUCTION

Le déclin des populations de baleines bleues mena les baleiniers à chasser la deuxième plus grande baleine présente, le rorqual commun, provoquant une diminution importante des populations jusque dans les années 60. Entre les années 40 et 50, suite à la protection de la baleine bleue et du rorqual commun, les baleiniers chassèrent le rorqual boréal ; bien que cette espèce soit présente dans des eaux plus tempérées et que son rendement en huile soit faible. Cette espèce fut protégée à son tour en 1977. La baleine à bosse étant une espèce plus grégaire et vivant à proximité des côtes, elle fut une cible facile pour les chasseurs. Sa population dans l'hémisphère sud a rapidement chuté mais ce n'est qu'en 1963 qu'elle fut protégée (Mackintosh 1965). Enfin, les stocks de baleine franche australe avaient déjà largement diminué avant la chasse industrielle de l'hémisphère sud ; sa facilité d'approche et sa flottabilité après la mort en ont fait la « bonne » baleine d'où son nom en anglais de « Right Whale ». Dès 1935, cette espèce fut protégée. Enfin, le petit rorqual étant une baleine bien plus petite que les autres rorquals, elle n'intéressa les baleiniers qu'à partir des années 50. En 1986, l'entrée en vigueur du moratoire sur la chasse commerciale interdit son exploitation à des fins commerciales. Une chasse dite « scientifique » se mit alors en place, portée par le Japon et la Norvège puis l'Islande. Les figures 1.3 et 1.4 présentent respectivement le nombre de captures annuelles et la distribution de la totalité des captures de différentes espèces de grandes baleines dans l'hémisphère sud.

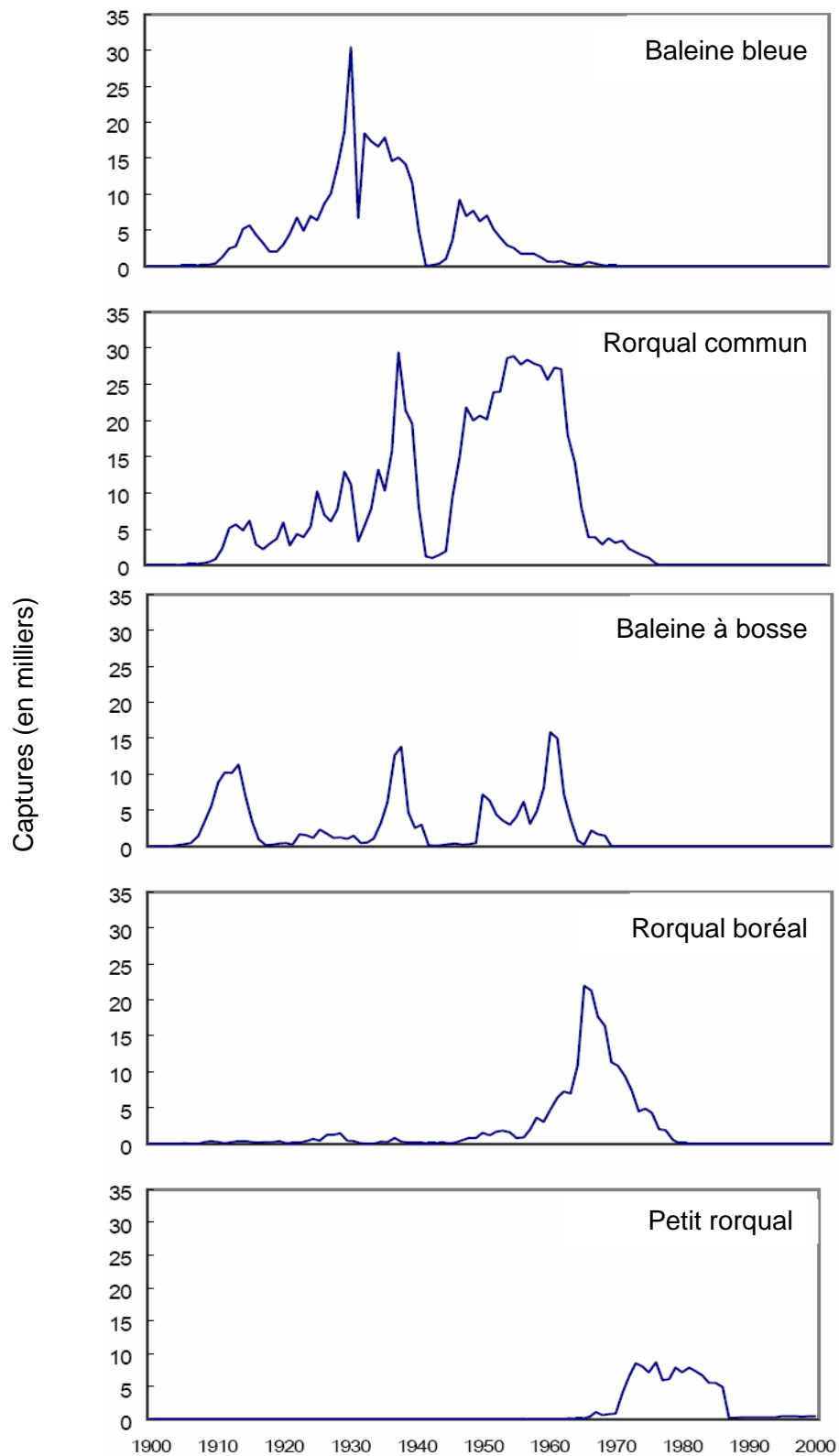


Figure 1.3 : Captures annuelles de baleines bleues, rorquals communs, baleines à bosse, rorquals boréal et petits rorquals dans l'hémisphère sud, après correction des déclarations erronées de l'ex Union-soviétiques (données CBI, C. Cotté).

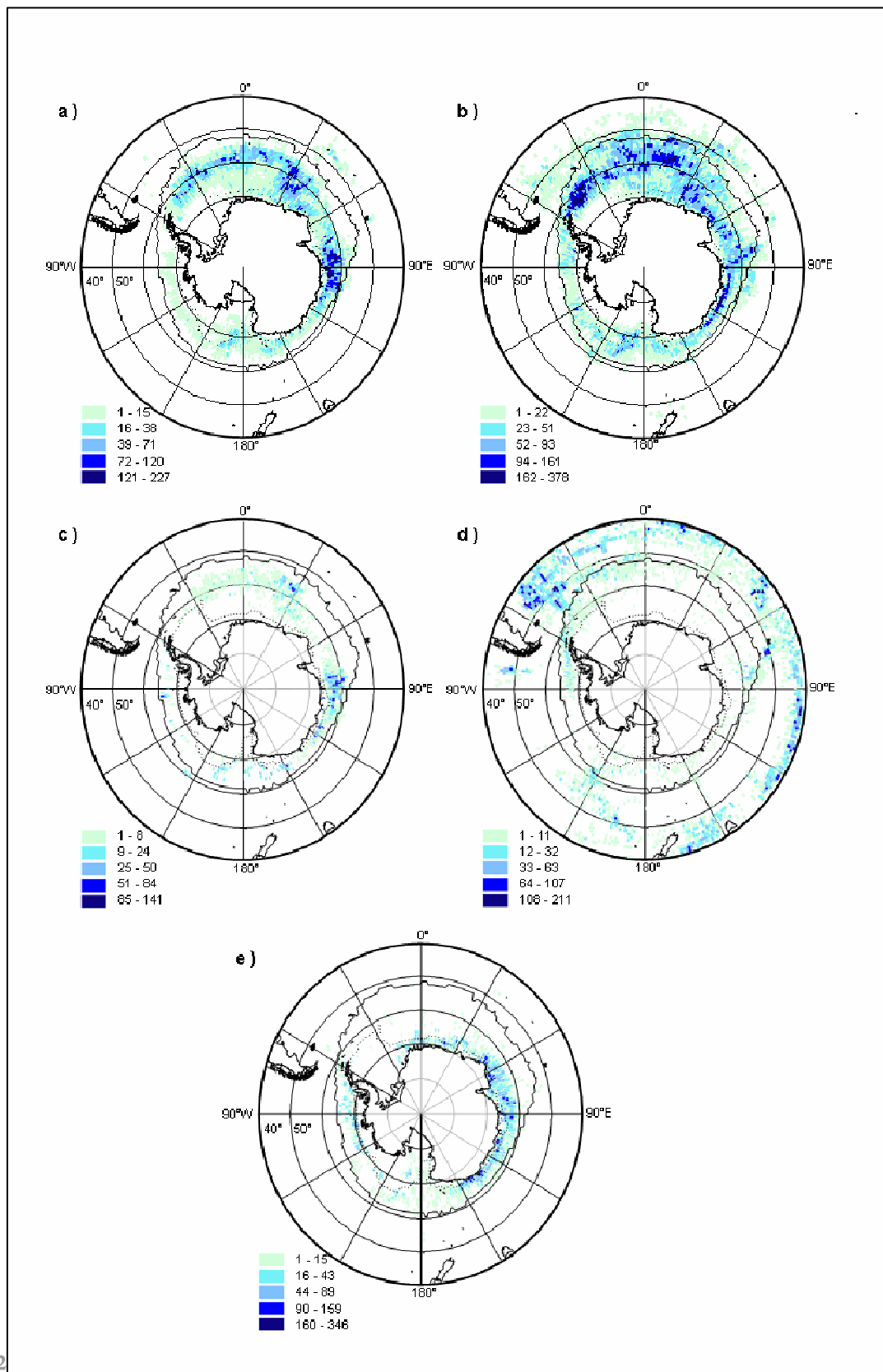


Figure 1.4: Distributions des captures officielles de baleines bleues (a), rorqual commun (b), baleine bosse (c), rorqual boréal (d) et petit rorqual (e) au XXème siècle dans l’Hémisphère sud regroupées par surface de 1° x 1° sans les corrections des déclarations erronées de l’ex Union-soviétiques (donnée CBI, C. Cotté).

Des baleines ?

La chasse à la baleine est à l'origine du déclin des populations de grandes baleines dans l'Océan Austral et le rôle actuel de la CBI, outre de garantir la protection des espèces et l'interdiction de toute chasse commerciale, est de définir l'état des stocks, la distribution et l'abondance des baleines pour évaluer à long terme le rétablissement des populations. Trois décennies après l'arrêt de la chasse, la plupart des populations de grandes baleines sont restées à un faible niveau (Branch & Butterworth 2001a) et le recouvrement de ces populations est incertain. Actuellement, des sept espèces de mysticètes présentes dans l'Océan Austral, 6 sont classées comme espèces « en danger » (la baleine bleue, le rorqual commun, le rorqual boréal, la baleine à bosse et la baleine franche australe) ; une espèce est classée « à faible risque » (le petit rorqual) et une espèce a un statut « indéfini » par manque de données (la baleine bleue pygmée), même si on suppose que son statut est proche de celui des autres sous-espèces de baleine bleue (statuts issus de « U.S Endangered Species Act » ESA). Toutes ces espèces appartiennent également à l'Appendice I de la « Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora » (CITES) regroupant les espèces menacées d'extinction. En 1977, Laws suggérait que les populations de baleine bleue et de baleine à bosse de l'Océan Austral avaient perdu 97 % et 95 % de leur effectif respectif durant la chasse commerciale. Plus récemment, en s'appuyant à la fois sur les données des captures et les observations visuelles actuelles, Branch et collaborateurs estimaient que plus de 99 % de la population de baleine bleue avait été capturée, passant d'une population d'environ 239 000 individus estimés en 1928 à 360 individus estimés en 1972 (Branch et al 2004, 2007). Pour les baleines à bosse, les différents stocks de l'hémisphère sud auraient diminué de 95 et 99 % (Johnston & Butterworth 2005a, 2005b). Dans ces circonstances, le rétablissement des populations sera forcément long et les objectifs de la CBI difficiles à atteindre.

De nos jours, lorsque l'on cherche à connaître la biologie et l'écologie des grandes baleines dans l'Océan Austral, il est évident de constater que la majeure partie des connaissances actuelles provient des données de captures. En effet, durant la période de la chasse commerciale, pour chaque baleine capturée l'espèce, l'âge, la taille, le lieu et la date de la capture étaient reportés. Pour les baleines capturées et dépecées dans les stations baleinières terrestres, des mesures anatomo-physiologiques étaient effectuées (taille des différentes parties du corps, description des caractéristiques externes, taille des ovaires, des fanons, contenu de l'estomac,

I. INTRODUCTION

etc.). Durant la chasse, des campagnes de «marquage – capture» avaient également été entreprises. Des tubes de métal contenant un numéro de série unique était fixé dans le gras de chaque animal aperçu en mer (Brown 1954, 1962) ; lorsque l'animal était capturé, il devenait possible de déduire ses éventuels déplacements améliorant ainsi les connaissances sur la migration des espèces et l'identité des stocks (Brown 1977b, 1978).

Ainsi, durant une cinquantaine d'années, la CBI collecta de nombreuses données permettant de définir les différents stocks (Gambell 1976), l'abondance passée des espèces (Branch et al 2004), la distribution des espèces durant l'été austral (Mackintosh 1946, 1965, 1966, Rice 1972). La figure 1.4 met en évidence la distribution circum antarctique des espèces avec, pour la baleine bleue par exemple une nette concentration dans les secteurs Atlantique et Indien de l'Océan Austral. Les routes et les schémas des migrations ont également pu être définis ou corrigés (Mackintosh 1966). Par exemple, de nombreuses captures de baleines bleues pygmées en zone subantarctique, l'été, ont permis de supposer que cette espèce n'effectuerait pas de migration vers l'Antarctique en été et pourrait se nourrir à des latitudes plus basses (Gambel 1964, Zemsky & Sazhinov 1994). Les caractéristiques anatomiques et physiologiques des espèces ont permis de décrire avec précision la morphologie des espèces (Tomilin 1957), la croissance (Lockyer 1976), la reproduction (Laws 1959, 1961), la mortalité (Allen 1972). Ces descriptions détaillées ont notamment permis de différencier deux sous-espèces de baleine bleue présentes dans l'Océan Austral : la baleine bleue Antarctique et la baleine bleue pygmée (Ichihara 1966, 1975). En effet, comparée à celle de la baleine bleue Antarctique, la taille maximale de la baleine bleue pygmée est plus petite (longueur maximale 24,1m vs >30m), ainsi que sa taille à maturité sexuelle ; la région de la caudale est également plus courte (Ichihara 1966). Les contenus stomacaux ont apporté des renseignements sur la nature, sur la quantité des proies ou encore sur les secteurs géographiques et sur les années riches ou pauvres en ressource (Kawamura 1994). Enfin, les récits des baleiniers ont permis d'estimer la vitesse de nage, la plongée (Mackintosh 1965), le comportement social et la structure des groupes (Nemoto 1964, Mackintosh 1965).

Aujourd'hui, ces connaissances sont devenues des bases solides pour l'étude des baleines. Elles permettent de mieux interpréter les connaissances actuelles afin de mieux comprendre l'écologie des espèces dans le but ultime d'évaluer leurs statuts et l'éventuel rétablissement des populations. Cependant, la richesse de ces données dites « historiques » contraste

I. INTRODUCTION

considérablement avec la pauvreté des données actuelles disponibles sur les grandes baleines, la principale cause à cela étant bien évidemment leur rareté.

Suite à l'arrêt officiel de la chasse, plusieurs campagnes d'observations visuelles ont été entreprises par différents pays pour recenser les populations des différentes espèces de baleines présentes, tenter de définir un indice d'abondance et une éventuelle augmentation des tailles de populations. Ainsi, la CBI a lancé deux programmes d'observations visuelles en mer en Antarctique : l'« International Decade of Cetacean Research » et le « Southern Ocean Whale and Ecosystem Research » (IDCR/SOWER). Tous les ans depuis 1978/79, de décembre à février, des relevés visuels de baleines sont effectués dans différents secteurs tout autour de l'Antarctique au sud du 60° parallèle ; le but étant de réaliser après plusieurs années un « tour complet de l'Antarctique ». Ainsi, trois campagnes d'observations périantarctiques ont été faites (de 1978/79 à 1983/84, puis de 1985/86 à 1990/1991 et enfin de 1991/1992 à 2003/2004) (Ensor et al 2007). A ces programmes d'observations se sont joints deux programmes japonais : le « Japanese Scouting Vessels » (JSV) (de 1965/66 à 1988/89) et « Japanese Whale Research Program under Special Permit » (JARPA) (de 1989 /90 à 2005/2006) lequel concentra ses observations en Antarctique plus spécialement au sud du 60° parallèle entre 35°E et 145°W (Miyashita et al 1994, 1995).

L'analyse des relevés visuels de baleines obtenus durant ces campagnes a montré que, par comparaison avec l'effort d'observation fait, les observations visuelles de baleines bleues étaient rares et que le peu de relevés visuels effectués ne permettait pas de définir une tendance dans la répartition régionale des espèces. Des modèles statistiques appliqués à toutes ces données ont révélé une augmentation de la taille de la population de baleine bleue Antarctique d'environ 8% par an (95% CI : 1,4-11,5%) depuis la protection de l'espèce en 1964 (Branch et al 2004, 2007). Dépendamment des stocks considérés dans l'hémisphère sud, la population de baleine à bosse semble être en légère augmentation également (entre 8 et 11 % par an ; Bannister 1994, Brown et al 1995, Matsuoka et al 2006, Findlay et al 1994, Zerbini et al 2004). Cependant, ces résultats sont à considérer avec beaucoup de précautions. Les pourcentages évoqués pour les populations de baleines à bosse, par exemple, semblent être à la limite des possibilités biologiques d'accroissement de population de l'espèce (Brandao et al 2000, Clapham et al 2001). La plupart des auteurs qui tentent d'estimer l'abondance des baleines en mer par les observations visuelles et sur des grands secteurs océaniques reconnaissent à quel point il est difficile d'ajuster les modèles statistiques, tant de nombreux paramètres sont à prendre en considération (e.g.

I. INTRODUCTION

cohérence et précision des méthodes d'observation, identifications des espèces par rapport aux sous-espèces ; Branch et al 2004, Mori et al 2003).

A une échelle plus réduite, la CBI a lancé un programme d'observations visuelles à l'ouest de la péninsule Antarctique « Southern Ocean Global Ecosystems Dynamics» (SO GLOBEC) pendant 2 années consécutives (2001-2003). Ce programme a permis de mettre en évidence une variation saisonnière dans la distribution des grandes baleines plus spécifiquement pour la baleine à bosse et le petit rorqual qui privilégieraient la bordure de glace l'été (Thiele et al 2004). Durant l'été austral 1995/1996, un transect linéaire à l'est de l'Antarctique (de 80 à 150°E) a été conduit et les relevés visuels ont également révélé que les baleines à fanons étaient préférentiellement présentes à proximité de la glace et des structures océanographiques (Thiele et al 2000). En 1996, le programme IDCR/SOWER a effectué des relevés visuels à des basses latitudes au large du plateau de Madagascar (25° à 35° S) durant l'été austral (Best al 2003). Ces observations ont révélé une présence importante de baleines bleues pygmées dont certaines présentaient un comportement d'alimentation. D'autres comportements similaires ont été observés à différents endroits de l'Océan Indien pour cette même espèce (Zemsky & Sazhinov 1982, Gill 2002). Enfin, depuis une trentaine d'années, des campagnes annuelles d'observations visuelles sont réalisées dans le sud-ouest de l'Océan Indien, le long d'un transect régulier entre l'île de la Réunion et les îles subantarctiques (de 66 à 11°S et de 35 à 145°E) durant l'été austral. Six espèces de baleines à fanons ont été observées dont majoritairement le petit rorqual mais, de façon générale, très peu d'observation de baleines sont reportées; par exemple, en 30 années d'observation, 15 baleines bleues et/ou rorquals communs ont été vues dans ce secteur (Legay et al 1998, Thiebot 2005).

Ainsi, ces différentes campagnes d'observations visuelles dans l'hémisphère sud révèlent deux choses. Premièrement, les effectifs des populations actuelles semblent demeurer faibles ; même si certaines populations tendent à augmenter, on est encore très loin des effectifs d'avant la chasse. Deuxièmement, la rareté des cétacés présents combinée à l'immensité de l'Océan Austral rend la méthode des relevés visuels difficile, couteuse et inadaptée pour apporter les informations nécessaires au recensement des populations de grandes baleines dans l'Océan Austral, afin d'évaluer le statut actuel des espèces.

UN NOUVEL OUTIL POUR L'ÉTUDE DES BALEINES :

LA BIOACOUSTIQUE

L'étude et le recensement des mammifères marins dans leur milieu peuvent se faire suivant trois approches complémentaires : les observations visuelles, la télémétrie et les observations acoustiques. L'approche la plus ancienne et la plus utilisée de nos jours est l'observation visuelle (Costa 1993). Les outils utilisés et les protocoles d'observation se sont développés au cours du temps (Garner et al 1998) et l'utilisation de différents outils statistiques de plus en plus performants ont permis d'améliorer l'interprétation des observations et des résultats, comme il a été noté précédemment, pour l'estimation de l'abondance des populations de baleines bleues dans l'Océan Austral avec les relevés visuels (Branch et al 2004, 2008). Cependant, les observations visuelles restent une méthode fortement dépendante des conditions météorologiques, de l'état de la mer et de la visibilité. Par conséquent, depuis quelques années, l'étude des mammifères marins fait appel à de nouvelles technologies pour compléter ou améliorer les données visuelles. La télémétrie à l'aide de balises géo-référencées par satellites ou par ondes radios (RF, VHF) ou encore les balises archivant les données de plongée (TDR) ont permis de corriger efficacement les recensements visuels des mammifères marins mais aussi d'en apprendre davantage sur leur distribution, leur migration ou encore leur comportement sous l'eau (e.g. Mate et al 1999, Oleson et al 2007). Dans l'Océan Austral, l'utilisation de ces outils est aisée sur les oiseaux et les pinnipèdes (e.g. Bailleul et al 2007, Weimerskirch et al 2002) mais n'a jamais encore été réalisée sur les grandes baleines. En effet, la mise en œuvre de cette méthode exige des moyens logistiques importants puisqu'elle nécessite une installation directement sur l'animal, ce qui s'avère une opération particulièrement difficile pour des animaux à la fois rares et rapides comme la baleine bleue. De plus, au sein d'une population, un nombre relativement limité d'individus peuvent être étudiés par cette méthode. Par conséquent, lorsque les relevés visuels ou la télémétrie sont difficilement réalisables voire impossibles (vaste secteur océanique, zone polaire durant l'hiver), les observations acoustiques représentent alors une alternative intéressante pour l'étude des mammifères marins. Cette approche consiste en une écoute « passive » de l'environnement sonore sous-marin et a l'avantage d'être non intrusive et d'opérer indépendamment des conditions météorologiques et d'éclairement. Par les observations acoustiques, on estime qu'il est possible de détecter un à dix fois plus de groupe de cétacés que par les observations visuelles (Barlow & Taylor 2005, Rankin et al 2007).

Une méthode alternative...

L'approche acoustique est possible car les mammifères marins sont des animaux acoustiquement très actifs dans le milieu marin qui est particulièrement favorable aux sons. En effet, sous l'eau, la propagation du son est complexe mais excellente par comparaison au milieu aérien. Cette particularité du milieu marin a amené un grand nombre de mammifères marins à s'adapter morphologiquement, anatomiquement et physiologiquement (Watkins & Wartzok 1985, Wartzok & Ketten 1999, Tyack & Miller 2002). La fréquence acoustique des signaux sonores émis par les cétacés est inversement proportionnelle à la longueur de l'animal (Matthews et al 1999). Les baleines à dents produisent des clics et des sifflements couvrant une très large bande de fréquence (de 1 à 20 kHz) et certaines espèces ont développé un système d'écholocation couvrant les hautes et très hautes fréquences (de 20 à 150 kHz). Les baleines à fanons utilisent plutôt les basses fréquences (de 12 Hz à 8 kHz) et ne posséderaient pas de système d'écholocation (Richardson et al 1995). La production de sons permettrait aux cétacés d'obtenir de l'information sur leur environnement comme la présence de danger ou de nourriture, plus particulièrement chez les odontocètes grâce à l'écholocation (Au 1993). Les sons leur permettraient également de signaler leur identité, leur position géographique ou leur statut reproducteur (Richardson et al 1995). D'une façon générale, l'utilité et la signification des sons chez les mysticètes sont moins bien comprises que chez les odontocètes (Schevill 1964) et de nombreuses études ont tenté d'expliquer les raisons pour lesquelles les mysticètes émettaient des sons (Schevill 1964, Thompson et al 1979).

Les mysticètes émettent des sons aux caractéristiques temporelles et fréquentielles particulières (Watkins 1981). Par exemple, la baleine bleue et le rorqual commun émettent des sons tonaux typiques répétés, de forte intensité dans des fréquences très basses (< 25 Hz). La forme de leurs signaux acoustiques varie en fréquence (on parle de modulation de fréquence, FM) et en intensité (on parle de modulation d'amplitude, AM) tout au long de l'émission. L'utilisation des basses fréquences couplée à une forte intensité faciliteraient la propagation du son dans le milieu ce qui permettrait à ces rorquals d'être détectables sur des distances supérieures à 100 km (Payne & Webb 1971, Cummings et al 1986). De plus, les signaux sont souvent émis de façon répétée sur des périodes plus ou moins longues, ponctuées par des périodes de silence, créant des patrons d'émissions qui varient en durée (Watkins et al 1987, Mellinger & Clark 2003). Ces caractéristiques sont possiblement indicatrices d'une forme de

I. INTRODUCTION

communication, comme c'est le cas pour les mammifères terrestres ou les oiseaux (Edds-Walton 1997). Cette activité vocale serait une composante essentielle de leurs activités sociales et de leurs comportements à la fois dans les aires d'alimentation et de reproduction (choix du partenaire, compétition pour la reproduction, comportement parental) et durant la migration (contact sur de grande distance, rassemblement, identification individuelle) (Tyack 1999, 2000, Clark & Ellison 2004). Plusieurs vocalisations de mysticètes ont été associées à une activité particulière (Schevill et al 1964, Watkins 1981, Tyack 1981, 1983, Oleson et al 2007), mais il est actuellement très difficile d'établir des associations bien définies entre l'activité vocale et le comportement. Pour certaines espèces, comme la baleine à bosse ou le rorqual commun, l'activité vocale ne serait propre qu'aux individus mâles (Watkins et al 1981, Darling & Berubé 2001, Croll et al 2002) et plus spécifiquement dans les aires de reproduction ; par conséquent il a été établi que cette activité était utilisée par les mâles pour attirer les femelles ou pour la compétition avec les autres mâles (Payne & McVay 1971, Winn & Winn 1978, Tyack 2000, Darling & Berubé 2001, Croll et al 2002, Darling 2002). Cependant, des activités vocales ont également été enregistrées dans les aires d'alimentation (Mattila et al 1987, Clark & Clapham 2004, Širović et al 2004) et sur les routes de migrations (Clapham & Matilla 1990, Cato 1991, Norris et al 1999). Dans ce cas, le lien avec la reproduction est plus difficile à établir et certains auteurs suggèrent alors que ce comportement serait des prémices à la reproduction (Clapham 1996, Clark & Clapham 2004). Pour d'autres espèces comme la baleine bleue, il a été rapporté que ce sont les mâles qui auraient une activité vocale bien que des femelles émettraient également certains types de signaux (McDonald et al 2001, Oleson et al 2007). Contrairement à la baleine à bosse et au rorqual commun, la baleine bleue a une activité vocale toute l'année (Stafford et al 2001, Širović et al 2004) aussi bien dans les aires d'alimentation (Oleson et al 2007, Berchok et al 2006) que dans les aires de reproduction. Enfin, l'intensité élevée et la répétition des signaux acoustiques émis par les mysticètes suggèrent qu'ils auraient une utilité pour la communication et la cohésion sociale des individus ou des groupes séparés par des grandes distances (Payne & Webb 1971, Edds – Walton 1997, Clark & Ellison 2004).

Les différentes espèces de mysticètes possèdent des signatures vocales distinctes et spécifiques et une grande part des sons a pu être enregistrée et répertoriée en combinant les méthodes acoustiques et visuelles (pour une revue : Thompson et al 1979, Richardson et al 1995, Wartzok & Ketten 1999). Les signatures vocales présentent des caractéristiques communes pour une même espèce. Par exemple, les signatures vocales des baleines bleues sont généralement longues (>20s), de basses fréquences (<100 Hz) et modulées en fréquence et en

I. INTRODUCTION

amplitude alors que celles des baleines à bosse ou des baleines franches sont plus courtes (<5 s) et plus hautes en fréquence (>100 Hz). Néanmoins, les vocalisations enregistrées dans les différents océans du monde pour une même espèce sont distinctes géographiquement suggérant des signatures vocales spécifiques selon les sous-espèces et/ou les sous-populations régionales. Ceci a largement été démontré pour la baleine bleue (e.g. McDonald et al 2006) et la baleine à bosse (Winn et al 1981, Payne 1983, Helweg et al 1998). Les signatures vocales des grandes baleines représentent par conséquent de bons indicateurs de leur présence dans une zone géographique et sans forcément nécessiter de confirmation visuelle (Mellinger et al 2007).

Le système d'enregistrement acoustique le plus ancien est la station mobile. Cette station est généralement fixée à un bateau et elle enregistre ponctuellement l'environnement sonore sous-marin. Le principal avantage de ce système est qu'il permet de combiner les observations acoustiques et les observations visuelles offrant la possibilité d'attribuer facilement la source émettrice d'un signal enregistré. Les nouvelles technologies ont permis de développer un autre système d'écoute appelé station acoustique fixe ou observatoire d'écoute. Cette station est installée dans la colonne d'eau pendant plusieurs mois ou années et enregistre en continu ou alternativement l'environnement sonore sous-marin. Les données sont stockées à l'intérieur de l'appareil et sont analysées une fois le système récupéré. Les données peuvent également être transmises directement ou en différé par satellite ou par des câbles sous-marins. Le principal avantage de ce système est qu'il permet d'effectuer des observations acoustiques sur de longues périodes de temps dans une zone déterminée. Cependant il nécessite de bien connaître la source émettrice des signaux des baleines susceptibles d'être enregistrés. Ces deux systèmes sont donc complémentaires et ils demandent également l'utilisation de plusieurs outils pour exploiter au mieux les données. Des techniques de traitement du signal sont ainsi développées pour faciliter la reconnaissance des signaux, la détection automatique et ils permettent même, dans certains cas, de localiser ou de suivre la source sonore (Spiesberger & Fristrup 1990, Cato 1998, Stafford et al 1998, Mellinger & Clark 2000, Thode et al 2000, Lopatka et al 2005, Rebull et al 2006).

Par conséquent, depuis une cinquantaine d'années, l'approche acoustique est devenue un outil puissant largement utilisé pour étudier les cétacés dans tous les océans du globe. Elle permet de détecter la présence de cétacés, d'identifier l'espèce (Payne & McVay 1971, Thompson & Friedl 1982, Cummings & Thompson 1971, Stafford et al 1999a), de localiser et de suivre les individus (Mellinger et al 2007, Gedamke et al 2001, Stafford et al 2001, Watkins et al 2004), de déterminer des patrons de distribution saisonnière de présence (Moore et al 1998,

Stafford et al 1999b, 2001) et d'abondance relative (McDonald & Fox 1999, Širović et al 2004) de reconnaître des groupes par les dialectes régionaux (Ford 1991, McDonald et al 2006, Noad et al 2000) et d'étudier le comportement (Watkins 1981, Croll et al 2002). De plus, ces méthodes permettent de mesurer simultanément l'environnement sonore dans lequel ces animaux évoluent, ce qui peut être important dans la mesure où l'on sait que, au cours du dernier siècle, l'environnement acoustique des océans a changé principalement en raison de l'augmentation des activités anthropiques dans les océans (Richardson et al 1995).

...appliquée à l'Océan Austral

Dans l'Océan Austral des observations acoustiques des grandes baleines ont été réalisées depuis une dizaine d'années (Figure 1.5). Durant les campagnes d'observations visuelles de la CBI, des enregistrements acoustiques ont été effectués durant les observations visuelles des cétacés permettant ainsi d'attribuer une signature acoustique spécifique aux différentes espèces présentes dans l'hémisphère sud (Ljungblad et al 1997, 1998, Rankin et al 2005, Matsuoka et al 2000, Ljungblad & Stafford 2005, Širović et al 2006). Des observatoires d'écoute à long terme ont récemment été installés durant une ou deux années à l'ouest de la péninsule Antarctique (Širović et al 2004), dans le détroit de Bransfield (Mellinger et al 2007) et au large de Mawson (McKay et al 2005).

L'analyse des enregistrements a révélé la détection de signatures acoustiques basses fréquences, caractéristiques des baleines bleues Antarctique toute l'année à proximité de la péninsule et du continent Antarctique avec un maximum de détection durant l'été austral (Širović et al 2004, McKay et al 2005, Mellinger et al 2007). Par ailleurs, durant l'hiver austral, ces mêmes signatures acoustiques ont été enregistrées ponctuellement à des latitudes plus tempérées dans le sud-est du Pacifique (Stafford et al 1999b, 2004), à l'ouest de l'Australie (Stafford et al 2004, McCauley et al 2004) et près de Diego Garcia (Océan Indien, Stafford et al 2004). Des signatures acoustiques de baleine bleue pygmée ont été enregistrées à des latitudes plus tempérées notamment dans l'Océan Indien (Alling et al 1991, Stafford et al 2005), au sud de Madagascar (Ljungblad et al 1997, 1998), à l'ouest de l'Australie (McCauley et al 2004, Stafford et al 2005), au sud-est (Cummings & Thompson 1971, Stafford et al 1999b) et au sud-ouest (Kibblewhite et al 1967, McDonald 2006) du Pacifique.

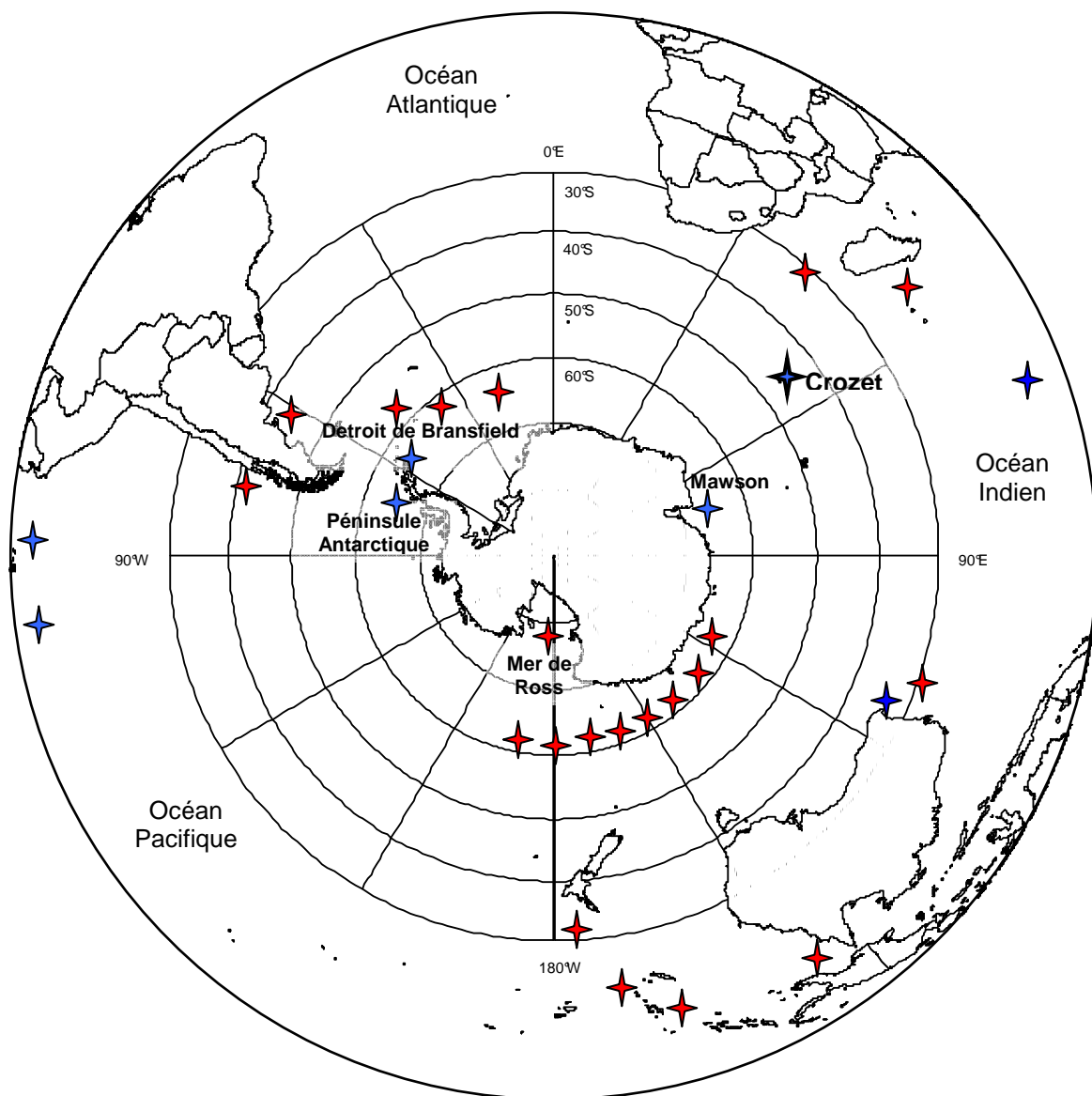


Figure 1.5 : Localisation des stations d'écoute dans l'hémisphère sud où des signatures vocales de grandes baleines ont été détectées (les symboles bleus représentent les stations fixes longues durées, et les symboles rouges les stations mobiles courtes durées).

Des détections de signatures acoustiques basses fréquences caractéristiques des rorquals communs et des rorquals boréaux ont été détections uniquement durant l'été austral à proximité de la péninsule Antarctique (Širović et al 2004, McDonald et al 2005). Des signatures acoustiques émises par des baleines à bosse dans l'hémisphère sud ont été détections durant l'hiver austral dans les aires de reproduction des moyennes latitudes, notamment dans les océans Pacifique (Helweg et al 1998), Atlantique (Darling & Sousa-Lima 2005) et Indien (Winn & Winn 1978, Razafindrakoto et al 2001). Très peu d'enregistrements sont disponibles dans les hautes latitudes (Širović et al 2006) et durant l'été austral (Leaper et al 2000). Des signatures

I. INTRODUCTION

acoustiques de petits rorquals ont été enregistrées en mer de Ross (Schevill & Watkins 1972, Leatherwood et al 1981) mais aussi dans les basses latitudes durant l'hiver austral (Gedamke et al 2001). Enfin, des signatures caractéristiques des baleines franches australes ont été enregistrées au large de l'Argentine (Cummings et al 1971, 1972, Payne & Payne 1971, Clark 1982, 1983) et peu d'études ont enregistré leur présence dans l'Océan Austral (Širović et al 2006).

Ces études acoustiques mettent clairement en évidence l'efficacité de l'approche acoustique pour étudier les populations de grandes baleines dans l'Océan Austral en apportant rapidement des nouvelles données difficilement accessibles jusqu'à présent par les méthodes classiques. Ces informations offrent la possibilité d'ajuster les connaissances issues des données historiques comme par exemple les schémas temporels et spatiaux des migrations (Mackintosh 1966). En effet, pour la baleine bleue Antarctique, les résultats de l'analyse des enregistrements de la péninsule Antarctique semblent aller à l'encontre du schéma classique de migration puisque des signaux acoustiques ont été détectés en bordure du continent durant l'hiver (Širović et al 2004, McKay et al 2005, Mellinger et al 2007) alors que, paradoxalement, à la même période des signaux ont également été détectés à des latitudes plus tempérées (Stafford et al 2004, McCauley et al 2004). Ces détections semblent alors indiquer que le schéma classique de migration de l'espèce n'est peut être pas fixe et systématique pour tous les individus. De plus, la détection de cris tout au long de l'année suggère que, contrairement à la baleine à bosse, l'activité vocale de la baleine bleue ne peut pas être liée exclusivement à la reproduction. La baleine bleue pygmée, dont le schéma migratoire est très peu connu, semble être présente à l'année dans les basses latitudes dans tout l'hémisphère sud. Les données acoustiques semblent indiquer que le rorqual commun est absent de la zone antarctique l'hiver et fortement présent durant l'été comme le décrit le schéma classique (Mackintosh & Wheeler 1929, Mackintosh 1966). De même que les détections de signature acoustique de rorquals boréals l'été en péninsule Antarctique viennent confirmer que cette espèce vient probablement se nourrir dans les hautes latitudes en cette saison (Horwood 1987).

Actuellement, même si le secteur de la péninsule Antarctique est plutôt bien renseigné, on ignore toujours ce qu'il en est tout autour du continent et plus particulièrement dans les secteurs où les captures ont été les plus importantes (secteurs austral des océans Atlantique et Indien). A cela s'ajoute que, dans les zones tempérées, les données actuellement disponibles sont éparses et ponctuelles, le plus souvent issues d'enregistrements opportunistes comme c'est le cas pour les

observations visuelles disponibles à ces latitudes. Néanmoins, seules ces données renseignent actuellement sur la présence et la distribution des baleines durant l'hiver. De nouvelles investigations acoustiques à long terme dans différents secteurs de l'Océan Austral, aussi bien en bordure Antarctique qu'aux basses latitudes pourraient apporter des indications sur les différentes espèces de grandes baleines présentes et améliorer les connaissances sur leurs distributions spatiales et temporelles donc leur écologie.

INTERET DE L'ETUDE ET OBJECTIFS

Dans ce travail de thèse, je propose d'analyser une année d'enregistrements acoustiques provenant d'un observatoire d'écoute localisé en zone subantarctique, afin d'apporter des éléments de réponses sur la présence et la répartition des espèces de grandes baleines. La zone concernée est située entre les océans Indien et Austral, soit à l'interface entre une aire d'alimentation et une aire de reproduction, et couvre une partie des sanctuaires Indien et Austral mis en place par la CBI pour la protection et l'amélioration des connaissances sur les grandes espèces de baleines.

Dans ce secteur, actuellement, que ce soit par les données historiques ou contemporaines, peu de choses sont connues sur les espèces de grandes baleines présentes. En effet, l'effort d'observation acoustique est rare (Ljungblad et al 1998) mais a néanmoins permis d'enregistrer différentes espèces de grandes baleines durant l'été austral. L'effort d'observation visuelle est plus fréquent et régulier mais les observations de grandes baleines restent peu nombreuses, la méthode étant possiblement inadaptée (Legay et al 1998, Thiebot 2005). Seules les données de captures issues de la chasse commerciale laissent supposer une importante présence passée des grandes baleines dans la partie indienne de l'Océan Austral durant l'été. Les espèces capturées étaient majoritairement des baleines bleues Antarctique et pygmées, des rorquals communs et des rorquals boréaux (Figure 1.4). La rareté des captures de petit rorqual et de baleine à bosse laisse supposer que ces espèces n'affectionnaient pas particulièrement ce secteur durant l'été. Les dernières grandes campagnes de chasse à la baleine bleue et au rorqual commun dans l'Océan Indien au début des années 70 ont par ailleurs eu lieu à proximité de notre observatoire d'écoute, c'est-à-dire autour des îles subantarctiques Crozet et Kerguelen. Dans ce travail de thèse, j'espère pouvoir déterminer, par le biais des signatures acoustiques basses fréquences

caractéristiques enregistrées, quelles sont les espèces de grandes baleines présentes et à quel moment sont-elles détectées durant l'année dans la partie Indienne de l'Océan Austral.

L'analyse des données de captures de l'ex-Union soviétique a révélé que, dans ce secteur, de nombreuses captures de baleines bleues étaient en réalité des captures de baleines bleues pygmées (Figure 1.6 - Zemsky & Sazhinov 1994, Branch et al 2007a, 2007b, 2008). Ces études récentes semblent mettre en évidence une véritable disparité géographique des deux sous-espèces de la baleine bleue et le 55° parallèle déterminerait par ailleurs la « frontière » entre les deux sous-espèces (Ichihara 1966, Kato et al 1995). La baleine bleue pygmée est très peu connue et son statut n'est toujours pas défini. Des observations visuelles au large de Madagascar avaient déjà révélées la présence des deux sous-espèces dans ce secteur (Ljungblad 1998, Best et al 2003). La distinction des deux sous-espèces en mer est très difficile ; en revanche, leurs signatures acoustiques sont nettement distinctes. De plus, dans l'Océan Indien on distingue également deux sous-populations de baleine bleue pygmée acoustiquement différentes : la baleine bleue pygmée de Madagascar, enregistrée et observée au sud de Madagascar (Ljungblad et al 1998, Best et al 2003) et la baleine bleue pygmée d'Australie enregistrée et observée à l'est de l'Australie (McCauley et al 2001, 2004). Par ailleurs, au nord de l'Océan Indien, on retrouve une troisième sous-espèce de baleine bleue non migratrice (*B.m. indica* ; Blyth 1859, Anderson 1879, Rice 1998) également distincte acoustiquement des deux sous-populations de baleine bleue pygmée et de la baleine bleue Antarctique (Alling et al 1991). Dans ce travail, j'accorderai une attention particulière sur les signaux acoustiques de baleine bleue pour déterminer quelles sous-espèces ou sous-populations sont présentes et quand elles sont détectées durant l'année dans la partie Indienne de l'Océan Austral.

Enfin, l'utilisation de l'approche acoustique suppose que nous avons une capacité de détection maximale des signaux sonores que nous enregistrons ; de même que, les signaux sonores que nous détectons sont potentiellement localisables sur une distance déterminée. J'utiliserai donc, dans ce travail, des techniques de localisation du son pour définir à quelles distances et dans quels secteurs géographiques les baleines détectées sont situées. Cette approche permettra de renseigner sur la distribution spatiale des espèces durant l'année.

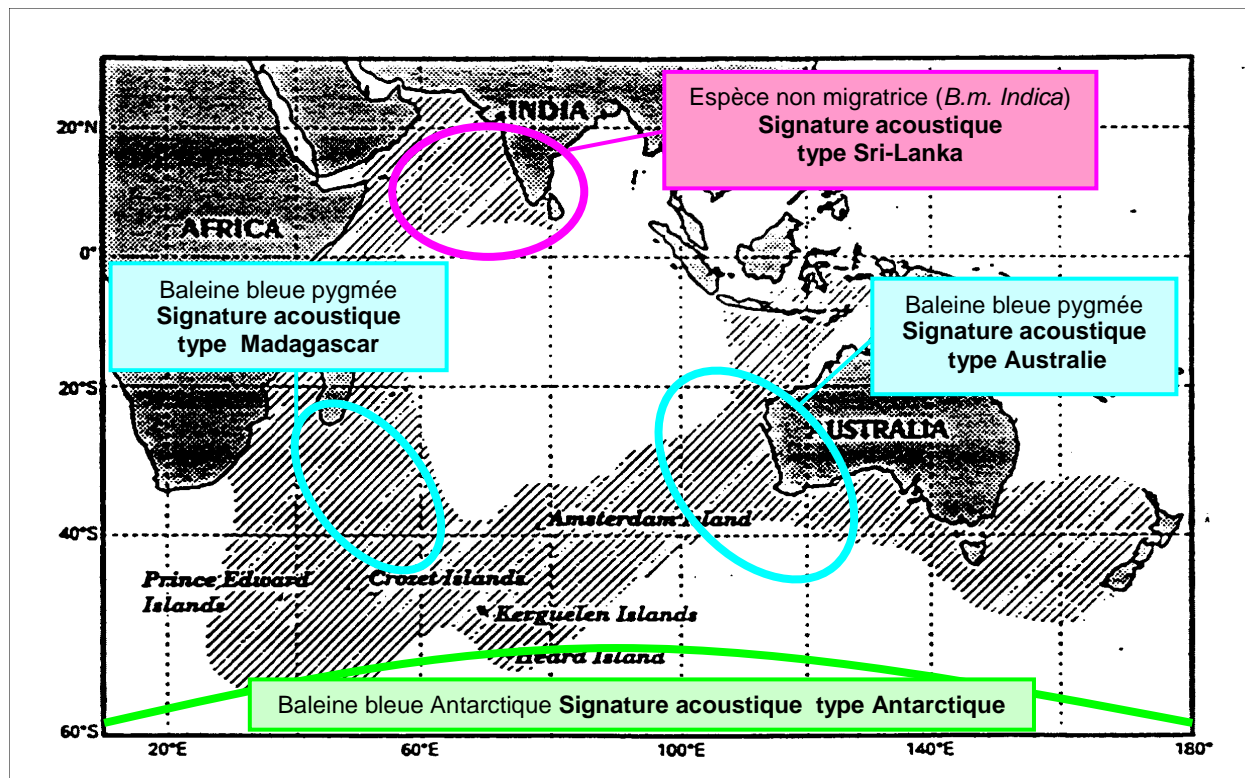


Figure 1.6 : Distribution des baleines bleue pygmée dans les Océans Indien et Austral (zone hachurée) d'après les données de captures de l'ex-Union Soviétique (extrait de Zemsky & Sazhinov 1994) et répartition des différentes « sous-populations / sous-espèces » de baleine bleue mis en évidence par les signatures acoustiques.

En résumé, ce travail de thèse a pour objectif de répondre aux trois questions suivantes :

DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL, ACTUELLEMENT...

...QUELLES ESPECES DE GRANDES BALEINES SONT PRESENTES ?

...QUAND SONT-ELLES PRESENTES ?

...OU SONT-ELLES PRESENTES ?

STRUCTURE DE LA THESE

Cette thèse aux perspectives essentiellement biologiques est, en réalité, une combinaison de plusieurs champs disciplinaires souvent bien éloignés de la biologie. Des notions de biologie bien sûr étaient nécessaires pour mener à bien ce travail mais aussi et surtout des notions (et parfois même plus) d'acoustique, de physique, de traitement de signal, de gestion de bases de données, d'hydroacoustique, d'océanographie... Par conséquent, ce travail de thèse a demandé un gros investissement dans les méthodes et le traitement des données. J'ai fait le choix d'en rendre compte dans ce manuscrit en décrivant précisément les démarches méthodologiques effectuées pour répondre aux trois grandes questions biologiques de la problématique. Ainsi, même si cette thèse a une finalité biologique, elle pourra amener des compléments d'informations, des outils ou des exemples d'applications dans les différents champs disciplinaires décrits ci-dessus.

Tout d'abord, il est important de préciser que la fonction première de cet observatoire d'écoute n'était pas d'étudier les baleines, puisqu'il fait parti du Système de Surveillance Internationale (SSI) créé dans le cadre de l'Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais Nucléaires (OTICE). Par conséquent, il a été nécessaire et indispensable de développer des outils pour exploiter au mieux cette base de données acoustiques. Ce manuscrit est donc composé d'un chapitre méthodologie divisé en 4 parties décrivant les différents outils. Après une description détaillée des espèces de grandes baleines susceptibles d'être enregistrées et de l'observatoire d'écoute utilisé ; je me suis intéressée au contenu des enregistrements afin de déterminer quelles signatures acoustiques étaient présentes et à quelles espèces elles appartenaient. Pour apprécier les variations saisonnières dans le nombre de signatures acoustiques enregistrées, une grande partie du travail a été consacrée au développement d'un détecteur automatique pour les signatures acoustiques les plus fréquemment présentes. Cette méthode a fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique internationale ; elle est placée en annexe. Enfin, je me suis attachée à définir dans quels secteurs géographiques et à quelle distance du point d'enregistrement les baleines étaient détectables donc présentes en utilisant, développant et adaptant des techniques de localisation.

I. INTRODUCTION

Le chapitre consacré aux résultats et à la discussion est divisé en trois parties dont chacune tente de répondre aux questions de la problématique, à savoir : quelles espèces de grandes baleines sont présentes dans le secteur Indien de l'Océan Austral ? Quand sont-elles présentes ? Et où sont elles localisées ? Chaque partie présente et discute les éléments de réponses obtenus dans cette étude. Une discussion générale regroupe toutes les informations que ce travail de thèse a apportées pour une meilleure compréhension du statut et de l'écologie des grandes baleines dans la partie Indienne de l'Océan Austral. Enfin, cette étude ayant ouvert un champ d'investigation large sur la recherche des grandes baleines dans l'hémisphère sud par une approche acoustique, je présenterai, en conclusion, les différentes perspectives et projets qui en découlent.

CHAPITRE II

MATERIEL & METHODES

*Spectrogramme d'une signature acoustique de baleine bleue
pygmée de type Australie*

PARTIE 1 :

PRESENTATION DES MODELES BIOLOGIQUES ET DE LA STATION HYDROACOUSTIQUE DE CROZET

Afin de répondre aux trois questions de ma problématique, j'ai utilisé une année d'enregistrements provenant d'une station d'écoute hydroacoustique du SSI localisée dans le sud-ouest de l'Océan Indien². Dans cette première partie consacrée aux méthodes, je vais tout d'abord décrire les espèces de grandes baleines étudiées et leurs principales caractéristiques acoustiques. Puis, je présenterai la station d'écoute utilisée ainsi que quelques principes fondamentaux de la propagation des ondes hydroacoustiques dans le milieu marin et ses particularités au sud de l'Océan Indien. Enfin je décrirai le bruit ambiant mesuré à la station de Crozet durant notre période d'étude. Dans le cadre de l'exploitation des signaux émis par les grandes baleines, ces informations seront nécessaires pour évaluer la qualité des enregistrements afin de répondre aux objectifs de ce travail de thèse.

1.1. Les modèles biologiques

Les grandes baleines que nous étudions ici sont des cétacés appartenant au sous-ordre des mysticètes ou baleines à fanons. Les baleines à fanons sont des mammifères marins dépourvus de dents, elles possèdent à la place de longues lamelles de kératine servant de filtres, et leur permettant de se nourrir de petits organismes (e.g. krill). Dans l'hémisphère sud, on trouve six espèces de mysticètes (Figure 2.1) : la baleine bleue, le rorqual commun, le rorqual boréal, le petit rorqual et la baleine à bosse qui appartiennent à la famille des *balaenopteridae* ou rorqual ; et la baleine franche australe qui appartient à la famille des *balaenae*. Au printemps, ces grandes baleines migrent vers les eaux polaires pour se nourrir sur les grandes concentrations de zooplancton présentes, durant l'été, autour des pôles. A l'automne, elles retournent vers des eaux tempérées des basses latitudes pour réduire leur dépense énergétique et se consacrer à la reproduction, à la mise bas et à l'allaitement. (Mckintosh 1965)

² Convention CEA-DAM/CNRS—CEB de Chizé n° 169-C

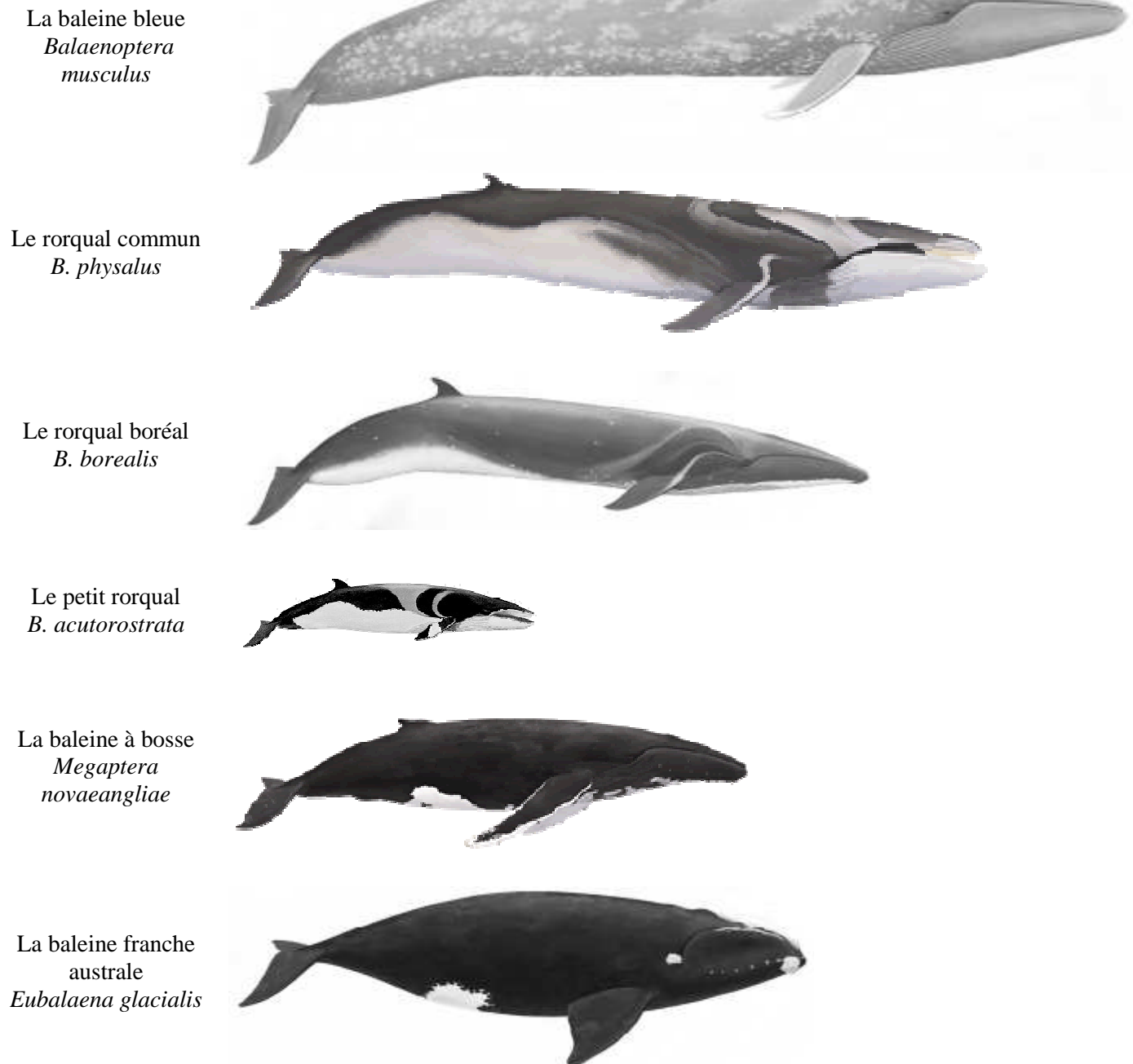


Figure 2.1 : Illustration des six espèces de mysticètes présentes dans l’Océan Austral (Illustrations de P. Folkens).

La baleine bleue est le plus gros animal vivant sur terre. Elle mesure de 20 à 33 m de long et pèse de 80 à plus de 150 tonnes. Les spécimens les plus gros sont situés dans l’hémisphère sud. Actuellement, basées sur des différences morphologiques ou géographiques, les baleines bleues sont divisées en 4 sous-espèces (Rice 1998) dont trois sont présentes dans l’hémisphère sud. L’espèce *B. m. intermedia* désigne la baleine bleue de l’Antarctique et des

hautes latitudes de l'Océan Austral. L'espèce *B. m. brevicauda* désigne la baleine bleue dite « pygmée » car elle est légèrement plus petite et présente quelques différences morphologiques nettes avec la baleine bleue Antarctique. Cette sous-espèce est distribuée dans les eaux subantarctiques des océans Indien, Atlantique et Pacifique. Dans l'Océan Indien on distingue la sous-population de Madagascar et la sous-population d'Australie. Enfin *B. m. indica* désigne la sous-espèce de baleine bleue non-migratrice qui réside au nord de l'Océan Indien. La baleine bleue émet des signaux acoustiques répétés de basses fréquences (12-400 Hz), de longues durées (>10s) et de fortes intensités (Richardson et al 1995). On distingue actuellement au moins 9 signatures acoustiques régionales typiques de baleine bleue (McDonald et al 2006) couvrant des bandes fréquentielles bien définies ; par exemple, la baleine bleue Antarctique émet des signaux caractéristiques entre 18 et 28 Hz et la baleine bleue pygmée entre 10 et 50 Hz.

Le rorqual commun, le deuxième plus grand mysticète, mesure de 17 à 27 m de long pour un poids allant de 30 à plus de 80 tonnes. Il émet des signaux acoustiques variés, le plus souvent de basses fréquences (10-750 Hz), de courtes durées (~1 s) et de fortes intensités (Richardson et al 1995). Le signal le plus commun est une impulsion courte à 20 Hz émise de façon plus ou moins répétée (Watkins et al 1987). Espèce cosmopolite, ce signal caractéristique de l'espèce a été enregistré dans tous les océans du globe (Watkins 1981, Moore et al 1998, Nieukirk et al 2004, Širović et al 2004).

Le rorqual boréal (ou de Rudolphi) mesure de 12 à 21 m de long et pèse de 15 à 30 tonnes. Espèce cosmopolite, dans l'hémisphère sud, elle est présente dans les eaux antarctiques et subantarctiques durant l'été. Le rorqual boréal émet des signaux acoustiques de basses fréquences (20-400 Hz) et de courtes durées (< 1,5 s). En Antarctique, seuls les signaux supérieurs à 200 Hz ont été enregistrés (McDonald et al 2005). De manière générale, le répertoire vocal de cette espèce est encore peu connu (Baumgartner et al 2008).

Le petit rorqual, le plus petit des rorquals, mesure de 7 à 10 m de long pour un poids de 6 à 9 tonnes. Espèce cosmopolite, dans l'hémisphère sud, on retrouve différentes sous-espèces dont le petit rorqual nain (ou à museau pointu) (*B.a. acutorostrata*) et le petit rorqual d'Antarctique (*B.a. bonaerensis*). Son répertoire vocal varié se compose de différents signaux acoustiques (grondements, clics, train de clics etc.) rarement inférieurs à 100Hz et pouvant aller jusqu'à 20 kHz (Richardson et al 1995).

La **baleine à bosse** mesure de 11 à 19 m de long et pèse de 25 à 35 tonnes. Son répertoire vocal est le plus étudié de toutes les grandes baleines. Elle émet des signaux acoustiques complexes et variés dans une très large bande de fréquences (20–40 000 Hz) (Richardson et al 1995). Ces signaux sont le plus souvent enregistrés sur les sites de reproduction (Tyack 1981).

Enfin, la **baleine franche** australe mesure de 12 à 17 m de long et pèse jusqu'au 100 tonnes. Elle émet des signaux acoustiques dans une large bande de fréquences (50-1 000 Hz), le signal le plus commun étant une impulsion courte allant de 50-90 à 200 Hz (Clark 1982, 1983).

1.2. La station d'écoute de Crozet

1.2.1. Localisation géographique et configuration

Les signaux hydroacoustiques utilisés dans ce travail proviennent de la station hydroacoustique HA4 du SSI installée en 2003 par la Direction des Applications Militaires du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA/DAM/DASE) dans le cadre de l'OTICE. Cette station est située au sud-ouest de l'Océan Indien, à proximité de l'archipel Crozet (Figure 2.2). La station HA4 est composée de 2 triplets d'hydrophones localisés au nord et au sud de l'île de la Possession entre 46°09'S - 46°51'S et 51°48'E - 51°53'E (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Coordonnées géographiques et profondeurs de mouillage des hydrophones du triplet nord et sud de la station hydroacoustique de Crozet (HA4).

	Latitude	Longitude	Profondeur (m)
N1	46°09'64''S	51°46'75''3E	290
N2	46°09'86''2S	51°48'14''8E	294
N3	46°10'63''2S	51°46'99''0E	298
S1	46°50'45''6S	51°54'77''9E	310
S2	46°51'21''4S	51°53'61''1E	350
S3	46°50'12''2S	51°53'22''1E	330

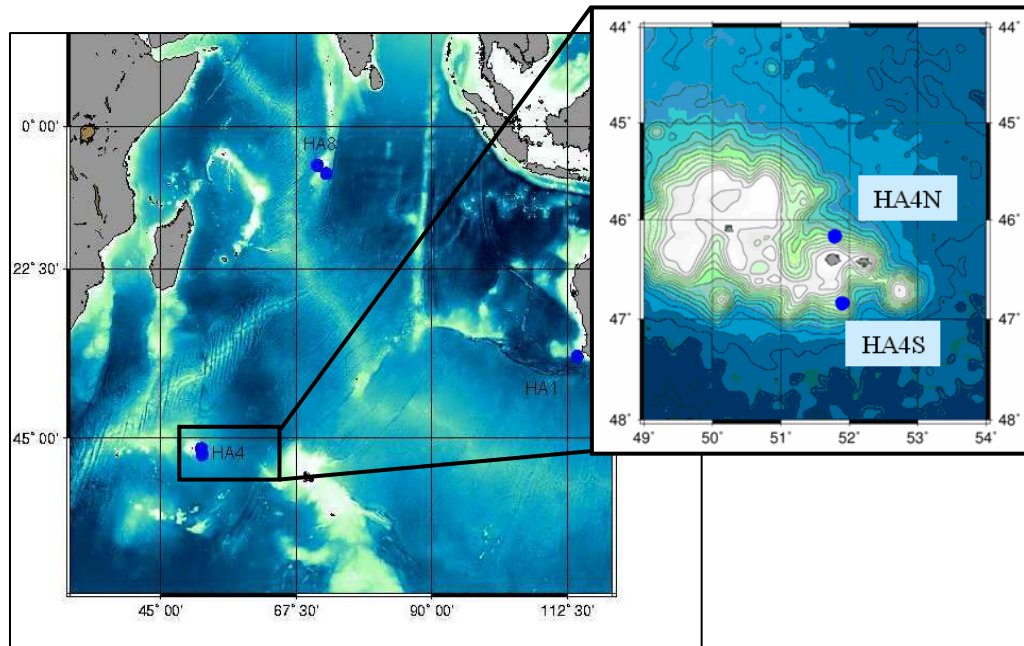


Figure 2.2 : Carte de l'Océan Indien et zoom sur la station hydroacoustique HA4.

Les triplets sont séparés d'environ 60km. La figure 2.3 montre la configuration triangulaire de chaque triplet. Dans un même triplet, une distance d'environ 1,5km sépare chaque hydrophone.

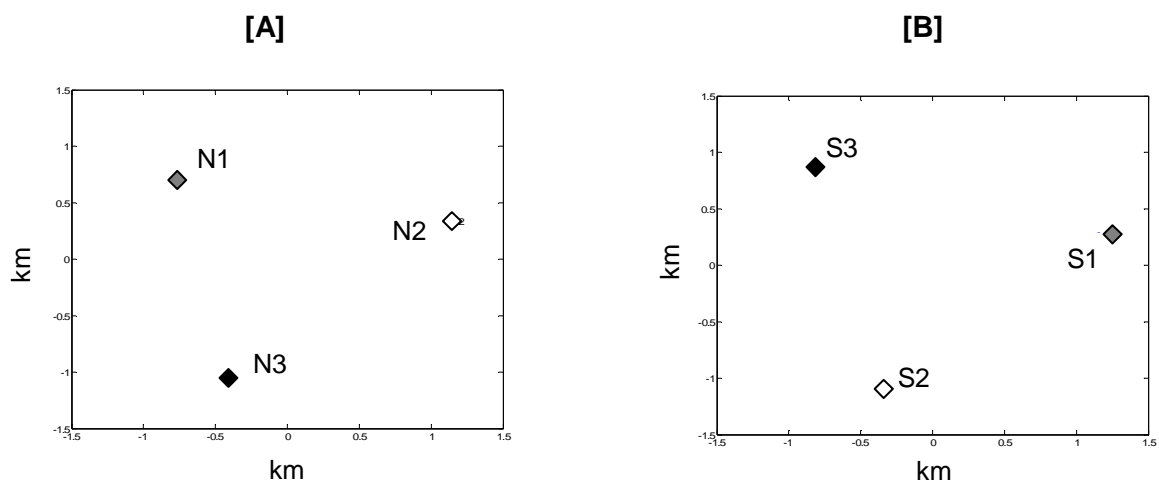


Figure 2.3 : Configuration du triplet nord [A] et sud [B] de la station hydroacoustique HA4.

Les hydrophones sont fixés sur le fond et maintenus à une profondeur de 300m par des flotteurs de subsurface (Tableau 2.1). La position de chaque hydrophone est connue avec une précision absolue de $\pm 30\text{m}$, et ce bien que le système soit soumis aux variations des courants.

1.2.2. Acquisition des données

Les signaux captés par les hydrophones sont numérisés *in situ* en continu à une fréquence d'échantillonnage de 250 Hz et transmis, par triplet, à la station terrestre par un câble à fibre optique. La bande passante de l'ensemble de la chaîne de mesures est plate de 1,2 à 102,9 Hz à ± 3 dB près. Les signaux sont filtrés avec des filtres analogiques et numériques passe-haut à 1,2 Hz avec une pente de 100dB/décade et passe-bas à 102,9 Hz à 130 dB/décade. Les données sont datées à la réception par une horloge synchronisée sur l'heure universelle donnée par la constellation GPS. La précision absolue de datation de chaque échantillon de signaux numérisés est de $0,7 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ (Bosca et al 2003). Les enregistrements sont transmis en temps réel à l'OTICE et au CEA/DAM/DASE où ils sont stockés en fichier d'une heure au format Fonyx. Pour cette étude, j'ai utilisé toutes les données disponibles de mai 2003 à avril 2004 pour les hydrophones N2, N3 (réseau nord) et S1, S3 (réseau sud). L'hydrophone N1 n'a jamais fonctionné en raison d'un problème technique lors de la mise à l'eau de l'instrument et l'hydrophone S2 a fonctionné de mai 2003 à décembre 2003. Pour certains hydrophones, la retransmission ou le stockage des signaux ont été interrompus durant des périodes variant de quelques minutes à plusieurs jours. Le tableau 2.2 résume le nombre d'heures d'enregistrements disponibles par mois pour chaque hydrophone. Depuis avril 2004, la station hydroacoustique HA4 n'est plus opérationnelle, le câble sous-marin à fibre optique ayant été endommagé suite à des ancrages de navires à proximité.

Tableau 2.2 : Nombre d'heures d'enregistrements disponibles par mois pour chaque hydrophone de la station HA4.

		Réseau nord			Réseau sud		
		N1	N2	N3	S1	S2	S3
2003	Mai	0	387	387	357	362	619
	Juin	0	635	635	619	621	346
	Juillet	0	663	663	346	356	393
	Août	0	740	740	393	404	552
	Septembre	0	615	615	552	573	690
	Octobre	0	676	676	690	698	685
	Novembre	0	685	685	685	690	619
	Décembre	0	670	670	652	251	652
2004	Janvier	0	559	559	555	0	555
	Février	0	569	569	562	0	562
	Mars	0	721	721	728	0	728
	Avril	0	709	709	204	0	204
	Total	0	7600	7600	6343	3893	6343

1.2.3. La propagation des ondes hydroacoustiques dans le sud-ouest de l'Océan Indien

La propagation des ondes hydroacoustiques dans le milieu sous-marin est complexe et non-uniforme. D'une part, elle peut déformer la nature des ondes hydroacoustiques émis par divers émetteurs (mammifères marins, séismes, explosions sous-marines volcaniques ou artificielles) enregistrées de façon totalement passive par des récepteurs fixes (i.e. les hydrophones de la station HA4) et d'autre part, elle dépend des caractéristiques du milieu (i.e. la colonne d'eau). De la propagation des ondes hydroacoustiques dépendra alors la qualité des signaux enregistrés par les hydrophones sur lesquels nous allons travailler. La propagation des ondes hydroacoustiques est dépendante de **la vitesse du son** dans l'eau (ou célérité). Les deux principaux paramètres qui affectent la vitesse du son dans le milieu marin sont la température et la salinité. Ces différents facteurs varient avec la profondeur ; par conséquent, la pression est le troisième paramètre qui entre dans la formule de calcul de la vitesse du son.

Dans la colonne d'eau, la vitesse du son décroît avec la profondeur jusqu'à atteindre un minimum à une certaine profondeur. Cette propriété a pour conséquence le piégeage des ondes hydroacoustiques au sein de cette couche d'eau à faible vitesse par réflexions multiples sur les couches sous et sus-jacentes. Par ce piégeage, les ondes hydroacoustiques ne subissent pas de pertes d'énergie ce qui leur permet de se propager avec une faible atténuation sur de grandes distances. Cette couche d'eau est appelée canal SOFAR (SOund Fixing And Ranging) ou guide d'onde. La profondeur et l'épaisseur du SOFAR varient selon la zone géographique. En général, dans les parties tropicales, équatoriales et tempérées des océans, le SOFAR est centré entre 750 et 1000 m de profondeur. Dans le sud de l'Océan Indien, plus on se rapproche de l'Antarctique, plus la température de l'eau diminue, rapprochant ainsi l'axe du canal SOFAR de la surface. A Crozet, sa profondeur est définie en moyenne à 300 m, ce qui a, par conséquent, déterminé la profondeur des hydrophones de la station HA4 (Ruzié 1998). Cependant, du fait même de la circulation océanique engendrée par le régime saisonnier de la fonte des glaces aux pôles, les zones arctiques et antarctiques ont la particularité d'avoir un SOFAR variable en fonction de l'avancée du Front Polaire. Les îles Crozet sont localisées dans la Zone Polaire Frontale, entre le Front Polaire au sud et le Front Subantarctique au nord (cf. Figure 1.1 Chapitre Introduction). Le Front Polaire se situe en été au Sud de Crozet vers 52°S et remonte en hiver vers 45°S (Park et al 1993, 1997). De ce fait, le SOFAR a tendance à remonter, puis à disparaître durant une partie

de l'hiver, ce qui devrait avoir des conséquences sur la réception des signaux sur les hydrophones suivant l'origine azimutale de l'émetteur c'est-à-dire les grandes baleines.

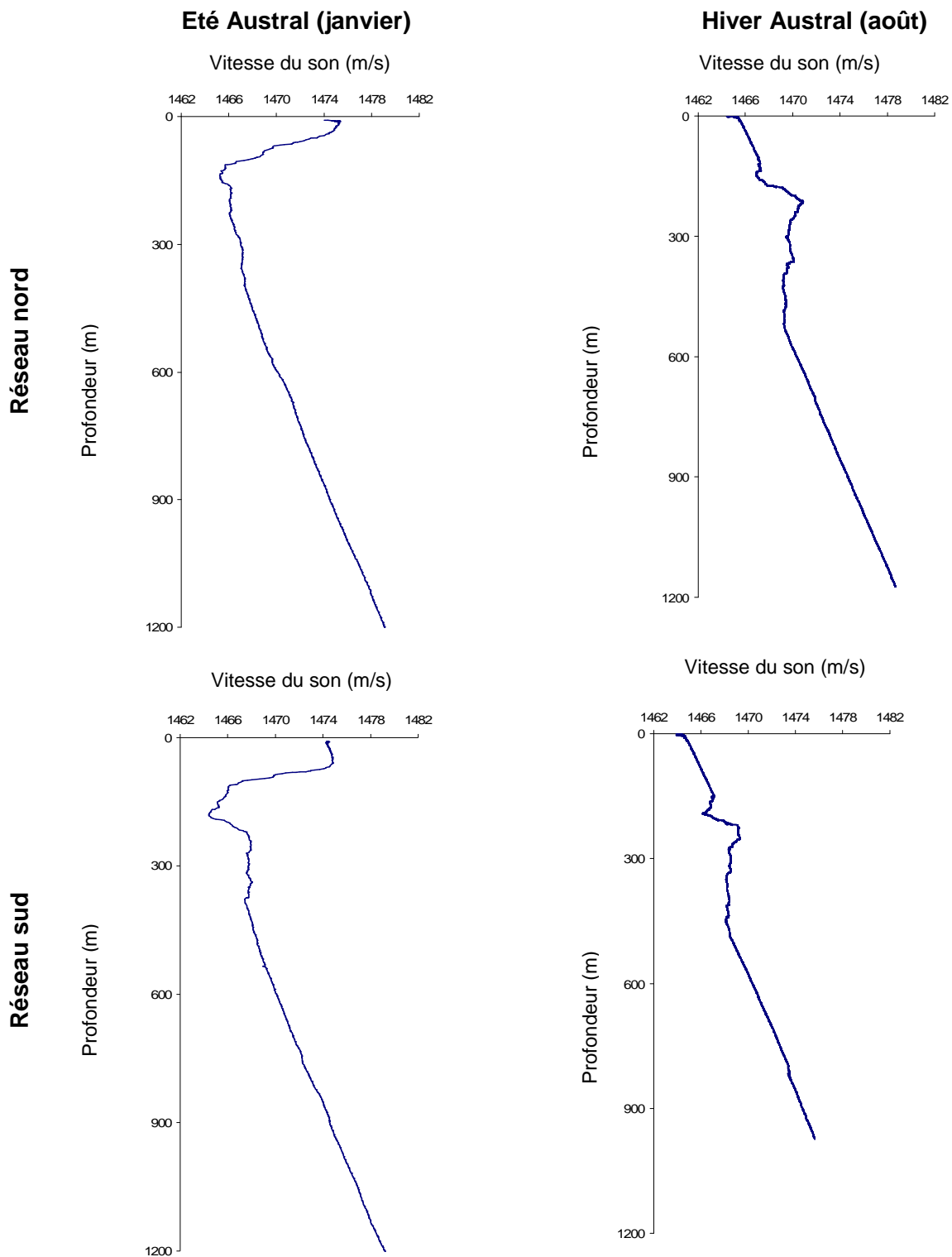


Figure 2.4 : Profils verticaux de vitesse du son à la station HA4 pendant l'été et l'hiver pour les deux réseaux (source CEA).

La figure 2.4 illustre les variations saisonnières de la vitesse du son dans la colonne d'eau autour de l'archipel Crozet. On note une certaine similitude des courbes entre le nord et le sud de Crozet. Cependant, on peut voir qu'en été l'épaisseur du SOFAR au sud est moins importante par rapport au nord et la vitesse minimale est légèrement moins marquée. En hiver, le brassage des eaux de surface fait descendre la température, donc la vitesse du son, dans les 100 premiers mètres de la colonne d'eau. Par conséquent, les contrastes entre la couche supérieure et la couche à faible vitesse sont moins marqués. Au sud, ce lissage est encore plus flagrant, au point que l'on peut dire que le SOFAR n'existe plus au mois d'août et est remplacé par une couche à faible vitesse en surface.

1.3. Le bruit ambiant à Crozet

Les hydrophones de la station HA4 enregistrent, de manière passive, tous les signaux hydroacoustiques présents dans l'environnement. J'ai donc dissocié le contenu des enregistrements en deux composantes. La première composante représente le signal utile, c'est-à-dire les sons émis par **les baleines** que l'on cherche à détecter dans cette étude. La seconde composante correspond aux autres sons présents dans les enregistrements que je considérerai, dans le cadre de cette étude, comme **du bruit** (le bruit ambiant noté *BA*). Il correspond à tous les signaux continus ou transitoires enregistrés et qui ne correspondent pas aux événements acoustiques biologiques étudiés. Dans le milieu marin, le bruit ambiant dépend principalement du bruit sismique (< 100 Hz), du bruit lié au trafic maritime et aux activités anthropiques comme la recherche pétrolière et militaire (< 500 Hz), du bruit météorologique lié à l'état de la mer résultant des courants, des marées et des précipitations, du bruit lié à la présence d'icebergs (< 10 kHz), et enfin du bruit biologique lié à la présence d'autres mammifères marins acoustiquement actifs, des crustacés, des poissons etc. (Wenz 1962, Richardson et al 1998, Figure 2.5).

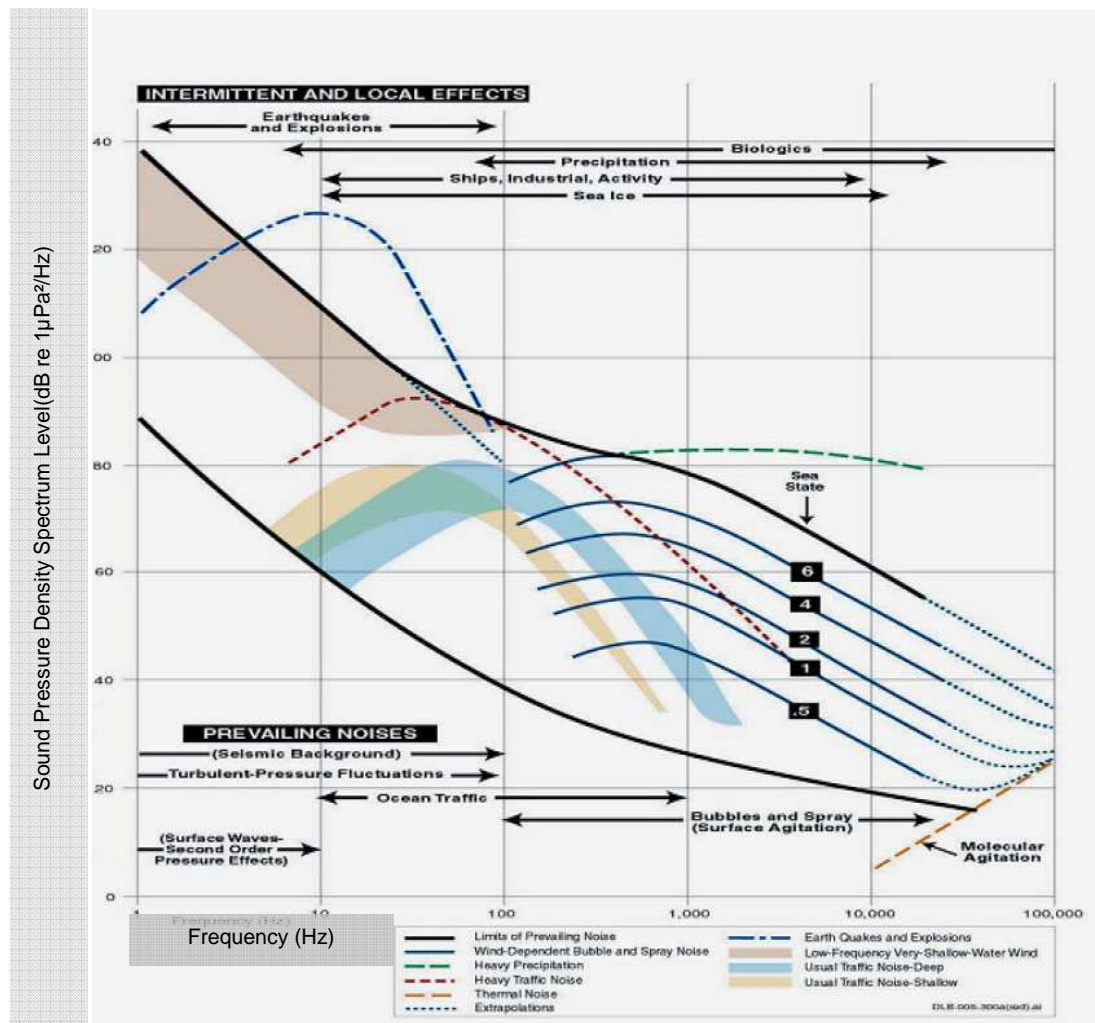


Figure 2.5 : Spectre du bruit ambiant dans l'océan composé de différentes sources (extrait de Wenz, 1962).

Ce bruit peut avoir un effet influant sur nos fréquences d'intérêt. De plus, l'intensité acoustique du bruit ambiant peut présenter des variations géographiques, saisonnières, journalières ou même horaires importantes. Par conséquent, pour mieux appréhender les signaux acoustiques de baleines présents dans les enregistrements, il est impératif de connaître l'intensité acoustique du bruit ambiant dans lequel elles évoluent. Antérieurement, le bruit ambiant autour de Crozet n'a été mesuré que sur une période de quelques jours (Piserchia & Marchand 1998). Par conséquent, afin de cerner les limites de détection des cris de baleine, j'ai établi, à partir de tous les enregistrements disponibles, une courbe de variation annuelle de l'intensité du bruit ambiant reçue aux hydrophones de chaque réseau. Dans cette partie, je décrirai la méthode utilisée pour mesurer l'intensité du bruit ambiant reçue aux hydrophones puis je présenterai les principaux résultats. Cette analyse est présentée dans ce chapitre car les résultats seront indispensables pour l'élaboration des méthodes mises au point au cours de cette étude.

1.3.1. Méthode de calcul

Les explosions sismiques, volcaniques (Roueff et al 2004), la prospection pétrolière, la glace de mer et les frottements des icebergs (Talandier 2002), le trafic maritime (peu intense dans notre zone d'étude) et l'état de la mer composent principalement le bruit ambiant dans la gamme de fréquence de nos enregistrements (i.e. <100 Hz). Certaines de ces sources sonores présentent un maximum d'énergie dans des bandes de fréquences bien précises (Wenz 1962, Figure 2.5). Par conséquent, pour connaître le rapport signal-sur-bruit (RSB) des enregistrements, il est important de définir précisément les bandes de fréquences dans lesquelles nous désirons connaître l'intensité du bruit ambiant. Pour cette étude, j'ai fait le choix d'étudier le bruit ambiant dans les mêmes bandes de fréquences où se situent les signatures acoustiques des baleines (rappelons que les baleines bleues émettent dans les bandes passantes de 18-28Hz et 10-50Hz selon les sous-espèces et les rorquals communs émettent à 20Hz; les principales signatures acoustiques des autres espèces étant supérieures à la fréquence maximale que le système d'acquisition autorise). J'ai donc fait cette mesure dans deux bandes fréquentielles : une bande de fréquence large (de 13 à 50 Hz) et une bande de fréquence plus restreinte (de 17 à 30 Hz).

Remarque

Pour analyser les signaux de baleines ou le bruit ambiant, j'ai conservé le format d'origine des enregistrements, c'est-à-dire des fichiers d'une durée d'une heure ; cette durée me paraissant optimale pour l'analyse et le traitement des données.

Pour calculer le bruit ambiant à chaque heure d'enregistrement disponible, le signal enregistré a été filtré sur chaque bande de fréquence déterminée à l'aide de 2 filtres successifs : un filtre passe-haut et un filtre passe-bas. L'énergie du bruit ambiant a été calculée par intégration sur tout le signal (cf. équation (1.1)) en utilisant une fenêtre temporelle glissante (durée 30 secondes, sans recouvrement) sur la longueur de l'enregistrement. Nous faisons l'hypothèse que l'énergie calculée dans cette fenêtre sera minimale lorsqu'il n'y aura pas de cris de baleines ou lorsque les cris auront une intensité plus faible que celle du bruit. Le niveau de pression acoustique du signal minimum est alors conservé comme la valeur du bruit ambiant pour cet enregistrement. Cette méthode permet ainsi de s'affranchir des événements transitoires qui pourraient augmenter fortement le niveau sonore (e.g. séismes, explosions, cris de baleines).

Enfin, pour chaque mois, nous avons calculé le niveau du bruit ambiant moyen mesuré sur chaque hydrophone et pour les deux réseaux de la station.

$$BA_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \right) \quad (1.1)$$

Où x et T représentent respectivement l'enregistrement et la durée du signal sur lequel la pression acoustique est calculée.

1.3.2. Résultats

Les figures 2.6 et 2.7 montrent le niveau de pression acoustique moyen mensuel mesuré sur chaque hydrophone de chaque réseau. Pour un même réseau, le niveau de pression acoustique du bruit ambiant mesuré est significativement semblable quelque soit l'hydrophone considéré (test de *Student* pour la bande de fréquences 17-30 Hz réseau nord et sud : $p > 0,05$; pour la bande de fréquences 17-50 Hz réseau nord et sud : $p > 0,05$). Par conséquent, pour le reste de l'analyse, j'ai fait le choix de réduire le nombre d'hydrophones et de ne travailler qu'avec les niveaux reçus sur un seul hydrophone par réseau : l'hydrophone N2 pour le réseau nord et l'hydrophone S3 pour le réseau sud.

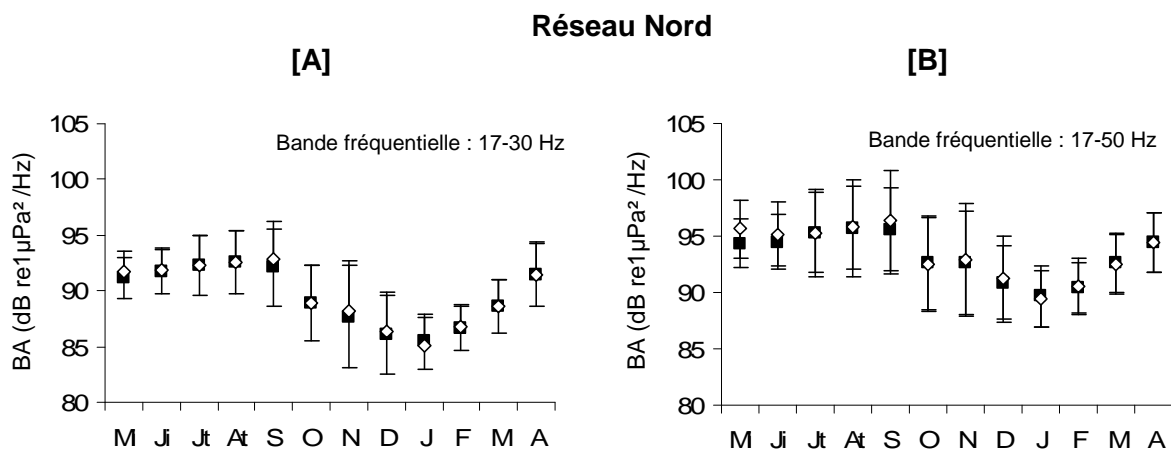


Figure 2.6 : Moyennes et écarts-types mensuels du niveau de pression acoustique du bruit ambiant calculés dans la bande de fréquences de 17-30 Hz [A] et dans la bande de fréquences 13-50 Hz [B] sur l'hydrophone N2 en noir et l'hydrophone N3 en blanc.

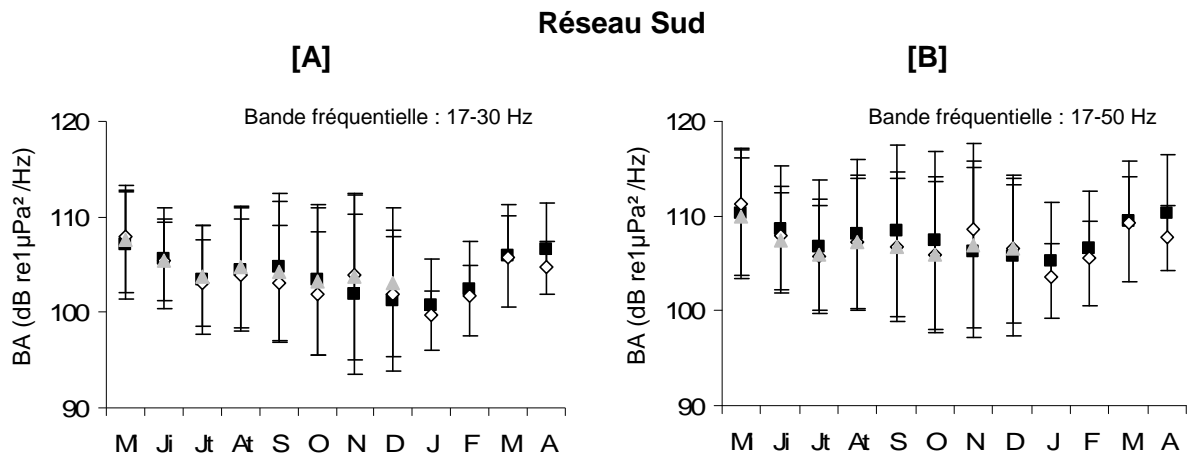


Figure 2.7 : Moyennes et écarts-types mensuels du niveau de la pression acoustique du bruit ambiant mesuré dans la bande de fréquences 17-30 Hz [A] et dans la bande de fréquences 13-50 Hz [B] sur l'hydrophone S1 en blanc, l'hydrophone sur S2 en gris et l'hydrophone S3 en noir.

La figure 2.8 compare les niveaux de bruit ambiant mesurés sur les 2 réseaux. Pour les deux gammes de fréquence mesurées, le bruit ambiant est nettement plus important sur le réseau sud que sur le réseau nord (+ 14 dB, tous mois confondus). La distribution des moyennes est également significativement différente (test de *Kolmogorov-Smirnov* : $p < 0,005$). Pour le réseau nord, dans les deux gammes de fréquences considérées, le niveau de pression acoustique du bruit ambiant mesuré aux hydrophones varie au cours de l'année. Ce bruit est maximal en juillet et août et minimal en janvier. Pour le réseau sud, dans les deux gammes de fréquences considérées, le niveau de pression acoustique du bruit varie également au cours de l'année mais de façon moins nette. Le bruit ambiant est maximal en avril et mai et minimal en janvier.

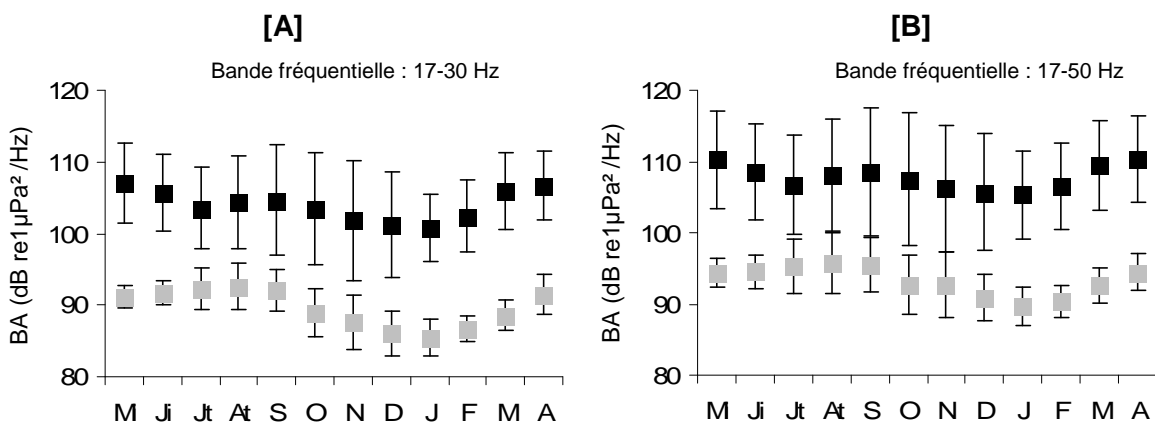


Figure 2.8 : Moyennes et écarts-types mensuels du niveau de la pression acoustique du bruit ambiant mesuré dans la bande de fréquences de 17-30 Hz [A] et dans la bande de fréquences 13-50 Hz [B] sur l'hydrophone S3 en noir et sur l'hydrophone N2 en gris.

1.3.3. Interprétations

Cette analyse a mis en évidence les variations saisonnières du bruit ambiant mesuré sur les deux réseaux de la station HA4 aux fréquences d'intérêts. Plusieurs facteurs expliqueraient ceci :

- Pour le réseau nord :

L'augmentation du bruit ambiant d'avril à septembre, soit durant l'hiver austral, correspond à la période de l'année où les vents de surface sont dominants. Ces vents génèrent alors des bruits qui contribuent à l'augmentation du bruit ambiant dans les basses fréquences du signal enregistré. Le bruit moyen au nord de Crozet est, par conséquent, généré essentiellement par les conditions météorologiques (dépressions, vents) et leurs conséquences sur l'état de la mer (houle) et au niveau des côtes (déferlantes) localisées à proximité du triplet nord (~10km).

- Pour le réseau sud :

De façon générale, le bruit ambiant mesuré est nettement plus élevé qu'au nord. L'analyse antérieure de deux mois d'enregistrements de la station HA4 a montré que les variations quotidiennes et mensuelles de la pression acoustique sont calquées sur le cycle des marées (Roueff et al 2004). Par ailleurs, des mesures de courants réalisées sur les 2 zones concernées ont montrées que les courants sont 3 fois plus forts dans la vallée sous-marine entre les îles de la Possession et l'Est que dans le nord (0,3 m/s vs 0,1 m/s) (Ruzié 1998). Tout ceci à alors pour conséquence la génération d'un bruit de vortex sur les instruments d'écoute (Damy 2000, 2005). Ce bruit masque alors partiellement le bruit saisonnier dû aux conditions météorologiques expliquant, par conséquent, les différences dans la distribution des moyennes mensuelles entre les deux réseaux. Un accroissement des courants de marée à la fin de l'été pourrait expliquer le pic de bruit présent en avril-mai sur le réseau sud. De plus, ce réseau fait directement face à l'Océan Austral qui présente une variation saisonnière de la glace de mer très importante. En hiver, la glace s'étend depuis le continent jusque vers 58°S, puis fond au printemps (Park et al 1998). Ces formations et déformations permanentes de la glace de mer engendrent des bruits dans les basses fréquences augmentant possiblement l'intensité du bruit ambiant mesuré (Z. Upton, com. pers.).

En conclusion, cette étude a permis de constater les variations saisonnières du bruit ambiant mesuré aux hydrophones. Nous verrons comment ces variations vont influencer notre capacité à détecter les signaux acoustiques émis par les grandes baleines, plus particulièrement sur le réseau sud.

PARTIE 2 :

LES SIGNAUX ACOUSTIQUES DES GRANDES BALEINES

Dans la seconde partie de ce chapitre, je décris les méthodes utilisées pour répondre à la première question de ce travail de thèse « **QUELLES ESPECES DE GRANDES BALEINES SONT PRESENTES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL ?** ». Pour ce faire, il m'a fallu définir un protocole de dépouillement adapté à la base de données afin de repérer et d'identifier les signatures acoustiques des grandes baleines présentes dans les enregistrements.

2.1. Visualisation des signaux sonores et méthode de dépouillement

En bioacoustique, les signaux sonores émis par les animaux peuvent être étudiés en écoutant directement le son, via des écouteurs par exemple. Cependant, de manière à pouvoir extraire les informations fréquentielles ou temporelles d'un signal enregistré, on peut également « visualiser » le signal sonore en utilisant les principes de l'analyse des signaux acoustiques. Dans notre étude, les signaux basses fréquences des enregistrements sont à la limite de l'audition humaine voire même en dessous. Ici, je détaille les différentes représentations visuelles que j'ai utilisées pour évaluer la nature des enregistrements.

Dans notre étude, les signaux acoustiques ont été visualisés dans 2 domaines : **le domaine temporel** et **le domaine fréquentiel** (Figure 2.9). Le domaine temporel donne une représentation du son sous forme d'ondes et fournit 2 informations différentes : le temps (en abscisse) et l'amplitude du signal (en ordonnée). Le domaine fréquentiel présente la distribution fréquentielle du signal. Le spectrogramme, couramment utilisé, est une représentation 2D permettant d'apprécier les évolutions des fréquences au cours du temps. Ici, nous avons accès à 3 informations différentes : le temps (en abscisse), la fréquence (en ordonnée) et la densité d'énergie perçue (représentée par une gamme de couleurs).

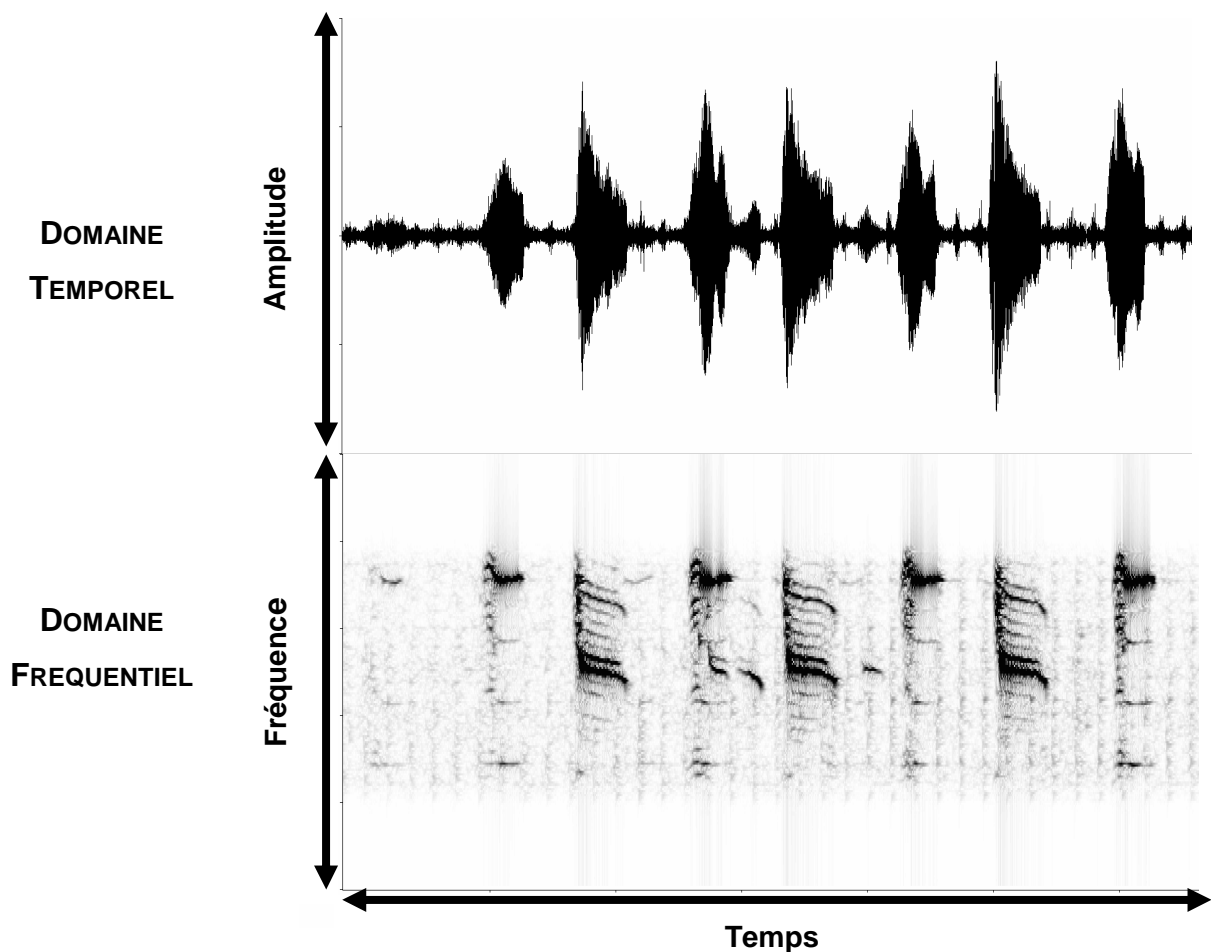


Figure 2.9 : Représentation d'un signal biologique enregistré sur l'hydrophone N2. Le domaine temporel permet la représentation du signal sous forme d'onde. Le domaine fréquentiel permet la représentation des fréquences présentes dans ce signal.

La représentation sous forme de spectrogramme est beaucoup plus aisée pour visualiser la forme du signal et les différentes fréquences qui le composent ; il permet ainsi de reconnaître plus facilement les signaux biologiques contenus dans les enregistrements. Les spectrogrammes peuvent être de courte durée ou de longue durée selon les paramètres de calcul. Pour les représentations temps-fréquence de courte durée, les spectrogrammes ont été calculés avec le logiciel Avisoft-SASALab Pro 4.39, pour les représentations temps-fréquence de longue durée, les spectrogrammes ont été calculés avec le programme MATLAB version 7.5.0.342.

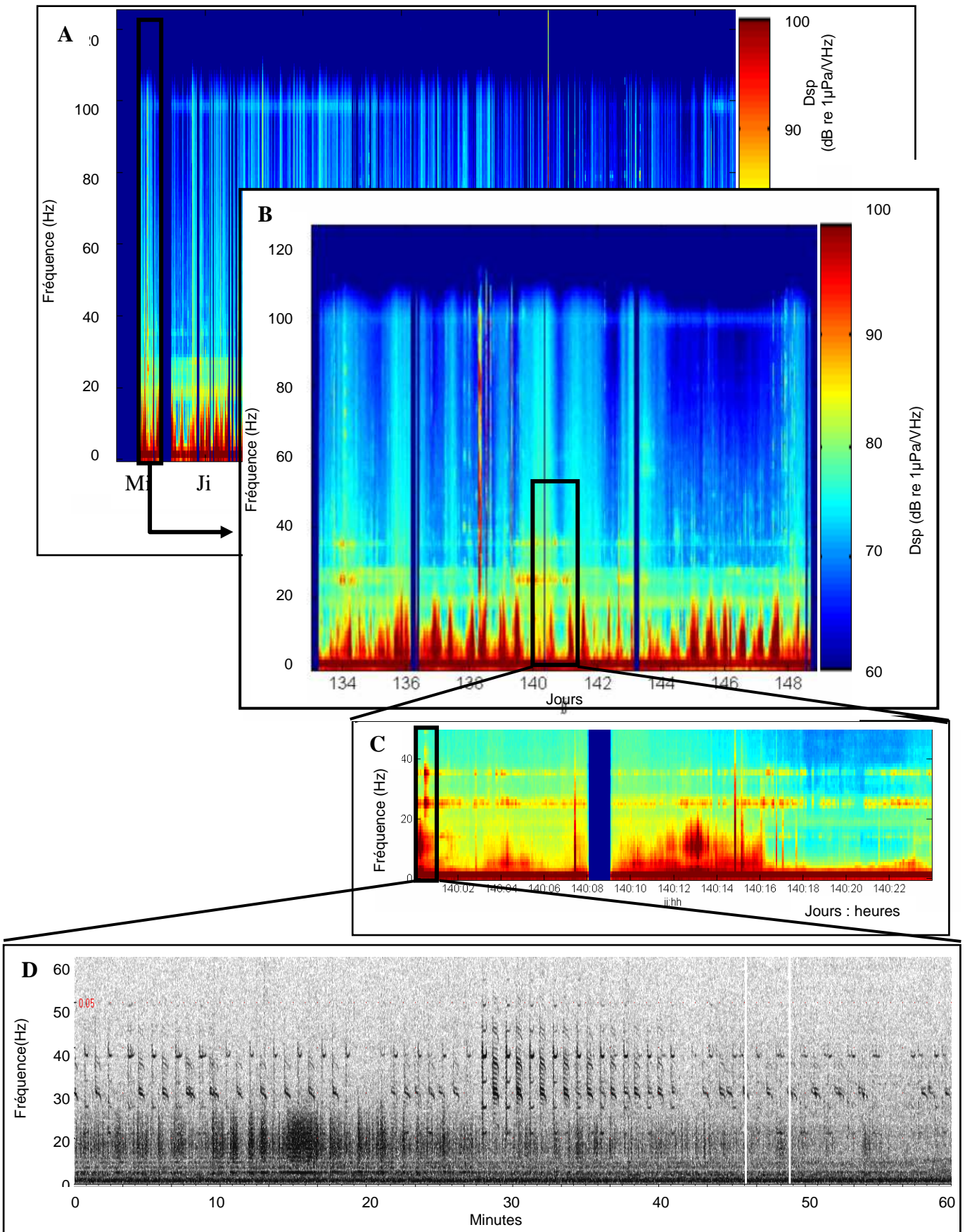


Figure 2.10 : Représentation temps-fréquence des enregistrements de l'hydrophone N2 sur une année [A], puis zoomé sur une période de 8 jours [B], puis 24 heures [C] et enfin une heure [D].

Ces représentations graphiques sont à la base de la méthode de dépouillement pas à pas des enregistrements que j'ai utilisée pour sélectionner les plages d'intérêt afin de repérer les signatures acoustiques des grandes baleines qu'ils contiennent. La figure 2.10 résume les différentes étapes de cette méthode. Dans un premier temps, une représentation en temps-fréquence de toute la période d'enregistrement disponible sur un hydrophone de chaque réseau (Figures 2.10 et 2.11 [A]) a été réalisée afin d'apprécier la qualité des signaux et les plages de temps et de fréquence où l'énergie était nettement supérieure à celle du bruit ambiant. Puis, d'autres représentations ont été générées sur des périodes plus courtes de l'ordre du mois puis de la quinzaine de jours (Figure 2.10 [B]) et enfin de la journée (Figure 2.10 [C]) pour, au final, ne retenir que les plages de temps d'intérêt où la densité de signaux était importante. Ces plages de temps ont été visualisées sur des spectrogrammes de courte durée (une heure et moins – Figure 2.10 [D]) pour en définir clairement et distinctement les caractéristiques visuelles des signaux repérés (forme, durée, intervalle avec le signal précédent etc.) dans le but de retrouver la source sonore de ces signatures acoustiques par comparaison avec la littérature.

2.2. Repérage des signaux d'intérêts : signatures acoustiques des baleines bleues Antarctique et pygmée

Le dépouillement systématique décrit précédemment a permis de reconnaître dans les enregistrements une grande quantité de signaux naturels et anthropiques (e.g. ondes sismiques, explosions, canons à air, icebergs, bateaux), ainsi que des signaux répétés et modulés en fréquence et/ou en amplitude. Une brève comparaison de ces signaux avec les spectrogrammes présents dans la littérature a permis d'attribuer ces signaux à une source biologique et plus précisément à des cétacés. Dans ce travail de thèse, j'ai fait le choix de poursuivre mes analyses sur 3 signaux acoustiques de grande baleine de forte intensité et présents de manière très récurrente dans les enregistrements de la station HA4, tout hydrophone confondu.

Remarque

On notera que la figure 2.11 permet d'apprécier la différence de bruit ambiant dans les enregistrements du réseau nord et du réseau sud notamment dans la bande fréquentielle <50Hz comme il a été remarqué dans la partie 1 de ce chapitre.

La représentation temps-fréquence de toute la période d'enregistrement disponible sur un hydrophone de chaque réseau (Figure 2.11), a mis en évidence 2 bandes de fréquences principales caractérisées par une énergie nettement supérieure au bruit ambiant et variant fortement au cours de l'année. C'est dans ces bandes de fréquences spécifiques que se situent nos signaux d'intérêts. La première bande de fréquences est comprise entre 18 et 30 Hz, la seconde, plus large, entre 20 et 40 Hz. Dans ces 2 bandes de fréquences, trois signaux aux motifs bien distincts sont repérables (Figure 2.12 [A], [B] et [C]). Ces trois signaux ont été segmentés, extraits, caractérisés et enfin comparés avec les spectrogrammes des signatures acoustiques des grandes baleines reportés dans la littérature.

Après comparaison visuelle, le premier motif (Figure 2.12 [A] et [E]) correspond à une signature acoustique **de baleine bleue Antarctique** (référence principale : Rankin et al 2005). Cette signature vocale continue peut se décomposer en deux parties correspondant à deux longs signaux de fréquences bien distinctes (partie 1 : fréquence ~28-29 Hz, durée ~8-12 s ; partie 2 : fréquence ~20-18 Hz, durée ~8-12 s ; durée totale ~18 s) séparés par un signal de courte durée fortement modulé en fréquence (fréquence : ~28-20 Hz, durée : ~2 s). Le second motif (Figure 2.12 [C]) correspond également à une signature acoustique **de baleine bleue Antarctique** (Rankin et al 2005). Il représente, en réalité, la première partie de la signature acoustique décrite précédemment. Le troisième motif (Figure 2.12 [B]) correspond à une signature acoustique **de baleine bleue pygmée de type « Madagascar »** (référence principale : Ljungbald et al 1998). Ce signal très long (durée totale ~70 s) se décompose en deux parties bien distinctes. La partie 1 est un son pur (fréquence ~38Hz, durée ~15-20 s), suivi par une période de silence (durée ~22-27 s). La partie 2 est fortement modulée en fréquence (~15-28 Hz) au début et présente une fréquence stable dans le reste du signal (~25 Hz, durée ~15-20 s). Cette partie est accompagnée de plusieurs harmoniques. Dans nos enregistrements, il est possible de retrouver une seule des deux parties du signal (partie 1, Figure 2.12 [D]).

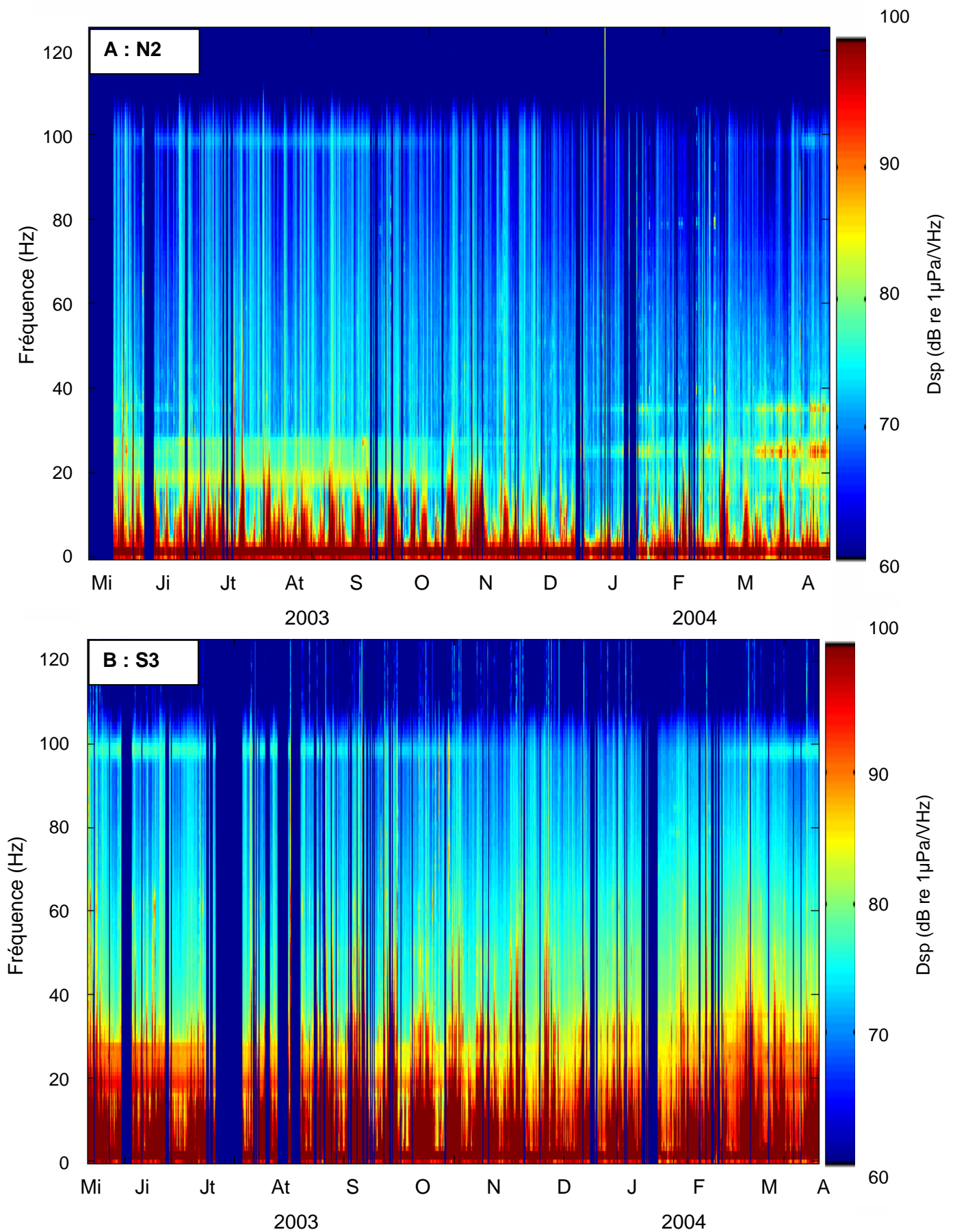


Figure 2.11: Représentation temps-fréquence de tous les enregistrements disponibles des hydrophones N2 [A] et S3 [B] (paramètres : 1 point / 5 min et 1 point / 0,125 Hz). Les plages bleues foncées correspondent aux périodes de temps sans enregistrements.

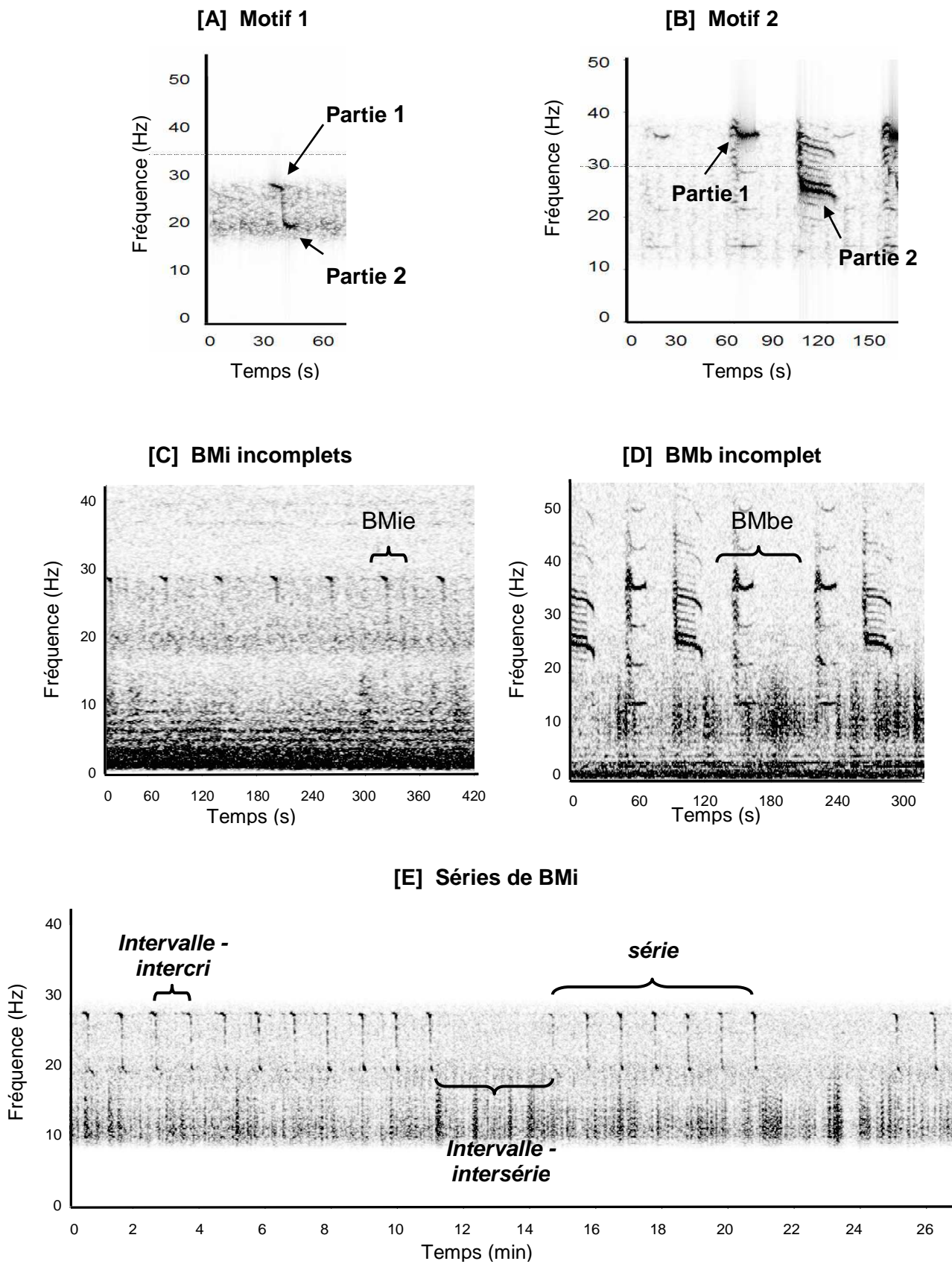


Figure 2.12 : voir légende p.51.

Les motifs décrits précédemment représentent des **signatures acoustiques** de grandes baleines. Dans la suite du manuscrit, les termes **cri**, **signal** ou **vocalise** seront également utilisés pour les nommer. Les cris sont émis de manière répétitive. L'intervalle de temps entre 2 cris se nomme **intervalle inter-cris** (*IC*). Dans cette étude, cet intervalle représente le temps entre le début d'un cri et le début du cri suivant. Une succession de plusieurs cris émis avec un intervalle inter-cris régulier forme une **série** de cris. Lorsque deux séries de cris sont séparées par une période de silence de quelques minutes (< 200 s) alors cette période se nomme **intervalle inter-séries** (*IS*) (Figure 2.12 [E]). Enfin, dans la suite du manuscrit, différentes abréviations seront utilisées pour définir les cris de baleine bleue Antarctique (**BMi**), les cris de baleine bleue Antarctique incomplets (partie 1 **BMie**), les cris de baleine bleue pygmée (**BMb**) et les cris de baleine bleue pygmée incomplet (partie 1 **BMbe**).

Figure 2.12 (ci-contre) : Signaux hydroacoustiques d'origine biologique. [A], [B] et [C] : spectrogrammes des 3 motifs vus le plus fréquemment dans tous les enregistrements disponibles des hydrophones N2 et S3 et principales parties du signal ([A] : Filtre passe-bande 15-30Hz, FFT de 2048 points, recouvrement de 90 %, fenêtre de Hanning ; [B] : Filtre passe-bande 12-38Hz, FFT de 1024 points, recouvrement de 90 %, fenêtre de Hanning ; [C]: FFT de 2048 points, recouvrement de 90 %, fenêtre de Hanning). [D] Série de cris dont un cri dit « incomplet » émis par une baleine bleue pygmée ([D]: FFT de 1024 points, recouvrement de 90 %, fenêtre de Hanning). [E] Séries de cris émis par une baleine bleue Antarctique et description de la terminologie ([E] : Filtre passe-bande 10-30Hz, FFT de 2048 points, recouvrement de 90 %, fenêtre de Hanning).

2.3. Mesures des signatures acoustiques BMi et BMb

Afin de décrire de manière quantitative, les signatures acoustiques des deux sous-espèces de baleines bleues enregistrées, différentes caractéristiques des cris enregistrés ont été mesurées. Pour ce faire, j'ai fait le choix d'effectuer ces mesures sur une sélection de séries de cris de fortes intensités avec un bon RSB et enregistrées à différentes périodes de l'année. Dans chacune de ces séries, les mesures des cris ont été faites sur des spectrogrammes aux paramètres fixes (FFT de 1024 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming). Le cri de la baleine bleue Antarctique étant composé d'un seul signal continu, la mesure des caractéristiques des différentes parties qui le composent a été faite manuellement. Au contraire, le cri de la baleine bleue pygmée étant composé de deux signaux bien distincts, les mesures ont pu être faites de façon automatique. Les caractéristiques mesurées ont été, pour chaque partie du cri : la durée, la fréquence initiale, la fréquence finale, la fréquence de l'amplitude maximale (sur le spectre), ainsi que la durée totale du cri (Figure 2.13). Dans les séries sélectionnées, la durée totale et le nombre de cris ont été mesurés sur des spectrogrammes de taille adaptée et uniquement quand cela était possible. Finalement, dans une même série, nous avons fait l'hypothèse que les cris étaient émis par la même baleine et que la position de cette baleine par rapport aux hydrophones était considérée comme constante au cours de la série. Par conséquent, pour chaque série de cris, la moyenne totale (\pm écart-type) des caractéristiques a été calculée.

Pour les autres signatures acoustiques présentes moins fréquemment dans les enregistrements, afin de les associer plus facilement à l'espèce source par comparaison avec la littérature, j'ai effectué des mesures sur la durée et sur les fréquences initiales et finales d'une dizaine de cris, directement sur des spectrogrammes aux paramètres adaptés pour visualiser au mieux le signal.

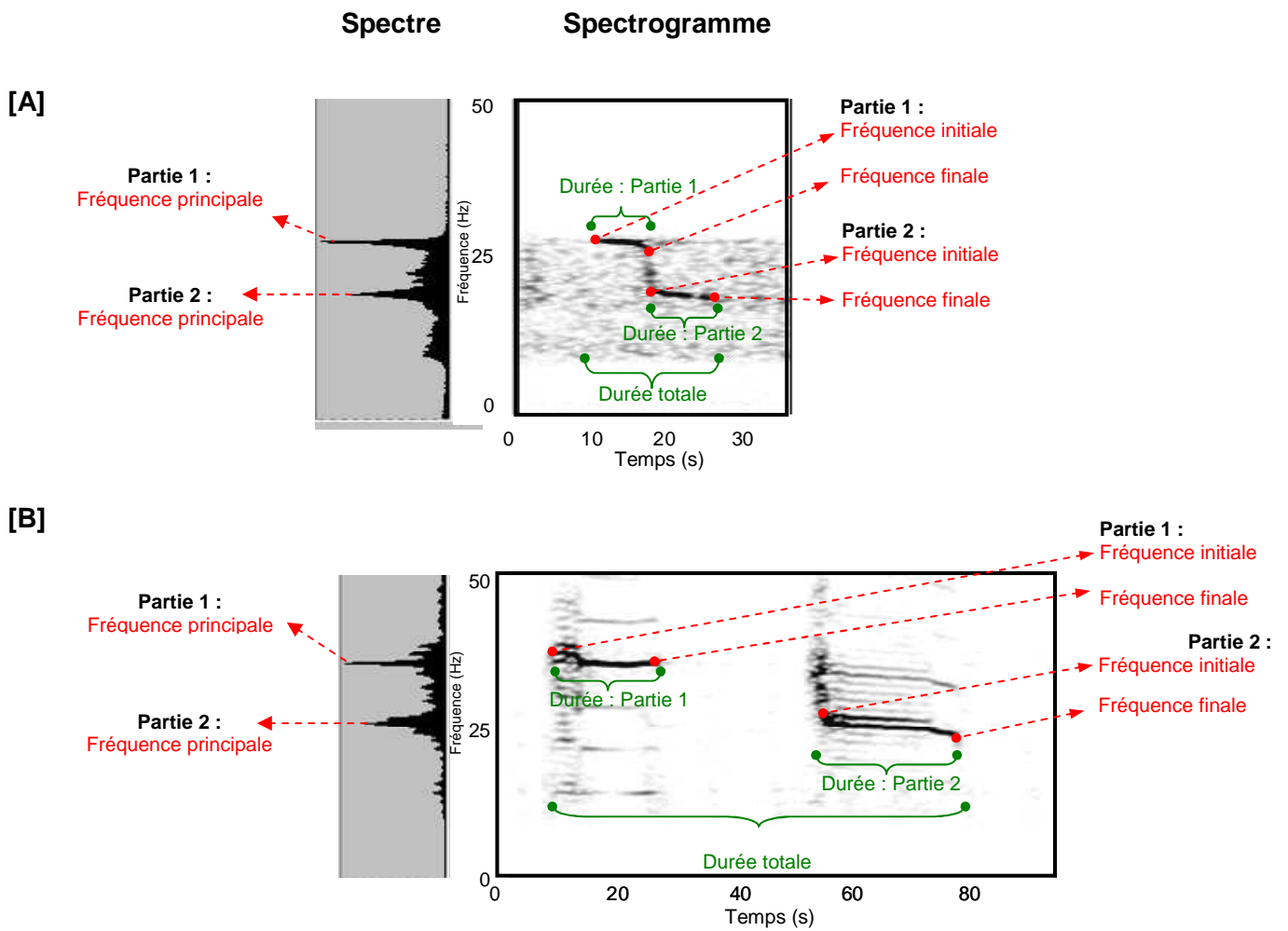


Figure 2.13 : Spectres et spectrogrammes des signatures acoustiques de baleine bleue Antarctique [A] et pygmée [B] et principaux points de mesures effectués (FFT de 1024 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming).

PARTIE 3 :

DETECTION AUTOMATIQUE : BORIE

Dans cette troisième partie du chapitre, je décris les méthodes utilisées pour répondre à la seconde question de ce travail de thèse « **QUAND LES ESPECES DE GRANDES BALEINES PRECEDEMMENT RECONNUES PAR LEURS SIGNATURES VOCALES SONT PRESENTES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL?** ». Pour cela, j'ai fait le choix de créer un détecteur automatique spécifique parfaitement adapté aux signatures acoustiques des deux sous-espèces de baleines bleues enregistrées le plus fréquemment à la station hydroacoustique HA4.

3.1. Pourquoi un détecteur automatique ?

Les représentations temps-fréquence de tous les enregistrements ont montré que la base de données de la station hydroacoustique HA4 contenait un nombre important de signaux acoustiques biologiques identifiés comme des signatures vocales émis par des grandes baleines (Figure 1.11). Ces représentations visuelles de la base de données complète permettent de mettre en évidence les périodes de l'année où ces signaux sont présents. Nous avons d'ailleurs utilisé cette visualisation pour connaître la saisonnalité des espèces dont les signatures acoustiques ont été occasionnellement enregistrées à la station d'écoute. Pour être plus précis dans le contenu des enregistrements, il est possible de visualiser chaque heure d'enregistrements afin de rechercher si les signatures acoustiques reconnues sont présentes ou absentes des enregistrements traités (Thompson & Friedl 1982, Stafford et al 2001, Nieukirk et al 2004). La taille de la base de données (plus de 30 000 heures d'enregistrements) rendait difficile l'utilisation de cette méthode qui, de plus, manque d'objectivité car elle est soumise à l'appréciation de l'utilisateur. A cela s'ajoute que cette méthode ne prend pas en compte le nombre de fois où la vocalisation est présente dans l'enregistrement traité. Or, connaître le plus justement possible le nombre de cris enregistrés est une information primordiale pour exploiter au mieux et extraire un maximum d'informations de ce genre de base de données issue d'observatoire acoustique à long terme. Il est également nécessaire d'utiliser un critère mathématique pour établir une méthode indépendante de l'utilisateur (voire indépendante de la base de données).

A la station hydroacoustique HA4, les signaux les plus fréquemment enregistrés sont les signatures acoustiques émis par les baleines bleues Antarctique et pygmée. Or, dans la littérature, les auteurs soulignent que ces signaux acoustiques ont une structure stable et présentent très peu de variations (Rankin et al 2005, McDonald et al 2006). La visualisation de quelques centaines de ces cris a confirmé largement cette particularité. Cette caractéristique rend alors favorable l'utilisation d'un détecteur automatique basé sur un filtre adapté pour compter les signatures acoustiques des deux sous-espèces enregistrées. Généralement, le principe de ce genre de détecteur est le suivant : un cri considéré comme référent ou typique (le *template*) est isolé du reste de l'enregistrement et son spectrogramme est calculé. Par la suite, des cris similaires présents dans le reste de l'enregistrement sont recherchés via une corrélation de spectrogrammes. La détection ce fait alors si le seuil de corrélation fixé manuellement est dépassé ou non (Ishmael 1.0 - Mellinger & Clark 2000, Mellinger 2001 et Avisoft-SASALab Pro 4.39).

J'ai testé cette approche sur un extrait de notre base de données et j'ai été confrontée à plusieurs difficultés. Premièrement, il fallait faire le choix du cri ou des cris référents. Deux approches étaient possibles : le recours au cri le plus distinct de l'enregistrement (celui qui est complet et présente le meilleur RSB par exemple) ou sélectionner un cri par heure (pour chaque enregistrement traité). Or, pour s'affranchir des caractéristiques intrinsèques de la base de données, nous avons opté pour la synthèse de notre propre cri référent. Deuxièmement, le temps d'exécution du processus a été un critère particulièrement important pour notre analyse. Avec la méthode basée sur l'intercorrélation de spectrogrammes, ce temps de calcul était rédhibitoire pour une analyse de la base de données complète (c'est-à-dire sur les 5 hydrophones disponibles) à la résolution choisie.

Dans ce contexte, un détecteur automatique spécifique a été créé au cours de cette thèse, afin d'isoler et de compter le nombre de signatures acoustiques des deux sous-espèces de baleines bleues présentes dans tous les enregistrements disponibles de la station hydroacoustique HA4. Ce détecteur, nommé **bORie** (pour **BMb** or/ou **BMi**), a été construit et adapté selon différentes contraintes et exigences telles que la forme des signatures acoustiques des baleines, le format des données, la robustesse aux variations du RSB et la rapidité d'exécution.

3.2. Description de la méthode retenue

Le principe et la méthode de construction du détecteur développé dans ce travail de thèse a fait l'objet d'un article paru dans *Canadian Acoustics* et qui se trouve en annexe 1 de ce manuscrit. Par conséquent, dans cette partie des méthodes, je ne ferai qu'une description simplifiée de son principe en faisant référence à cet article. Le détecteur a été créé sous l'environnement MATLAB.

3.2.1. Création des templates

Pour détecter les cris identifiés et décrits précédemment, le détecteur bORie effectue une corrélation croisée entre un cri de baleine « artificiel » (i.e. le cri référent que nous appellerons **template**) et le signal enregistré ; cette corrélation se fait sur les signaux temporels (1D), il ne s'agit pas d'une corrélation de spectrogrammes (2D). Le premier travail a donc été de construire un template pour chaque cri de baleines bleues (BMi et BMb) et pour les signaux incomplets correspondants (BMie et BMbe). La figure 2.14 [A] décrit l'algorithme de définition d'un template ; la même approche a été utilisée pour les 4 signaux. Premièrement, avant de décimer par 2 le signal enregistré, des filtres Butterworth d'ordre 12 passe-haut et passe-bas ont été appliqués successivement sur le signal d'origine (à 17 et 30 Hz pour les BMi et à 13 et 50 Hz pour les BMb). Puis, une première détection basée sur l'énergie du signal a été appliquée pour extraire de l'enregistrement les signaux de fortes intensités. Ces signaux ont été moyennés et synchronisés pour définir le template. Enfin le signal a été modélisé en utilisant des courbes gaussiennes dont les équations mathématiques ont été définies (cf. § 2.2. article annexe 1).

3.2.2. Corrélation croisée et choix du seuil

Une fois les templates définis, la détection se fait par **corrélation croisée** sur les deux signaux temporels que sont le template et le signal enregistré (Figure 2.14 [B]). Avant de faire cette corrélation, deux filtres Butterworth d'ordre 12 passe-haut et passe-bas ont été appliqués successivement sur le signal original (à 17 et 30 Hz pour les BMi et à 13 et 50 Hz pour les BMb) avant d'être décimé par 2.

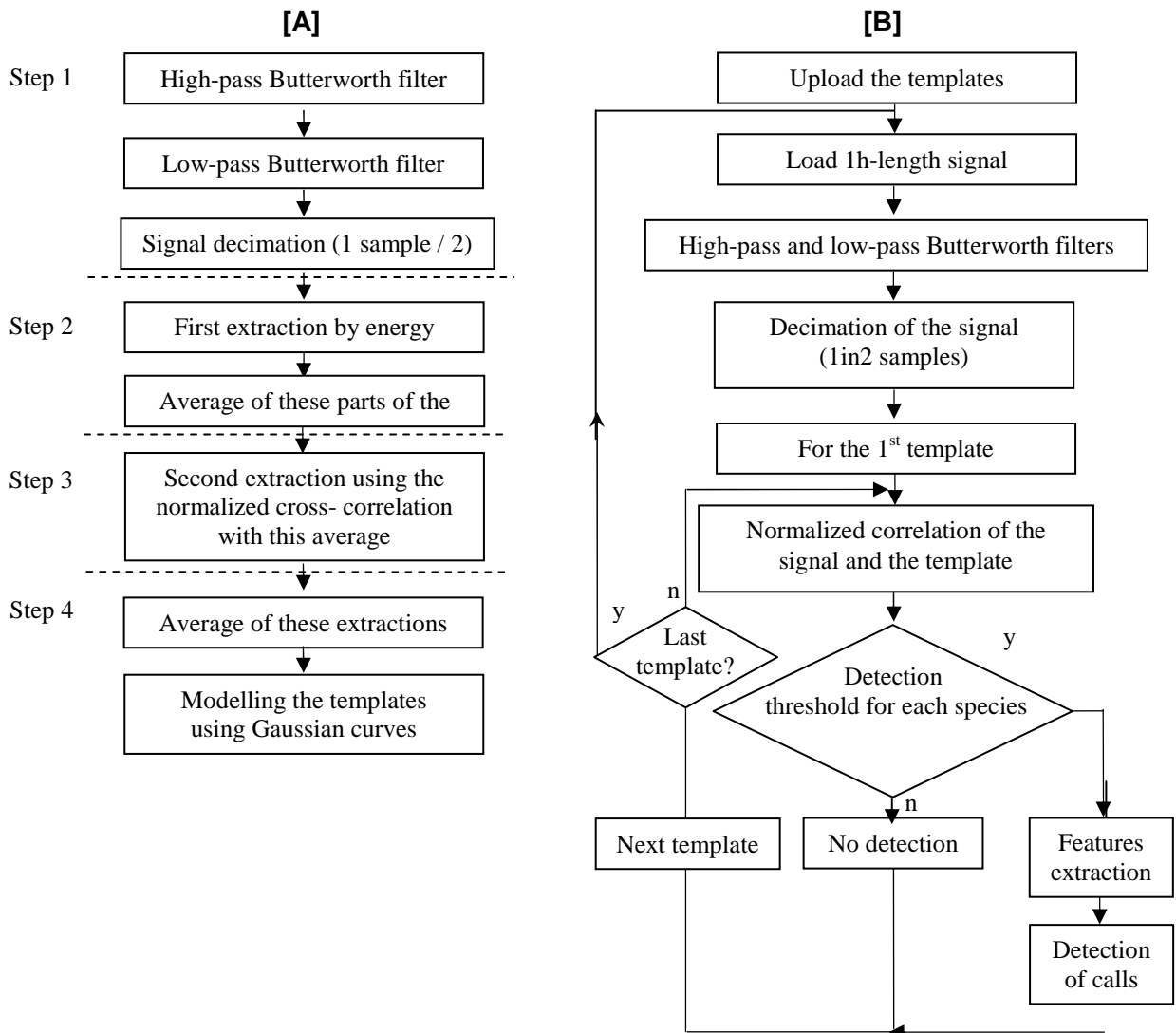


Figure 2.14 : bORie : [A] Algorithme de définition du template. Etape 1 : conditionnement du signal enregistré, étape 2 : recherche des caractéristiques communes dans tout le signal, étape 3 : synchronisation, étape 4 : construction du template avec un modèle Gaussien. **[B] : Algorithme de la méthode de détection automatique.** Extrait de Samaran et al 2008, annexe 1.

Le **seuil de détection** appliqué sur les coefficients de corrélation obtenus a été choisi empiriquement. Ce choix est très important car il conditionne les performances du détecteur. Nous avons le choix d'appliquer un seuil adaptatif, dépendant par exemple du niveau de bruit ambiant. Cependant, nous avons préalablement testé la robustesse du détecteur avec différents seuils de corrélation en fonction du RSB. Pour cela, nous avons utilisé des signaux simulés, constitués de plusieurs templates noyés dans un bruit blanc gaussien. Nous avons fait varier le RSB entre -25 et 25 dB en supposant que, dans cette étude, les cris de baleines peuvent être émis très loin ou très proche des hydrophones. Nos tests ont été réalisés avec les 4 templates (cf. § 3.1. article annexe 1). Pour chaque cri, des seuils relativement élevés ont été finalement choisis pour minimiser les fausses détections. Cette étude a permis de mettre en évidence la robustesse du

détecteur par rapport au bruit ambiant. Enfin, un dernier point non négligeable sur ce détecteur est sa rapidité. Puisqu'il opère dans le domaine temporel, le temps d'exécution est particulièrement court, comparé au domaine spectral qui nécessite beaucoup de temps pour générer les spectrogrammes.

3.3. Extraction de caractéristiques

Un point intéressant dans la création d'un détecteur automatique adapté entièrement à une base de données, c'est qu'il peut fournir une quantité d'autres informations sur la partie du signal qu'il détecte et ce, de manière automatique. Au cours de ce travail de thèse, le détecteur bORie a été sans cesse amélioré dans ce sens au fur et à mesure des besoins.

Pour chaque enregistrement d'une heure, le détecteur identifie les cris complets et incomplets des deux sous-espèces de baleines bleues. A cela s'ajoute que, pour chaque cri détecté, plusieurs renseignements sont extraits et consignés dans un fichier exploitable à posteriori. Ces renseignements sont :

- La date et l'instant t à laquelle le cri a été détecté dans l'enregistrement étudié ; avec cette information, il est alors possible de calculer pour chaque cri l'intervalle inter-cris (IC) et l'intervalle inter-séries (cf. § 2.2. de ce chapitre) ;
- Le coefficient de corrélation entre le cri détecté et le template utilisé ;
- La puissance acoustique du cri complet ainsi que celle des différentes unités qui le compose (cf. § 3.5. de ce chapitre) ;
- Le nombre de cris détectés dans l'heure d'enregistrement étudié.

Pour chaque cri détecté, bORie extrait également un spectrogramme (ou *imagerie*) qui permet de vérifier l'exactitude de la détection et qui sera utilisé pour effectuer les mesures des caractéristiques des cris (cf. § 2.3. de ce chapitre). Enfin, pour chaque enregistrement d'une heure traité, bORie calcule également le niveau de pression acoustique du bruit ambiant dans deux bandes fréquentielles (cf. § 1.3. de ce chapitre). Ces éléments constituent une aide précieuse aux choix des cris et des séries utilisés dans cette thèse.

3.4. Nombre de cris détectés

Le détecteur automatique permet de repérer et compter le nombre de cris de BMi, BMie, BMb et BMbe présents dans tous les enregistrements disponibles sur les 5 hydrophones de la station HA4. Par mois, le nombre total de cri détectés, le nombre moyen de cris détectés par heure d'enregistrements disponibles pour le mois considéré (Tableau 2.3) et la proportion d'heures d'enregistrements contenant des cris (au minimum 5) ont été calculés. Ceci permet alors de mettre en évidence les variations saisonnières dans le nombre de cris détectés témoignant de la présence/absence des baleines sur une année. Un test de *Kolmogorov-Smirnov* a été utilisé sur les données standardisées pour tester la différence dans le nombre et la distribution mensuelle des cris détectés sur les hydrophones d'un même réseau et sur les hydrophones des réseaux nord et sud. Ce travail nous a permis d'évaluer la pertinence de poursuivre les analyses sur tous les hydrophones d'un même réseau. Pour apprécier la répartition des cris au cours du temps et mettre en évidence des variations journalières et mensuelles dans la détection, une représentation graphique du nombre de cris de BMi et de BMb détectés par jour a été réalisée

Le détecteur nous renseigne sur le nombre de cris présents pour une heure d'enregistrement, mais on ne peut actuellement pas certifier le nombre de baleines présentes à partir du nombre de cris détectés (Mellinger et al 2007). Cependant, nous allons utiliser les informations sur la structure des séries de cris pour faire quelques hypothèses. En effet, nous savons que les deux sous-espèces de baleines bleues que nous étudions émettent des signaux acoustiques de façon régulière avec une durée et des intervalles inter-cris peu variables. Il est alors possible de déterminer, sur une heure d'enregistrement, le nombre maximal de cris qui pourrait être émis par un seul individu. Si le nombre de cris détectés dans une heure d'enregistrement dépasse ce nombre maximal alors on peut faire l'hypothèse que, au minimum, deux individus acoustiquement actifs sont enregistrés donc présents en même temps.

3.5. Calcul de l'intensité reçue des cris détectés.

Lorsqu'une signature acoustique de baleine (BMi, BMie, BMb et BMbe) est détectée, nous calculons le niveau de pression acoustique de ce cri (ou Intensité Reçue IR) à l'hydrophone en utilisant la formule suivante :

$$IR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \right) \quad (3.1)$$

Où T est de la fenêtre d'analyse sur laquelle l'intensité acoustique est calculée.

Nous avons vu, dans la description des signatures acoustiques spécifiques des baleines bleues Antarctique et pygmées, que les cris peuvent être décomposés en deux parties (cf. § 2.2 de ce chapitre). Dans notre approche, nous avons calculé l' IR des cris sur la longueur totale du cri (IR_{Tout}) puis sur la première partie du cri (IR_{Part1}) et sur la deuxième partie du cri (IR_{Part2}). Pour mettre en évidence les variations saisonnières des intensités reçues des cris, les intensités reçues moyennes mensuelles ont été calculées pour chaque partie du cri et pour le cri complet pour tous les signaux acoustiques de BMi et de BMb détectés sur les 5 hydrophones. Un test de *Student* a été effectué pour tester la différence des intensités moyennes mensuelles reçues entre les hydrophones d'un même réseau et entre les hydrophones du réseau nord et du réseau sud. Enfin, la distribution fréquentielle des intensités reçues a été extraite mois par mois.

PARTIE 4 :

LA LOCALISATION

Dans cette quatrième et dernière partie de ce chapitre, je décris les méthodes utilisées pour répondre à la troisième question de ce travail de thèse « **OU LES ESPECES DE GRANDES BALEINES SONT-ELLES LOCALISEES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL ?** ». Pour apporter des éléments de réponse à cette question, je me suis intéressée à la localisation des baleines considérées en prenant en compte les caractéristiques de la station hydroacoustique, du milieu environnant et de la qualité des enregistrements. Certains de ces principes ont été intégrés dans le détecteur bORie pour automatiser au maximum le processus.

4.1. Présentation des méthodes utilisées et contraintes de la station hydroacoustique HA4

Pour estimer la distance des animaux aux hydrophones, j'ai utilisé deux méthodes complémentaires de localisation. La première méthode est basée sur **la triangulation** ; on calcule la position d'une source émettrice à partir des réceptions de mêmes signaux acoustiques relevés sur plusieurs hydrophones. Cela consiste à mesurer la différence dans le temps d'arrivée (*Time Diffence Of Arrival* – TDOA) d'un même signal reçu sur un couple d'hydrophones afin de déterminer une courbe hyperbolique sur laquelle se positionne la source émettrice. Une analyse similaire réalisée entre différents couples d'hydrophones d'un même réseau (composé au minimum de 3 hydrophones) permet de déterminer une deuxième puis une troisième hyperbole. L'intersection de ces deux ou trois hyperboles permet de déterminer la position en 2 dimensions de la source. Cette technique a déjà été utilisée pour localiser des cétacés par leurs signaux acoustiques, en particulier la baleine bleue (Cato 1998, Stafford et al 1998, Širović et al 2007). Dans ce travail de thèse, j'ai adapté et mis en oeuvre cette méthode. Toutefois, la station hydroacoustique que nous utilisons et les deux réseaux qui la composent présentent plusieurs contraintes limitant son utilisation. Premièrement, pour le réseau nord, seuls 2 hydrophones ont été opérationnels ; or, comme indiqué précédemment, pour localiser avec cette méthode, il est nécessaire d'avoir au minimum 3 hydrophones. Par conséquent, on ne pourra pas effectuer de

localisations précises par croisements hyperboliques pour ce réseau puisque une seule et unique hyperbole pourra être calculée. Toutefois, on pourra se servir de cette information pour estimer la direction de provenance des cris détectés. Pour le réseau sud, les 3 hydrophones ont été opérationnels de mai 2003 à décembre 2003 mais le bruit ambiant est très important. Par conséquent, il sera possible d'effectuer des localisations par cette méthode uniquement durant les plages de temps où la qualité des signaux est correcte sur les 3 hydrophones du réseau. Enfin, précisons que la station HA4 est composée de 2 réseaux configurés au départ pour qu'ils n'enregistrent pas les mêmes zones. Par conséquent, la zone de recouvrement entre les 2 réseaux existe mais elle est très étroite (nord-est du réseau sud et sud-est du réseau nord). Si une baleine est acoustiquement active dans cette zone, alors ses signatures acoustiques devraient être enregistrées sur les réseaux nord et sud et il sera alors possible de tenter de localiser l'animal en utilisant les 5 hydrophones.

La seconde méthode de localisation appliquée dans le cadre de notre étude utilise la valeur de l'intensité du signal reçue aux hydrophones (Cato 1998). Le principe est le suivant : connaissant l'intensité du signal reçu aux hydrophones ainsi que l'intensité du signal à la source il est possible de déduire **la distance** à laquelle se situe l'animal en étudiant **les pertes par transmission**. Cette technique ne détermine pas une position de la source émettrice mais renseigne sur la distance théorique à laquelle elle se situe par rapport aux récepteurs (Stafford et al 2007). Pour évaluer les pertes par transmission et en déduire la distance, il est nécessaire d'utiliser un modèle de propagation du son qui soit parfaitement adapté à l'environnement.

4.2. Méthode de triangulation (ou méthode hyperbolique)

Cette partie décrit la première méthode de localisation définie précédemment dans un cadre théorique puis dans un cadre pratique avec son application et son adaptation aux données de la station hydroacoustique HA4.

4.2.1. Cadre théorique

La première étape de cette méthode consiste à déduire **un angle de direction** de la source émettrice d'un signal à partir de la différence dans le temps d'arrivée de ce signal sur deux hydrophones différents.

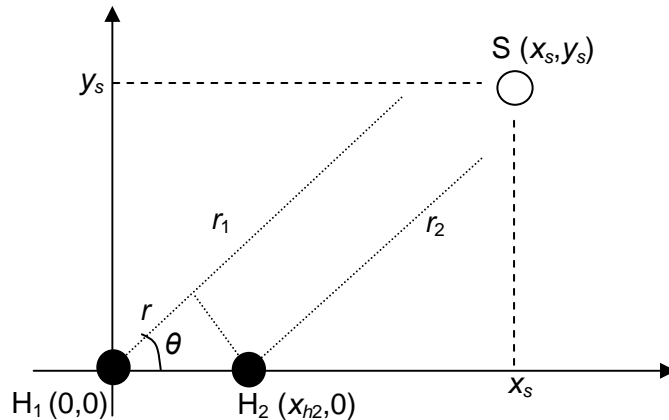


Figure 2.15 : Calcul de l'angle de direction θ de la source S sur un réseau composé de 2 hydrophones H_1 et H_2 .

Lorsque la distance entre la source sonore S (dans notre cas la baleine) et un couple d'hydrophones (H_1 et H_2) est plus grande que la distance entre les hydrophones (Figure 2.15), on peut faire le calcul simplifié suivant :

$$\cos \theta = \frac{r}{d_{12}} \quad (4.1)$$

Où d_{12} correspond à la distance entre les hydrophones 1 et 2 (ici $d_{12} = x_{h2}$) ;

r est la différence entre r_1 et r_2 .

A la célérité c , on a :

$$c = \frac{r}{\tau_{12}} \quad (4.2)$$

Où τ_{12} est la différence dans les temps d'arrivée du signal à l'hydrophone H_1 et à l'hydrophone H_2 ou délai.

On peut alors écrire :

$$\cos \theta = \frac{c \tau_{12}}{d_{12}} \quad (4.3)$$

Ainsi, l'angle indiquant la direction de la source par rapport à l'axe des hydrophones s'écrit :

$$\theta = \arccos\left(\frac{c \tau_{12}}{d_{12}}\right) \quad (4.4)$$

Remarque 1

Comme nous travaillons avec un couple d'hydrophone, il y a symétrie par rotation autour de l'axe des 2 hydrophones. C'est-à-dire que la source peut se trouver sur un cercle dont le centre est situé sur l'axe formé par les 2 hydrophones (Figure 2.16).

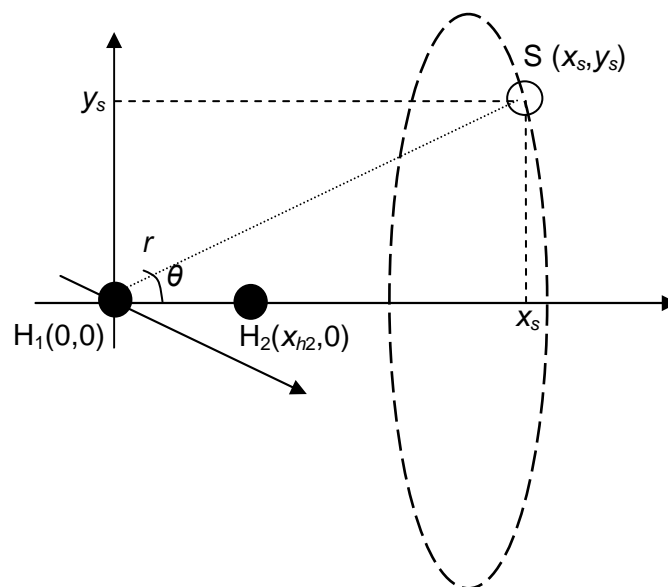


Figure 2.16 : Symétrie par rotation autour de l'axe des 2 hydrophones pour le calcul de l'angle de direction de la source S sur un réseau composé d'un couple d'hydrophones.

Dans ce contexte, nous pouvons obtenir 2 situations particulières (figure 2.17).

- La position de la source est sur l'axe des hydrophones :

Dans ce cas le délai τ_{12} est maximum. Avec le choix des notations pris, le temps sera négatif ($\tau_{12} = t_1 - t_2 = -\frac{d_{12}}{c}$) lorsque la source est du côté du premier hydrophone et positif

($\tau_{12} = \frac{d_{12}}{c}$) dans l'autre cas.

- La position de la source est perpendiculaire à l'axe des hydrophones :

Dans ce cas, en faisant l'hypothèse que la propagation est uniforme de part et d'autre des hydrophones, les temps d'arrivée sur les 2 hydrophones sont égaux. On a donc : $\tau_{12} = 0$.

L'angle est alors $\theta = \arccos(0) = 90^\circ$.

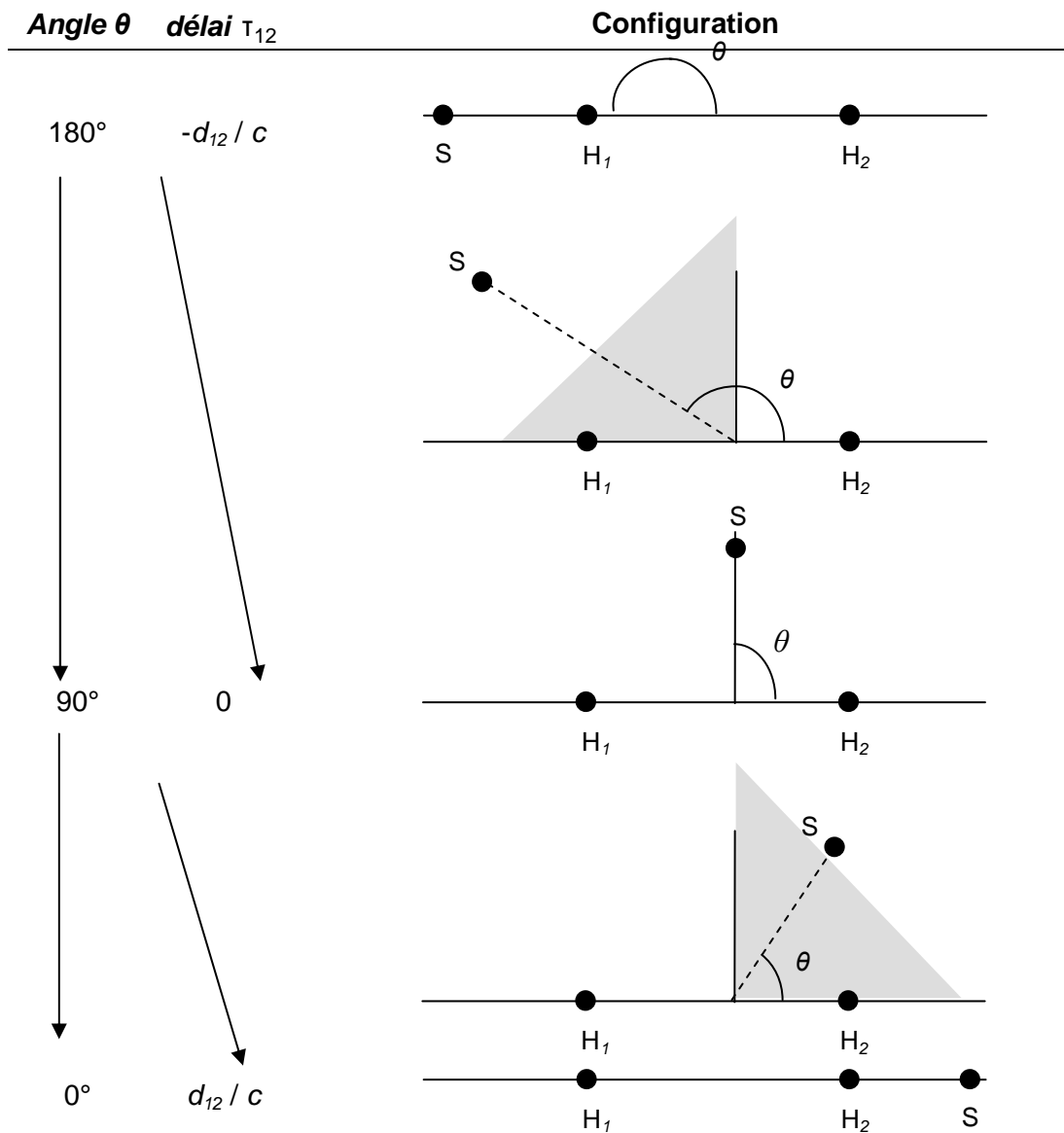


Figure 2.17 : Angle selon la position de la source sonore par rapport à un réseau composé d'un couple d'hydrophones

Remarque 2

On considère la figure 2.18 suivante :

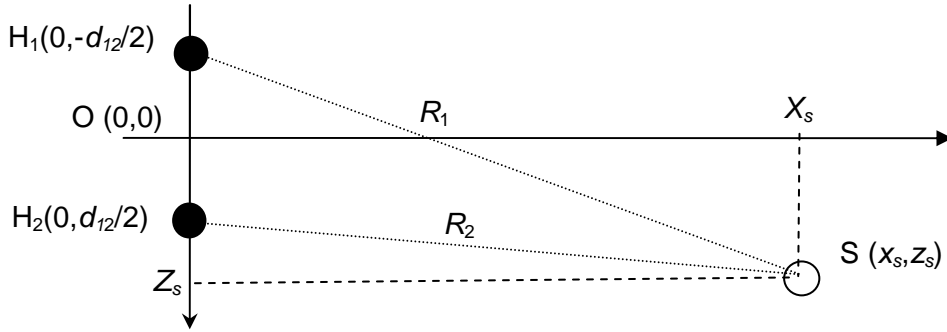


Figure 2.18 : Localisation de la source sonore S par rapport à un réseau composé d'un couple d'hydrophones H_1 et H_2 .

D'après l'explication précédente, on peut écrire que :

$$R_1 = c_0 \tau_{s1} = c_0 (\tau_1 - \tau_s) \quad (4.5)$$

$$R_2 = c_0 \tau_{s2} = c_0 (\tau_2 - \tau_s) \quad (4.6)$$

$$R_2 - R_1 = c_0 \tau_{s2} - c_0 \tau_{s1} = c_0 (\tau_2 - \tau_s) - c_0 (\tau_1 - \tau_s) = c_0 (\tau_2 - \tau_1) = c_0 \tau_{12} \quad (4.7)$$

Dans ce cas, lorsque $R_2 = R_1$, c'est-à-dire que la source est sur le plan médian aux 2 hydrophones, $R_2 - R_1 = 0$ et $\tau_{12} = 0$. Si par contre, $\tau_{12} > 0$, alors cela signifie que $R_2 > R_1$ et la source est dans le demi-plan de H_1 . Inversement, si $\tau_{12} < 0$ et donc $R_1 > R_2$, la source est dans le demi-plan de H_2 . En tenant compte des notations, c'est-à-dire en prenant le repère centré entre les 2 hydrophones, on peut écrire le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} c_0 \tau_{12} = R_2 - R_1 \\ R_1^2 = x_s^2 + \left(z_s + \frac{d_{12}}{2} \right)^2 \\ R_2^2 = x_s^2 + \left(z_s - \frac{d_{12}}{2} \right)^2 \end{cases} \quad (4.8)$$

Dont les 2 solutions sont les suivantes:

$$\frac{x_s^2}{\left((c_0 \tau_{12})^2 - d_{12}^2 \right)} + \frac{z_s^2}{(c_0 \tau_{12})^2} = 1 \quad (4.9)$$

On a donc une expression de la forme :

$$\frac{z_s^2}{a_{12}^2} - \frac{x_s^2}{b_{12}^2} = 1 \tag{4.10}$$

avec $a_{12}^2 = \left(\frac{c_0 \tau_{12}}{2}\right)^2$ et $b_{12}^2 = \frac{d_{12}^2 - (c_0 \tau_{12})^2}{4}$

On notera que $d_{12}^2 - (c_0 \tau_{12})^2 > 0$, soit $d_{12} > |c_0 \tau_{12}|$

Il s'agit de l'équation d'une **hyperbole** ayant comme centre, le milieu de $[H_1, H_2]$ (le centre de notre repère), comme axe, l'axe formé par les 2 hydrophones et comme excentricité :

$$e_{12} = \frac{d_{12}}{c_0 |\tau_{12}|} \tag{4.11}$$

Car on a toujours $c_0 > 0$ et $d_{12} > 0$ (voir les notations dans le repère).

Pour $\tau_{12} < 0$, la source est située sur la branche de l'hyperbole du côté de H_2 et pour $\tau_{12} > 0$, du côté de H_1 (figure 2.19). Enfin, si on a plusieurs hydrophones, on peut tracer plusieurs hyperboles et la source sera située à leur intersection.

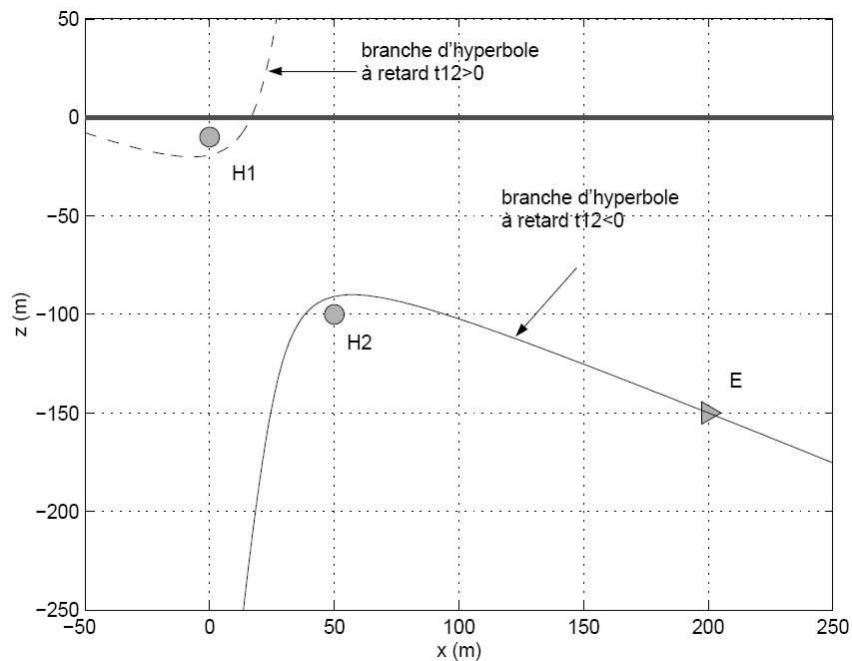


Figure 2.19 : Localisation par la mesure d'un retard. L'ensemble des solutions est une hyperbole de foyers les 2 hydrophones. Ici, avec $\tau_{12} < 0$ (D'après Laplanche 2005)

4.2.2. Application à la configuration des hydrophones

La différence dans le temps d'arrivée d'un même signal (ou **délai**) sur deux hydrophones différents permet donc de déterminer **les deux angles de l'hyperbole** que nous utiliserons par la suite pour localiser la source sonore. Dans cette partie, nous allons calculer la durée maximale que peut prendre ce délai pour chaque couple d'hydrophones possibles d'après la configuration de la station hydroacoustique HA4. Mais avant cela, nous allons étudier les différents termes que compose l'équation du calcul de l'angle afin de regarder s'ils peuvent influencer notre estimation. Nous avons vu, dans le paragraphe précédent, que le calcul de l'angle se faisait selon l'équation (4.4). D'après cette équation, l'estimation de l'angle dépend de la distance entre les hydrophones, de la valeur de célérité choisie et de la mesure temporelle du délai sur les enregistrements. Ici, nous allons vérifier comment ces facteurs influencent l'estimation de l'angle.

4.2.2.1. Incertitude sur la valeur de la distance entre les hydrophones

Elle est liée à l'incertitude sur la position des hydrophones. Dans les documents fournis par le CEA sur la construction de la station hydroacoustique HA4, il est remarqué que la position des hydrophones est considérée comme fixe, mais que, compte tenu des courants, l'incertitude sur la position se situe dans un cercle de 30m de rayon (Ruzié 1998). Dans ce cas, l'incertitude sur la distance entre 2 hydrophones pourrait être égale au maximum à 60m, même si cette hypothèse est peu probable du fait qu'il n'a pas été reporté de courants contradictoires au niveau des hydrophones de chaque réseau. Le tableau 2.3 résume les angles obtenus pour des délais τ_{12} différents en considérant la valeur maximale de cette incertitude (+60 m).

Tableau 2.3 : Angles θ obtenus d'après l'équation du calcul de l'angle (4.4) où $d_{12} = 2,06 + 0,06\text{km}$ (cas du couple N2 N3), $c = 1.48\text{km/s}$ et τ_{12} est variable.

τ_{12} (en seconde)	$\Delta\theta$ (en °)
0,1	0,12
0,5	0,63
1	1,66
1,1	2,05
1,35	5,52
1,3904	13

Finalement, l'incertitude due à la position des hydrophones sur l'angle a surtout un impact lorsque le délai est proche du retard maximum ($\tau_{12}=1,3904$), c'est-à-dire lorsque la source est alignée sur l'axe des hydrophones.

4.2.2.2. Incertitude sur la célérité

Dans l'équation du calcul de l'angle, nous utilisons une valeur de célérité de 1,48 km/s. Cette valeur est correcte pour l'ensemble de l'année dans notre zone d'étude. Cependant, nous avons considéré l'impact éventuel de cette valeur sur le calcul de l'angle. Les résultats obtenus en considérant 2 valeurs de délais différentes (une valeur moyenne $\tau = 0,5$ s et la valeur maximale $\tau = 1,3904$ s) sont résumés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Angles θ obtenus d'après l'équation du calcul de l'angle (4.4) où $d_{12} = 2,06$ km (cas du couple N2 N3), $\tau_{12} = 0,5$ s ou 1,3904s et c est variable.

c (km/s)	$\tau = 0,5$ s	$\tau = 1,3904$ s
	θ (en °)	θ (en °)
1,40	70,1	18,9
1,43	69,8	14,9
1,45	69,8	11,6
1,46	69,2	9,4
1,48	68,9	0,4

Encore une fois, l'incertitude sur la célérité a surtout un impact lorsque le délai est proche du retard maximum.

4.2.2.3. Incertitude sur la précision de la mesure temporelle

Enfin, pour calculer le délai, nous devons mesurer précisément l'instant d'arrivée d'un même signal sur les enregistrements de deux hydrophones différents et ce aux nombres d'échantillons près. La fréquence d'échantillonnage f_e est de 250 Hz et les signaux sont décimés par deux (par bORie, cf. § 3.2 de ce chapitre). Dans ce cas, l'écart temporel T_e entre 2 échantillons est de $1/125$ soit 0,008 s. Le tableau 2.5 met en évidence l'imprécision que cette résolution temporelle T_e , engendre sur l'angle. Dans ce cas, une erreur de 174 échantillons, soit 1,392 s dans la mesure du temps d'arrivée du signal entraînera une erreur de 90° sur l'angle.

Tableau 2.5 : Angles θ obtenus d'après l'équation du calcul de l'angle (4.4) où $d_{12} = 2,06\text{km}$ (cas du couple N2 N3), $c = 1.48\text{km/s}$ et T_e , l'écart entre 2 échantillons, est variable.

$\Delta\text{Nb échantillons}$	Δt (en seconde)	$\Delta\theta$ (en °)
1	0,008	0,3
2	0,016	0,6
5	0,04	1,6
10	0,08	3,3
20	0,16	6,7
50	0,4	16,5
100	0,8	32,9
200	1,6	65,9
500	4	164,8

La précision dans la mesure du temps d'arrivée du signal se fait à deux niveaux distincts : au moment de l'acquisition des données et au moment où la mesure est faite directement sur les enregistrements. Pour l'acquisition des données, d'après les renseignements du constructeur, la moyenne théorique dans la précision de la mesure de la datation des données de la station HA4 est de $0,7 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ (Bosca et al 2003). Dans ce cas, en prenant un échantillon sur deux, cela revient à avoir un écart temporel entre les échantillons retenus compris entre 7,2 et 8,8 ms. Cela se traduit sur l'angle par une erreur de $0,03^\circ$. On négligera cette influence dans la suite de ce document. En revanche, il faudra être extrêmement prudent quant à la mesure de l'instant du signal de baleine sur les enregistrements. Nous détaillerons plus loin dans cette partie les méthodes retenues.

4.2.2.4. Conclusion sur les incertitudes

Nous pouvons conclure que les incertitudes possibles sur la célérité et l'acquisition des données ont un impact négligeable sur le calcul du délai ou de l'angle. L'incertitude sur la position des hydrophones nous autorise à accepter des délais maximums un peu plus larges. Par conséquent, il est possible de calculer les délais théoriques et maximums (quand la source est alignée sur l'axe des hydrophones) d'après l'équation du calcul du délai $\tau_{12} = \frac{d_{12}}{c}$ pour chaque couple d'hydrophones des deux réseaux selon la configuration de la station hydroacoustique HA4 (Tableau 2.6). Cependant, les incertitudes sur les mesures temporelles entraînent de grandes variations dans les valeurs de délai et donc des angles. La partie suivante sera donc entièrement consacrée aux méthodes d'estimation de ces délais.

Tableau 2.6 : Estimation des délais théoriques et maximums pour chaque couple d'hydrophones des triplets nord et sud de la station hydroacoustique HA4.

	Distance (km)	Délai théorique (s)	Délai maximum (s)
N1 – N2	1,8384	1,2422	1,2844
N1 – N3	1,8494	1,2496	1,2919
N2 – N3	2,0578	1,3904	1,4329
S1 – S2	2,0479	1,3837	1,4262
S1 – S3	2,0772	1,4035	1,4460
S2 – S3	2,0851	1,4088	1,4513

4.2.3. Estimation des délais d'arrivée sur les hydrophones

Nous venons de voir que, de la précision de l'estimation du délai dépendait entièrement la précision de l'angle de la source. Or, en raison de la proximité des hydrophones dans chaque réseau, ce délai d'après le tableau 2.6 est particulièrement court par rapport à la longueur des signaux acoustiques de baleines bleues Antarctique et pygmées étudiés (durée totale d'un signal de Bmi ~18 s et durée totale d'un signal de Bmb ~70 s). La mesure de ce délai est donc une étape cruciale dans la localisation. Dans cette partie nous allons décrire comment nous avons choisi d'effectuer cette mesure et de quelle manière nous avons intégré le calcul de la différence dans le temps d'arrivée d'un signal au détecteur automatique.

Lorsque le détecteur automatique recherche des cris de BMi, BMie, BMB ou BMbe dans les enregistrements d'un hydrophone, il indique à quel **instant t** dans la série temporelle il a détecté ce cri (cf. § 3.3 de ce chapitre). A partir de là, pour calculer la différence dans le temps d'arrivée du cri sur les autres hydrophones, il est nécessaire de retrouver ce même cri et d'en estimer l'instant t dans les enregistrements des autres hydrophones. Nous avons testé deux méthodes pour effectuer cette association de cris sur les deux ou trois hydrophones selon le réseau considéré. Dans ces deux méthodes, le réseau sera divisé en plusieurs couples d'hydrophones, par exemple pour un réseau de 3 hydrophones H_1 , H_2 et H_3 , on travail avec les couples H_1H_2 , H_1H_3 et H_2H_3 .

4.2.3.1. Méthode 1

Le détecteur est utilisé pour détecter et localiser un cri (BMi, BMie, BMb ou BMbe) dans les enregistrements de l'hydrophone 1 (H_1) puis, séparément, dans les enregistrements de l'hydrophone (H_2). Ensuite, cri par cri, les résultats du détecteur sont analysés manuellement afin de retrouver le même cri détecté sur les deux hydrophones. Une fois l'association trouvée, la différence des instants t_{H1} et t_{H2} est calculée. Cette différence correspond au délai qui nous permettra de calculer les deux angles (Figure 2.20).

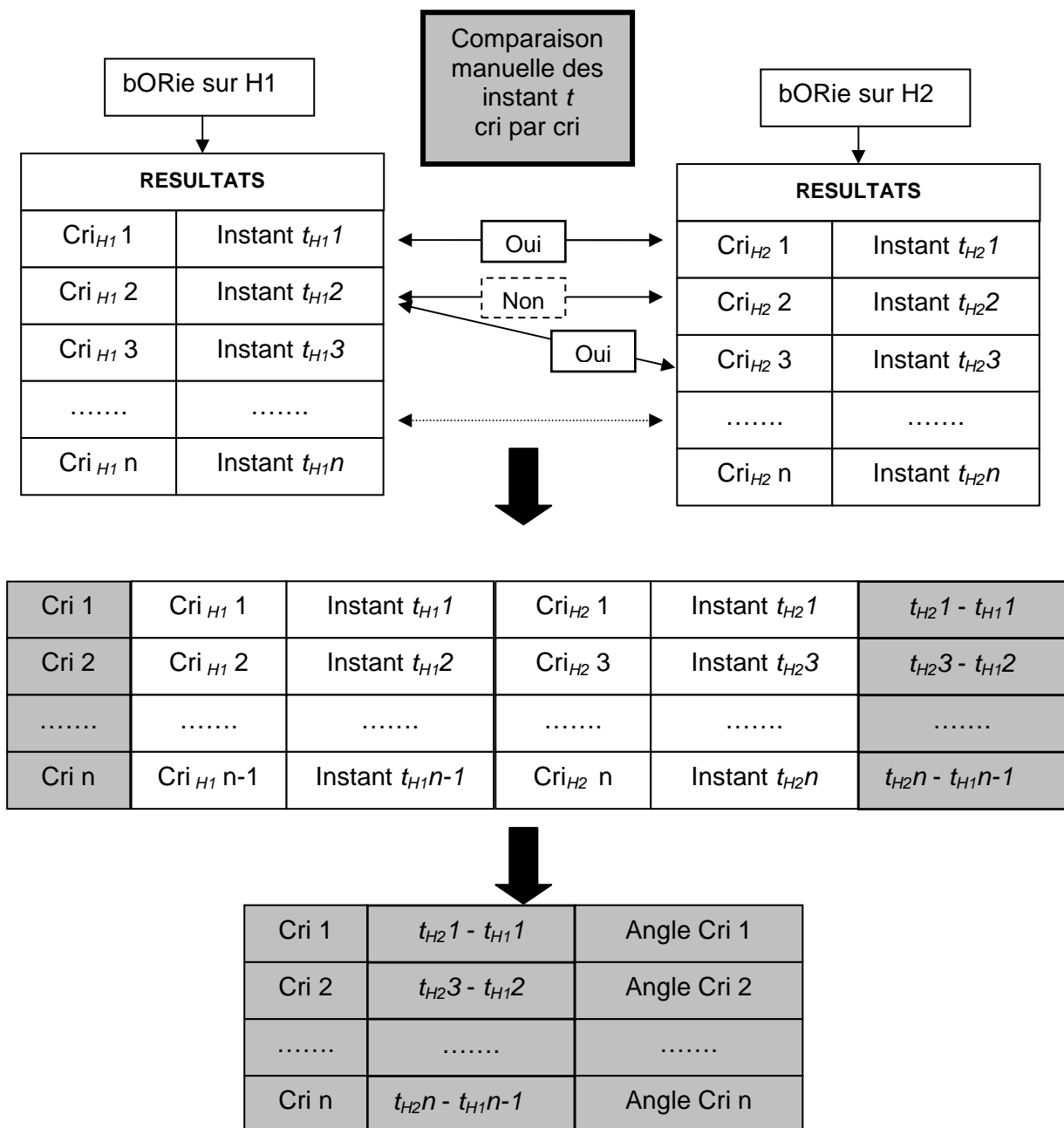


Figure 2.20 : Description du processus de la méthode 1 : analyse hydrophone par hydrophone et association.

4.2.3.2. Méthode 2

Le détecteur est utilisé pour détecter et localiser un cri sur les enregistrements de l'hydrophone 1 (H_1). Ensuite, le segment du signal détecté sur cet hydrophone est isolé en prenant une largeur de fenêtre définie pour chaque espèce (4096 points pour les BMi/ie et 16384 points pour les BMb/be). Le cri est centré dans cette fenêtre. La fenêtre équivalente est isolée sur l'hydrophone 2 (H_2): cet extrait a la même longueur que celle du signal détecté sur H_1 et est synchronisée. La longueur des deux fenêtres est doublée et l'intercorrélation entre le signal de ces deux fenêtres est calculée. La position du maximum de l'intercorrélation donne le délai de synchronisation donc le délai dans l'arrivée du cri sur les deux hydrophones. Nous avons testé cette méthode dans le domaine temporel et le domaine spectral (Figure 2.21).

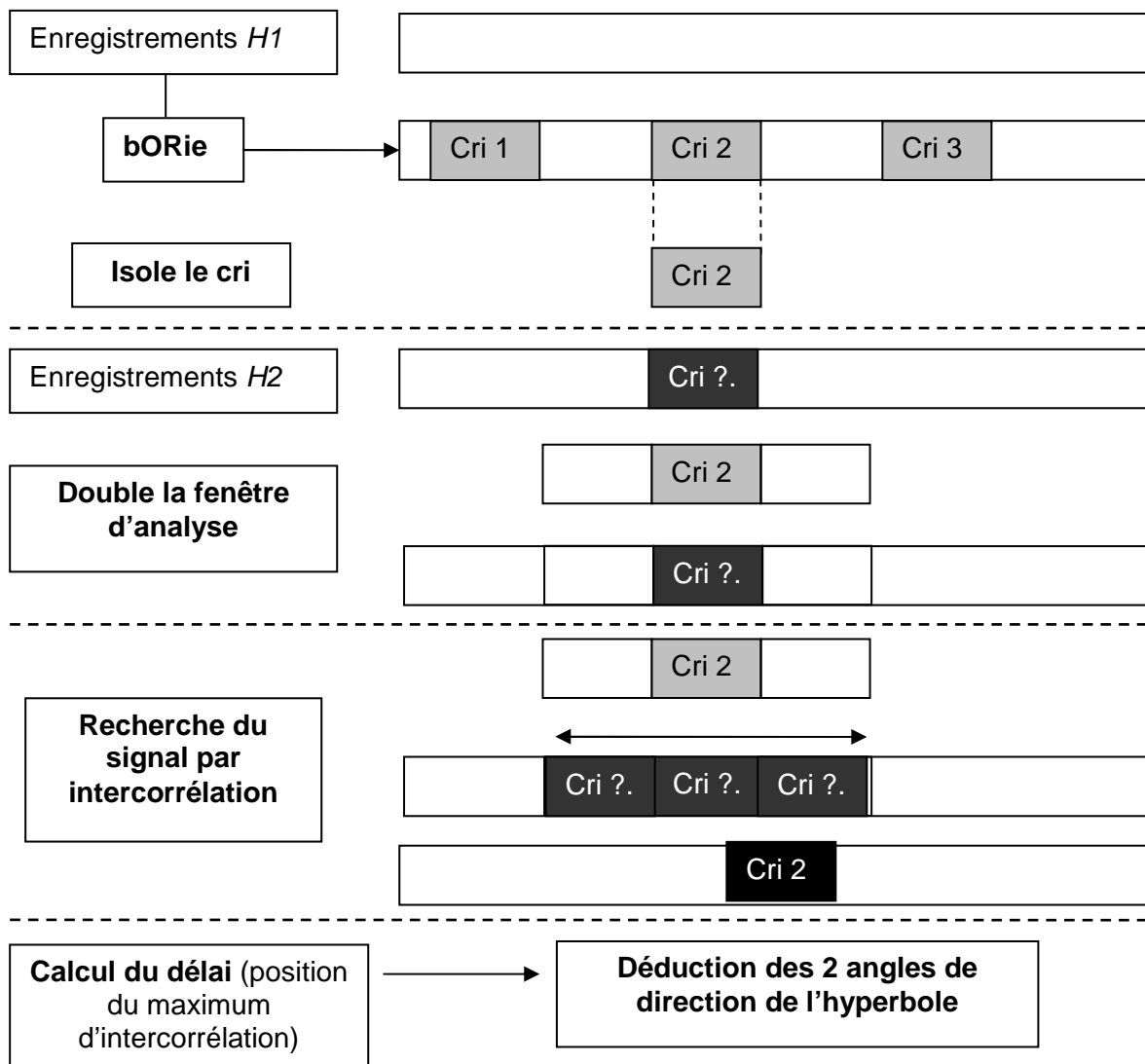


Figure 2.21 : Description du processus de la méthode 2 : analyse d'un hydrophone puis association sur les autres hydrophones et calcul par intercorrélation.

4.2.3.3. Comparaison, conclusion et mise en oeuvre

Nous avons comparé ces deux méthodes sur différents enregistrements comportant des signaux de BMi et de BMb avec un rapport signal-sur-bruit satisfaisant. Pour les 2 méthodes, les délais obtenus ont le même ordre de grandeur ; cependant les délais obtenus automatiquement par l'intercorrélation (méthode 2) présentent nettement moins de valeurs aberrantes (c'est-à-dire des valeurs au-delà du délai maximum possible pour le couple d'hydrophones étudié). De plus la méthode 2 étant automatique, elle présente un net avantage en terme de rapidité d'exécution. Pour cette raison, nous avons choisi d'utiliser la méthode 2 pour déterminer les angles de direction de la source du signal.

Dans cette méthode, c'est la fonction **d'intercorrélation** qui va permettre d'estimer le **délai**. En raison de l'importance de la précision de la valeur du délai pour le reste de l'analyse (calcul des angles et croisement des hyperboles), nous avons testé l'intercorrélation des signaux temporels (intercorrélation 1D) et l'intercorrélation des spectrogrammes (intercorrélation 2D). Nous avons donc regardé si la qualité des courbes d'intercorrélation obtenues était meilleure dans un cas que dans l'autre. Nous avons constaté que ceci dépendait fortement de la qualité des signaux. Pour des signaux de bonne qualité, la fonction d'intercorrélation sur les spectrogrammes donne une meilleure précision dans l'estimation du délai et moins de valeurs aberrantes (Tieman et al 2004). Cependant les hyperboles qui en découlent dans les deux domaines sont très semblables. En revanche, et pour les deux méthodes, quand les signaux sont de mauvaise qualité, la fonction d'intercorrélation devient très aplatie, rendant son maximum difficile à localiser avec précision. Dans ce cas, l'estimation du délai devient incertaine et les hyperboles sont faussées. En conclusion, nous avons fait le choix d'intégrer les deux méthodes de calcul dans bORie en créant une option sur le choix de la méthode d'intercorrélation. En effet, le processus de calcul dans le domaine spectral étant plus long, nous l'appliquerons uniquement pour les heures d'enregistrements de très bonne qualité où nous voulons faire une localisation très précise. Pour une estimation plus rapide et systématique (de tous les enregistrements disponibles par exemple), nous utiliserons la méthode de l'intercorrélation dans le domaine temporel.

Au final, pour estimer les délais d'arrivée sur les hydrophones, le détecteur automatique fonctionne de la manière suivante :

- Pour le réseau nord :

BORie effectue une corrélation croisée entre chaque template (BMi, BMie, BMb, BMBe) et le signal de l'enregistrement de l'hydrophone N2 (hydrophone sur lequel il a détecté le plus de cris pour chaque espèce). Lors d'une détection positive (seuil de corrélation dépassé), il effectue une intercorrélation sur la portion de signal correspondant dans l'enregistrement de l'hydrophone N3. Enfin, le délai est calculé et on en déduit les 2 angles absolus correspondant aux limites des hyperboles.

- Pour le réseau sud :

BORie effectue une corrélation croisée entre chaque template et le signal de l'enregistrement de l'hydrophone S3. Lors d'une détection positive, il effectue une intercorrélation sur la portion de signal correspondant dans l'enregistrement de l'hydrophone S2, puis de l'hydrophone S1, et enfin il effectue une intercorrélation entre le signal de l'enregistrement de l'hydrophone S2 et celui de l'hydrophone S1. Pour chaque couple d'hydrophones, le délai est calculé et on en déduit les 2 angles absolus correspondant aux limites des hyperboles.

4.2.4. Critères de validité et application

4.2.4.1. Les critères

Nous avons vu, dans le paragraphe précédent que nous avons intégré le calcul des 2 angles absolus correspondant aux limites des hyperboles dans le détecteur automatique. Autrement dit, dès qu'un cri est détecté dans l'enregistrement d'un hydrophone, quelque soit sa qualité, s'il est corrélé avec un cri de la même espèce sur un deuxième hydrophone, nous calculons le délai et les angles de l'hyperbole correspondante.

Pour augmenter l'indice de confiance dans l'estimation de ces angles, il nous a paru intéressant d'utiliser l'information contenue dans les séries de cris. On peut, en effet, faire l'hypothèse que, dans une même série de cris, les angles déduits pour chaque cri seront les mêmes (si la baleine est loin de l'hydrophone) ou alors ils suivront une trajectoire cohérente (si la baleine est suffisamment proche du réseau). Par conséquent, **des critères** dans le choix des cris utilisés pour la localisation ont été établis et intégrés dans le détecteur automatique (Figure

2.22). Ainsi, dans un enregistrement, le calcul des délais et l'estimation de l'angle se fait uniquement sur des séquences contenant au minimum 4 cris émis avec un intervalle de temps régulier et cohérent avec ce que l'on connaît sur les intervalles inter-cris (entre 55 et 65 s pour les BMi et entre 95 et 105 s pour les BMb). Les délais obtenus doivent être compris entre -1,4 s et +1,4 s (soit les valeurs de délais théoriques correspondant à la distance entre les hydrophones d'un même réseau). Pour chaque séquence de cris remplissant ces deux conditions, la représentation graphique d'une, deux ou trois hyperboles, dépendamment du réseau, est alors faite pour conforter notre indice de confiance sur l'estimation de la direction où se trouve la source émettrice.

4.2.4.2. Application aux deux réseaux

- Pour le réseau nord :

Puisqu'il est composé de 2 hydrophones, nous n'avons pas utilisé la méthode hyperbolique. Il est possible de donner les angles sur la position de la source selon l'axe des hydrophones.

- Pour le réseau sud :

Compte tenu de la configuration de celui-ci et de la courte durée des délais possibles, il est très rare que les hyperboles se croisent en un seul point. Quand c'est le cas, la baleine est toute proche (quelques kilomètres) et le suivi de sa trajectoire dans le temps dans un périmètre proche du réseau devient possible. Cependant, la plupart du temps, les hyperboles ne se croisent pas mais elles vont dans le même sens, indiquant la direction principale de provenance de la source. Cet angle de direction principale a été déduit pour chaque cri de la séquence étudiée puis, lorsqu'il y a une cohérence dans ces angles, **l'angle moyen (\pm écart-type)** de cette séquence a été calculé.

Remarque

Les séquences de cris avec lesquelles les angles moyens ont été estimés par la méthode décrite précédemment, ont été testées avec la méthode PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation – Cansi 1995). Cette méthode utilise le déphasage entre un même signal enregistré sur deux hydrophones différents pour en déduire l'angle de provenance de la source. Pour effectuer ce calcul de déphasage, PMCC a besoin des instants t de chaque cri obtenu par bORie. Cette

comparaison de méthodes a été faite uniquement pour les enregistrements du réseau sud et les résultats obtenus dans l'estimation des angles moyens étaient extrêmement similaires. En appliquant ces deux méthodes indépendantes sur les signaux issus de ce réseau très bruité, on obtient des résultats identiques quant aux angles et à la position de la source émettrice ; cela renforce alors notre confiance pour le suivi des animaux.

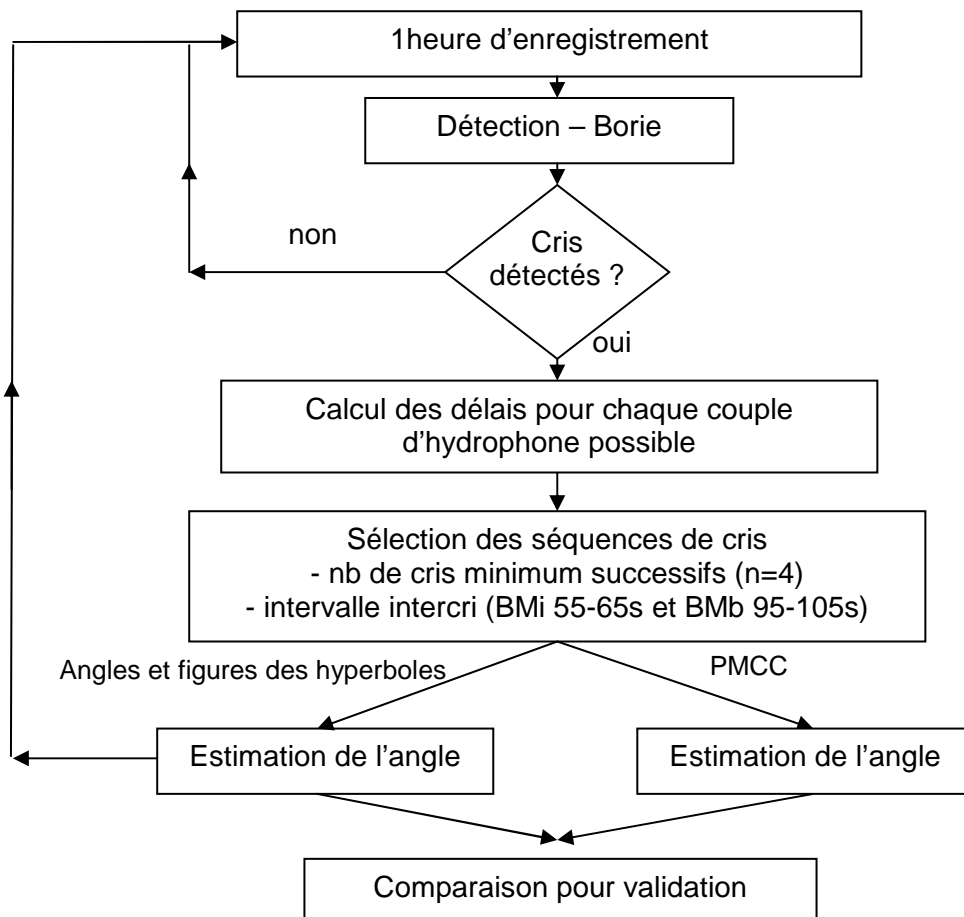


Figure 2.22 : Description du processus de l'estimation de l'angle

4.2.5. Application sur le réseau sud

Pour le réseau sud, la méthode de triangulation a été appliquée sur tous les enregistrements disponibles de mai 2003 à décembre 2004 en utilisant l'intercorrélacion dans le domaine spectral. Pour chacune des séquences de cris retenus selon les critères imposés et décrits précédemment, nous avons estimé l'angle moyen de provenance de la source et l'écart-type correspondant. Les résultats obtenus présentent alors trois scénarii différents qui permettent

d'apporter de la précision dans la provenance de la source émettrice. Nous allons donc voir dans cette partie, quelles sont les méthodes appliquées pour extraire un maximum d'informations sur la localisation de la source émettrice pour chacun de ces 3 scénarii.

4.2.5.1. Scénario 1 : la séquence indique un angle moyen avec un écart-type étroit

Dans ce cas la baleine ne change pas ou peu de cap pendant la durée de la séquence étudiée. On peut considérer qu'elle est suffisamment loin pour qu'un changement de direction ne soit pas visible sur les enregistrements des hydrophones. C'est le cas le plus fréquent des séquences de cris avec lesquelles il a été possible d'estimer un angle de provenance de la source. La variation des angles a été étudiée mois par mois pour mettre en évidence les éventuels changements de direction globales des animaux au cours du temps.

4.2.5.2. Scénario 2 : la séquence indique un angle moyen localisé au nord-est du réseau

Nous avons précisé, au début de cette partie qu'il existait très peu de zones de recouvrement entre le réseau nord et le réseau sud. Cependant, à de très rares occasions, lorsque la baleine est localisée au nord-est du réseau sud, alors les mêmes signatures vocales ont pu être détectées sur les hydrophones du réseau nord et du réseau sud. Dans ce cas, il a été possible de calculer la différence dans le temps d'arrivée du signal pour six nouveaux couples d'hydrophones (N2S1, N2S2, N2S3, N3S1, N3S2, N3S3). Cependant, au sein d'un même réseau, les hydrophones étant très proches en comparaison à la distance entre les deux réseaux, cela revient alors à ajouter un seul couple d'hydrophone (N2S3). Pour ce couple, le délai maximum est plus long ($\tau_{N2S3}=43$ s). En revanche, il n'a pas été possible d'appliquer les deux méthodes proposées précédemment pour estimer le délai. En effet, pour la méthode de calcul du délai par intercorrélation temporelle ou spectrale, la différence dans la qualité des signaux entre les deux réseaux (causée notamment par la différence dans le bruit ambiant mesuré entre les deux réseaux) est trop importante pour obtenir des courbes d'intercorrélation correctes. La méthode d'association hydrophone par hydrophone a révélé que bien souvent le détecteur n'avait pas détecté le cri associé sur un des hydrophones du couple. Ces cris « manqués » par bORie mais présents en visualisant les spectrogrammes sont souvent à la limite du seuil choisi (en baissant le seuil, il devient possible de les détecter mais on augmente considérablement les

fausses alertes). Dans ce cas nous avons fait le choix d'effectuer la mesure de l'instant t , pour chaque cri directement sur le spectrogramme de chaque hydrophone (en prenant soin de conserver la même configuration du spectrogramme tout au long du fichier traité). De ces instants t nous avons calculé le délai et déduit les angles correspondant.

Dans tous les enregistrements de la station HA4, ce scénario est très peu fréquent car, les rares fois où les mêmes signaux étaient visibles sur 4 ou 5 hydrophones de la station, ils n'étaient pas d'une qualité suffisamment correcte pour être exploitables pour la localisation. Néanmoins, nous avons quand même eu une occasion pour appliquer cette méthode. Nous utiliserons donc ce scénario comme une opportunité pour tester l'efficacité de nos outils et voir si les résultats sont cohérents avec la seconde méthode de localisation que nous avons utilisée.

4.2.5.3. Scénario 3 : la séquence indique un angle moyen avec un écart-type large

Dans ce cas, la baleine change de cap rapidement pendant la durée de la séquence étudiée. On peut considérer qu'elle est suffisamment proche du réseau pour que ces changements de direction soient bien visibles sur les enregistrements à travers la variation d'intensité des signaux reçus aux hydrophones. Par conséquent, si on visualise les figures du tracé des hyperboles des différents cris que compose cette séquence, on constate que les hyperboles se croisent déterminant ainsi la position exacte de l'animal. Dans ce cas, il est possible de faire un suivi précis de la trajectoire (2D) de l'animal en relevant les intersections successives. Dans nos enregistrements, par deux fois, la source sonore semblait très proche du réseau sud. Nous avons donc profité de ces situations exceptionnelles pour faire un suivi précis de l'animal. Pour cela, les intersections des hyperboles pour chaque cri ont été relevées pour connaître la position exacte de l'animal. Ces points ont été replacés sur une carte géographique contenant le réseau pour mieux visualiser et apprécier la trajectoire de l'animal. A partir de là, deux informations importantes sur la biologie de l'animal ont pu être déduites :

- *La vitesse de déplacement de l'animal :*

Elle est calculée en mesurant la distance de l'animal entre deux positions successives de sa trajectoire et le temps mis pour les atteindre.

- L'intensité à la source de l'animal :

L'intensité à la source (en dB à 1 μ Pa à 1m; noté *SL* de l'anglais *Source Level*) correspond à la valeur de la puissance acoustique d'une source sonore ramenée à 1 mètre de celle-ci. Ici, elle correspond à la puissance acoustique d'un cri émis par une baleine à sa source. Si un récepteur mesure l'intensité *IR* d'un signal émis par une source sonore située à une distance *R* du récepteur, alors en considérant les pertes (noté *TL* de l'anglais *Transmission Loss*) dues à la propagation du signal dans le milieu, il est possible de calculer l'intensité à la source d'après l'équation suivante :

$$SL = IR + TL \quad (4.12)$$

Où *IR* est l'intensité reçue au récepteur, en dB re 1 μ Pa²/Hz ;

R est la distance entre la source émettrice et le récepteur, en m ;

$$TL = X \log_{10}(R/R_0) \quad (4.13)$$

Où *R*₀ est une distance de référence généralement égale à 1 mètre ;

X est le facteur d'atténuation. Ce facteur est égal à -20 pour un modèle de dispersion sphérique (suffisant pour des courtes distances < 2 km) et -10 pour un modèle cylindrique. Toutefois, cette valeur est surtout dépendante de l'environnement (propriétés de la colonne d'eau non homogène et qui peuvent varier au cours des saisons). Ces notions seront plus largement détaillées dans le paragraphe 4.3 de ce chapitre.

En utilisant la trajectoire de la baleine et l'intensité des cris reçus aux différents hydrophones, il est possible de calculer cette intensité. Pour ce faire, premièrement, pour chaque position relevée, la distance *R* de la source par rapport à chacun des 3 hydrophones a été mesurée. Ensuite, pour chaque hydrophone, la distribution des intensités reçues *IR* de chaque cri utilisé pour estimer la position a été tracée en fonction de cette distance. La pente de la droite de régression obtenue correspond alors à l'atténuation *X* de l'équation (4.13). Ici, la baleine étant proche des hydrophones, on peut donc s'attendre à ce que cette valeur soit égale à -20. Par conséquent, l'intensité à la source peut alors être calculée. Dans les séquences de cris avec lesquelles il a été possible d'estimer un angle de provenance de la source, ce scénario a été vu une fois pour des signaux acoustiques émis par une baleine bleue pygmée et une fois pour des signaux acoustiques émis par une baleine bleue Antarctique. Il a donc été possible de mesurer avec cette méthode l'intensité à la source pour les deux sous-espèces de baleine bleues étudiées.

4.3. Estimation de la distance de détection des cris : RAM

Cette dernière partie des méthodes de localisation décrit la seconde technique de localisation utilisée dans ce travail de thèse en complément de la méthode hyperbolique. L'approche de cette méthode est différente puisqu'elle permet d'estimer **la distance** à laquelle la source sonore se situe par rapport aux récepteurs en utilisant **l'intensité du signal reçue** et **un modèle de perte de signal par propagation** adapté à la zone d'étude. Comme pour la description de la méthode hyperbolique, dans un premier temps, le concept théorique de cette approche sera défini, puis nous verrons son application et son adaptation aux données.

4.3.1. Cadre théorique

4.3.1.1. Perte de l'énergie d'un signal hydroacoustique par propagation dans le milieu

La perte d'énergie d'un signal due à sa propagation dans le milieu est une notion qui a rapidement été évoquée à la fin de la partie précédente, pour calculer le niveau sonore à la source des baleines. Or, il me semble important de décrire cette notion en détail afin de bien saisir son importance et son utilité en hydroacoustique.

De façon générale, une onde hydroacoustique propagée dans le milieu subit une atténuation avec la distance. Cette atténuation est le résultat de la perte d'une fraction de l'énergie de cette onde dans le milieu. Cette perte fait intervenir de nombreux phénomènes physico-chimiques ; la loi empirique de l'atténuation (en dB km^{-1}) la plus communément utilisée étant la suivante :

$$\text{Alfa} = 0,0033 + (0,11f^2) / (1 + f^2) + (44f^2) / (4100 + f^2) + 0,0003f^2 \quad (4.14)$$

Où f est la fréquence en kHz.

On constate ainsi, que l'atténuation augmente avec le carré de la fréquence ; les basses fréquences se propagent mieux dans le milieu marin.

Si une onde hydroacoustique a une intensité à la source SL à 1 m de 160 dBre $1\mu\text{Pa}$, l'intensité reçue IR à une distance de 1km peut être de seulement 100dBre $1\mu\text{Pa}$; dans ce cas, on dira que la perte de transmission TL est de 60 dB (équation 4.12). Le TL est donc le ratio de la puissance, de l'intensité ou de l'énergie d'une onde hydroacoustique entre deux distances, de la source au récepteur. On peut également le définir comme une différence de niveau sonore mesurée entre deux distances. Le TL est positif mais c'est souvent l'inverse du TL qui est représenté graphiquement sur des profils (ou courbes) d'atténuation. On visualise ainsi la diminution du niveau sonore d'une onde hydroacoustique en fonction de la distance (Figure 2.23).

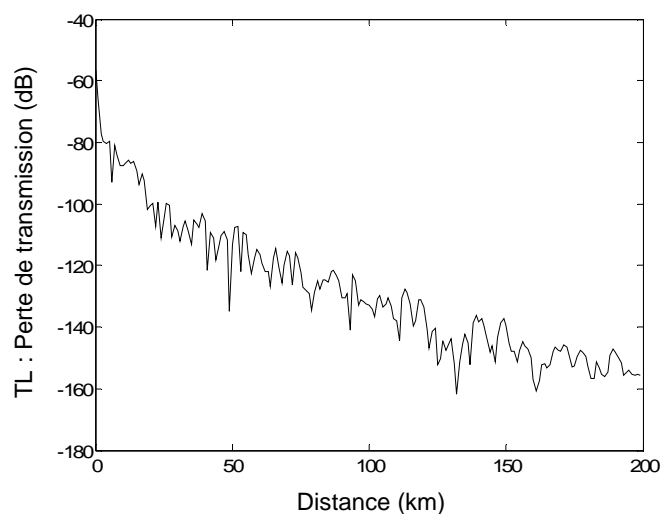


Figure 2.23 : Exemple de courbe d'atténuation d'un signal : on observe la diminution du niveau sonore de l'onde hydroacoustique (la perte par transmission) en fonction de la distance.

La composante principale de la perte par transmission est l'amortissement par le milieu. En considérant un milieu homogène, sans barrière physique et sans perte par absorption, un son omnidirectionnel se dispersera de manière sphérique. Ce modèle simple de propagation du son est appelé modèle de dispersion sphérique. Il implique que l'intensité d'une onde sonore va diminuer de façon inversement proportionnelle à la distance qu'elle aura parcourue. En réalité, ce modèle reste acceptable uniquement sur de courtes distances (de l'ordre de quelques kilomètres). Dans ce cas, le TL peut se calculer selon l'équation suivante :

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{R}{R_0} \right) \quad (4.15)$$

Où R_0 est une distance de référence généralement égale à 1 mètre.

Si la colonne d'eau n'est pas homogène, un son qui se propage dans le milieu subira des réfractions et des réflexions entre les couches que compose ce milieu ; la dispersion sera alors cylindrique. Ce second modèle simple de propagation du son est appelé modèle de dispersion cylindrique. Il est valable dans certaines conditions comme en eaux peu profondes par exemple où les ondes acoustiques seront réfléchies par la surface et le fond marin formant ainsi une série d'ondes réfléchies de forme cylindrique. Dans ce modèle, l'intensité diminue à mesure que la distance augmente mais de façon moins rapide que dans le modèle de dispersion sphérique (Figure 2.24).

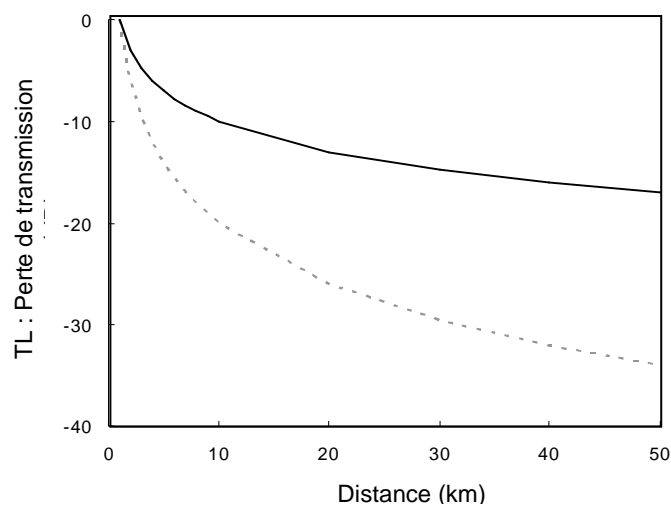


Figure 2.24 : Courbe d'atténuation d'un signal pour un modèle de dispersion sphérique (courbe noire) et cylindrique (courbe en pointillée).

De façon plus générale, la perte de transmission d'un signal qui se déplacerait d'un point A vers un point B est fonction de la distance R se mesure selon l'équation simplifiée (équation 4.13) où X est une valeur dépendante de l'environnement (bathymétrie, caractéristiques du fond océanique et propriétés physicochimiques de l'eau), de la profondeur et de la saison. Comme nous avons vu précédemment, cette valeur est égale à 20 pour le modèle de dispersion sphérique (courte distance) et 10 pour le modèle de dispersion cylindrique (eau peu profonde).

4.3.1.2. Déduction de la distance de la source par mesures des pertes par propagation

Nous avons vu, dans la partie précédente, qu'un signal subit une perte d'énergie (TL) lors de sa propagation dans le milieu. Cette perte étant fonction de la distance, si on connaît sa valeur alors il est possible d'en déduire la distance R entre la source émettrice et le récepteur. Dans

notre cas, nous cherchons à estimer la distance entre une baleine qui émet un signal acoustique avec une intensité à la source SL et les hydrophones qui réceptionnent ce signal avec une intensité reçue IR d'après l'équation (4.12). Par conséquent, la distance peut être évaluée en fonction de la perte TL (équation 4.13). Dans l'estimation de la distance aux hydrophones, nous faisons l'hypothèse que le milieu marin autour de l'archipel de Crozet peut être considéré comme non homogène et que la baleine est située à plusieurs kilomètres de notre point d'enregistrement. Dans ces conditions, les modèles simples de propagation acoustiques vus précédemment (modèles de dispersion sphérique ou cylindrique) ne sont pas optimaux.

Pour estimer la valeur de ce terme X (équation 4.13), nous allons utiliser un modèle plus complexe de simulation de la propagation des ondes acoustiques paramétré par des mesures de l'environnement (température, densité, état de mer, bathymétrie, qualité du fond marin etc.) Ces paramètres seront pris en compte pour modéliser l'interaction des ondes acoustiques avec l'environnement océanique, la profondeur de propagation et la saison. Ce modèle permettra de mieux considérer les pertes de transmission et il nous sera possible d'être plus confiant sur les estimations des distances des baleines, notamment dans un large rayon autour de la station.

4.3.2. Modèle de propagation du son

4.3.2.1. Choix du modèle

La propagation du son dans l'eau est gouvernée par les équations de la dynamique des fluides incompressibles. Elle repose sur la résolution de l'équation d'onde suivante :

$$\Delta p(x,y,z,t,T) - 1/c(x,y,z,t,T)^2 \cdot \delta^2 p(x,y,z,t,T) / \delta t^2 = 0 \quad (4.17)$$

Où $p(x,y,z,t)$ représente en un point donné et à un instant donné l'écart entre la pression acoustique et la pression hydrostatique de référence ;
 $c(x,y,z,T)$ représente le champ de célérité (on néglige la dépendance par rapport au temps, considérant que le milieu ne varie pas durant le temps de la propagation) ;
 Δ désigne le laplacien.

Cette équation est donnée en monochromatique (signaux à fréquence pure) par l'équation de Helmholtz :

$$\Delta p + (\omega^2 / c^2) \cdot p = 0 \quad (4.18)$$

Où ω désigne la pulsation.

Il existe différentes théories pour résoudre l'équation de Helmholtz. Ces techniques utilisent de nombreux paramètres pour définir l'environnement, certains modélisés, d'autres supposés. Nous allons regarder les différents modèles existant pour résoudre cette équation. Le but ici n'étant pas de décrire leur principe de fonctionnement mais de regarder quels sont les paramètres du milieu qui sont considérés par chaque modèle afin de choisir celui qui sera le mieux adapté à notre étude.

- Théorie des rayons (Le modèle BEHLLOP - Porter et Bucker 1987)

La propagation est décrite sous forme de rayons dont le trajet dépend d'une part de l'angle d'émission et d'autre part des conditions de célérité du milieu. Le profil de célérité est réduit en segments de droites à gradients constants. Cette représentation des trajectoires sonores en rayon rend bien compte de l'influence du profil de célérité. Les variations verticales de célérité guident les rayons dans des chenaux (appelés chenaux de propagation). L'atténuation de l'amplitude du rayon au cours de sa propagation est due à la dispersion géométrique, à l'atténuation volumique dans le milieu et aux réflexions avec les interfaces. Ce modèle prend alors en compte, dans son calcul, la variation de la bathymétrie sur la distance de propagation et la variation de la vitesse du son sur la profondeur mais il suppose que les propriétés du milieu (température, salinité i.e. vitesse du son) ne changent pas avec la distance.

- Les modes normaux (le modèle Kraken - Pekeris 1948)

La propagation est décrite sous forme de modes modaux qui ne prennent en compte que des environnements invariants avec la distance. Toutefois, des équations aux modes couplés permettent de calculer des solutions exactes pour des milieux variables.

- L'équation parabolique (le modèle *Range-dependant Acoustic Model- RAM* – Collins 1993, 1995)

La résolution de l'équation parabolique est une des approximations clef de l'équation elliptique de Helmholtz (4.18). Les équations paraboliques permettent alors de prendre en compte des milieux variables avec la distance (profils de célérité et fonds variables). En revanche, le maillage spatial à effectuer doit respecter des critères dépendant de la longueur d'onde, conduisant à des temps de calcul important dès que les fréquences augmentent.

- Les codes spectraux

Le principe est très proche des techniques spectrales classiques (Fourier.). Cette fois, on effectue une transformée de Hankel (solutions des équations de Bessel) c'est-à-dire qu'on décompose la pression en ondes cylindriques. Ces codes sont bien adaptés à la prise en compte d'interfaces complexes et par conséquent aux configurations de petits fonds. Les codes spectraux sont néanmoins incapables de gérer des milieux variables avec la distance.

La station hydroacoustique HA4 est localisée à proximité d'un archipel d'îles et d'un plateau océanique (le plateau de Crozet à l'est de l'archipel). La bathymétrie est donc très variable sur la distance de propagation (Figure 2.25 [A]) ; il sera alors indispensable de prendre ce paramètre en considération dans le modèle. Au début de ce chapitre, lors de la description du bruit ambiant reçu à la station, nous avons précisé que la station était située dans la zone frontale entre le front subantarctique et le front polaire. Nous avons remarqué que les courants et le déplacement saisonnier des structures océaniques à proximité de la station font varier de façon non négligeable les conditions de température et de salinité du milieu et par conséquent la vitesse du son. Cette vitesse varie sur la profondeur et la distance de propagation (Figure 25 [B]), il sera alors également indispensable de prendre en considération ce paramètre dans le modèle. Par conséquent, nous avons choisi, pour notre étude, d'utiliser le seul modèle qui prend en considération la variation de tous ces facteurs le long de la distance de propagation, c'est-à-dire le modèle RAM.

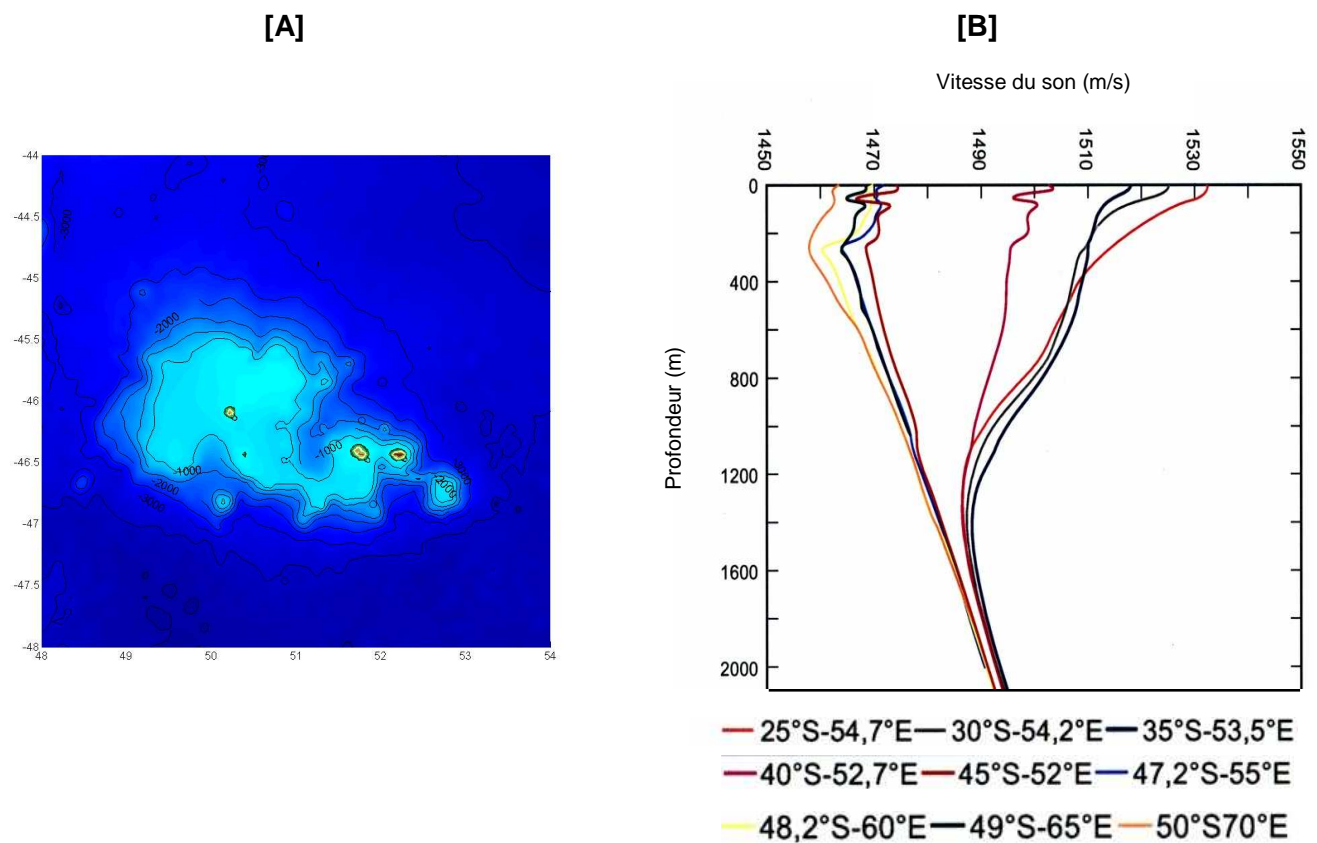


Figure 2.25 : [A] Carte bathymétrique de la zone d'étude et [B] profils de vitesse du son à différentes latitudes pour l'Océan Indien (Source CEA, G. Ruzié).

4.3.2.2. Définition mathématique du modèle RAM

Ce modèle de propagation des ondes acoustiques en milieu marin permet de calculer l'atténuation de l'énergie entre une source acoustique et un récepteur dans un milieu où la bathymétrie et le profil de vitesse du son varient avec la distance. Dans ce modèle, la propagation est décrite à l'aide d'équations paraboliques. L'approximation de la pression p , solution de l'équation de Helmholtz, est recherchée en transformant cette équation en une équation parabolique mieux adaptée au calcul numérique. Pour résoudre cette équation parabolique, le modèle RAM utilise la méthode de l'approximation de Padé. Dans cette partie, nous allons décrire le passage de l'équation de Helmholtz à une équation parabolique.

Soit p , la pression sonore vérifiant l'équation de Helmholtz en coordonnées cylindriques (r , θ , z) :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 p = 0 \quad (4.19)$$

Où r représente la distance à la source ;

z la profondeur ;

n est l'indice de réfraction défini par l'équation : $n(r, z) = \frac{c_0}{c(r, z)}$;

k_0 la distance source-récepteur défini par l'équation $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$;

c_0 est la vitesse en un point de référence (r_0, z_0).

On considère les symétries du modèle telles que p soit indépendant de θ . Les hypothèses concernant l'approximation parabolique sont les suivantes :

- la distance source-récepteur est grande ($k_0 r > 1$)
- la largeur du chenal est faible par rapport à la distance de propagation ($|z - z_0|/R < 1$)

La pression p peut se représenter par une fonction de Hankel d'ordre 0 $H^{(1)}_0(k_0 r)$, solution de l'équation de Bessel (fonction qui varie lentement selon r et z) :

$$p(r, z) = \Psi(r, z) H^{(1)}_0(k_0 r) \quad (4.20)$$

Or, lorsque $k_0 r > 1$, cela revient à écrire que :

$$H^{(1)}_0(k_0 r) \rightarrow \sqrt{\frac{2}{ik_0 r}} \exp(ik_0 r) \quad (4.21)$$

On peut remplacer la fonction de Hankel par son comportement asymptotique :

$$p(r, z) = \Psi(r, z) \sqrt{\frac{2}{ik_0 r}} \exp(ik_0 r) \quad (4.22)$$

L'équation (4.19) simplifié devient alors :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + 2ik_0 \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + k_0^2 (n^2 - 1) \Psi = 0 \quad (4.23)$$

On adopte comme notation les opérateurs suivants :

$$- P = \frac{\partial}{\partial r}$$

$$- Q = \sqrt{n^2 + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}}, \text{ qu'on peut encore écrire } Q = \sqrt{1+q}$$

$$\text{Où } q = \varepsilon + \mu \text{ avec } \varepsilon = n^2 - 1 \text{ et } \mu = \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}.$$

Alors l'équation (4.23) devient :

$$(P^2 + 2ik_0 P + k_0^2 (Q^2 - 1)) \cdot \Psi = 0 \quad (4.24)$$

Si on considère que le milieu se caractérise par une faible variabilité en distance, l'équation (4.24) s'écrit alors :

$$P\Psi = ik_0 (\sqrt{1+q} - 1) \cdot \Psi \quad (4.25)$$

Ceci est l'équation parabolique la plus classique utilisée pour décrire la propagation acoustique.

Nous choisirons des approximations de Padé pour estimer $\sqrt{1+q}$:

$$\sqrt{1+q} \sim \sum_j^m \frac{a_{jm} q}{1+b_{jm}} \quad (4.26)$$

L'équation parabolique obtenue n'est pas unique car elle dépend des hypothèses faites sur le milieu de propagation, de la source et du récepteur. C'est pour cette raison que ce modèle peut prendre en considération un environnement variable horizontalement et est robuste sur des grandes distances de propagation.

Remarque

Les sources du code RAM sont disponibles sur internet (Ocean Acoustic Library <http://hlsresearch.com/oalib/>).

4.3.3. Paramètres du modèle appliqué à l'étude

4.3.3.1. Paramètres environnementaux considérés

Les paramètres environnementaux du milieu sont des hypothèses fortes du modèle puisqu'ils définiront le milieu de propagation et l'atténuation qui en découle en fonction de la distance. Ces paramètres ont été intégrés directement dans le modèle sous la forme de trois bases de données océanographiques spécifiques au milieu étudié :

- La bathymétrie :

La base de données ETOPO2 fournit des profils de bathymétrie selon une grille régulière entre 0 et 360° de longitude.

- Les profils de vitesse du son :

Nous avons décrit au début de ce chapitre que ces profils dépendaient essentiellement de la température et variaient avec la saison à un point donné. Nous avons utilisé la base de données GDEM-V du Service Hydrographique de la Marine Américaine pour avoir, à chaque pas d'une grille de 0.5° le profil mensuel de la vitesse du son (Figures 2.26 et 2.27).

- Le modèle de sédiment du fond océanique :

Pour la station HA4, les caractéristiques du substrat sont représentées dans le tableau 2.7.

Tableau 2.7 : Caractéristiques géologiques du fond sous-marin à la station HA4

Type de sédiment	Densité (g/cm ³)	Porosité (%)	Célérité potentielle (m/s)	Cél Séd/Cél eau	Atténuation (dB/λ)	Gradient Célérité (m/s/m)	Gradient Densité (g/cm ³ /m)
Sédiment							
Calcaire siliceux	1,57	66	1582	1,036	1,1	1,5	0,0015

(* : Conditions de laboratoire à 23°C, 1 atm, $C_{el_{eau}} = 1530\text{m/s}$)

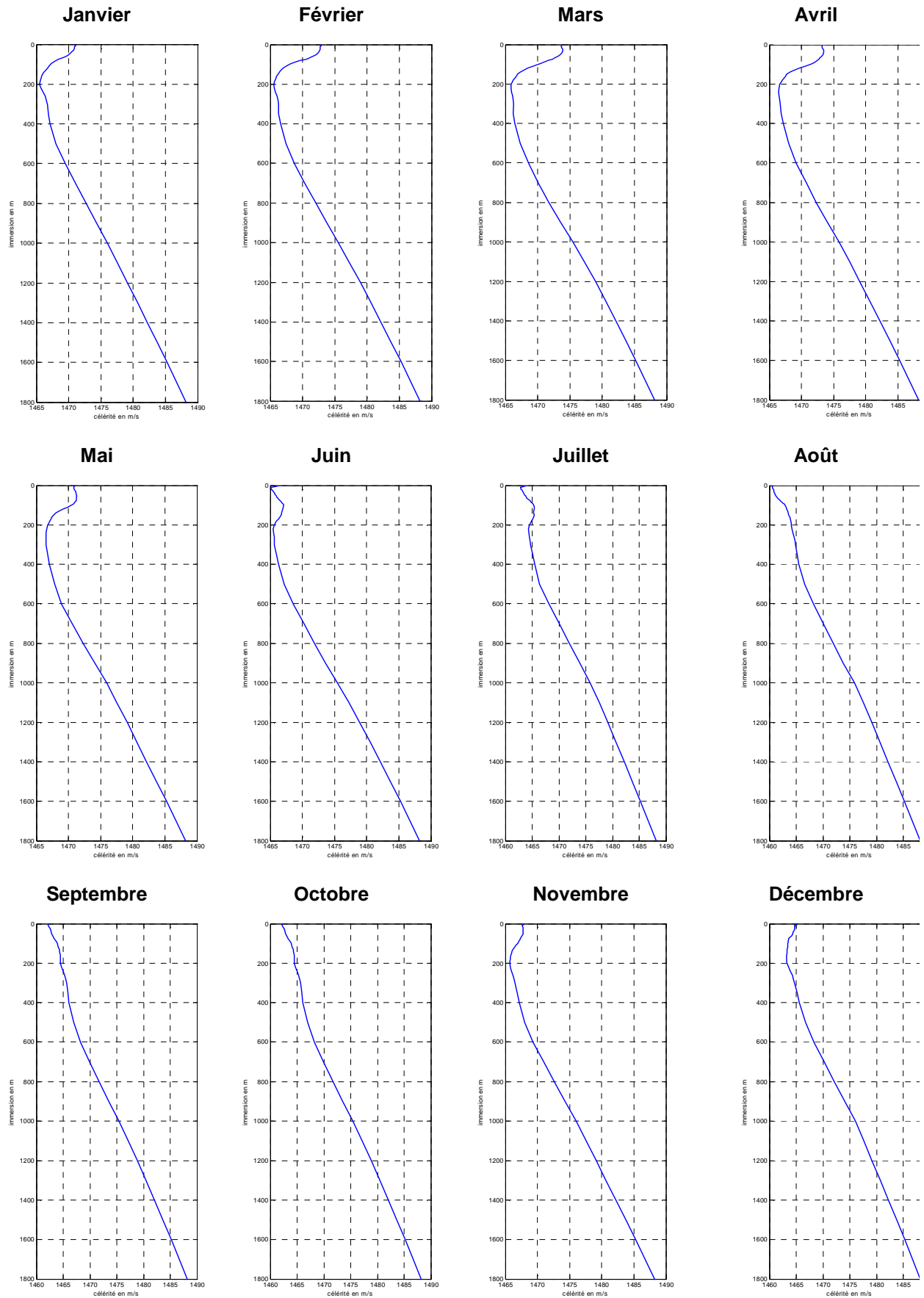


Figure 2.26 : Profils de célérité mensuels pour le réseau nord

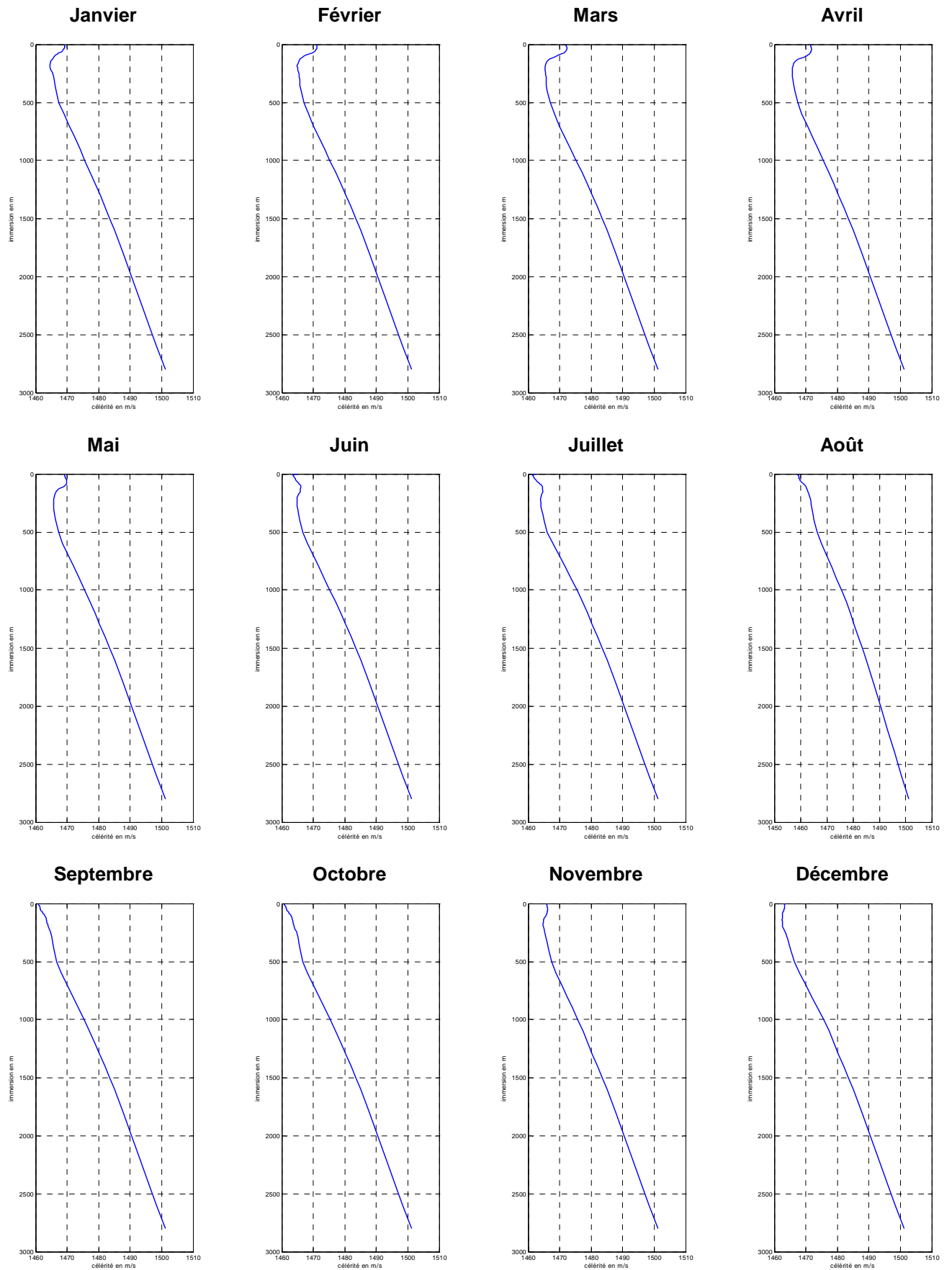


Figure 2.27 : Profils de célérité mensuels pour le réseau sud

4.3.3.2. Paramètres du récepteur

Les paramètres du récepteur sont les hypothèses les plus certaines car ils dépendent uniquement de la construction de la station. Ces paramètres, intégrés directement dans le modèle, sont :

- ***La position des réseaux :***

Pour chaque réseau, cette position est calculée comme étant le centre du triplet d'hydrophones.

- ***La profondeur d'immersion :***

Cette valeur correspond à la profondeur à laquelle le profil d'atténuation sera calculé. Il correspond donc à la profondeur des hydrophones.

4.3.3.3. Paramètres du signal étudié et de la source émettrice

Le signal étudié est l'onde hydroacoustique pour laquelle on veut connaître la propagation dans le milieu ; pour cette étude, ce signal correspond au cri émis par la baleine. Alors que les paramètres environnementaux et les paramètres du récepteur peuvent facilement être définis et, par conséquent, être injectés dans le modèle avec une certaine confiance, les paramètres du signal étudié et de la source émettrice sont plus difficiles à définir. Ces paramètres sont :

- ***La profondeur de la baleine à l'émission de son signal :***

Peu d'informations sont connues sur la biologie comportementale des baleines bleues Antarctique et pygmée lorsqu'elles émettent des signaux sonores. Nous utiliserons donc la profondeur maximale d'émission des cris reportée dans la littérature c'est-à-dire 50 m (Oleson et al 2004).

- ***Le secteur azimutal où se situe la source par rapport au récepteur :***

Pour le définir, les angles de provenance déduits par la méthode hyperbolique seront utilisés. Comme sur une rosace des vents, l'azimut est défini nul pour la direction nord et varie dans le sens des aiguilles d'une montre de 10 à 360° avec un pas de 10°.

- La fréquence du signal :

Pour appliquer, l'équation de Helmholtz, résolution de l'équation d'onde (4.17), nous devons définir, dans le modèle RAM, le signal de la baleine comme un signal continu et mono fréquentiel. Le signal de la baleine a une durée minimum de 17s, on peut alors supposer qu'il est suffisamment long pour être considéré comme non transitoire. En revanche, il est fortement modulé en fréquence sur toute sa longueur. Il est alors délicat de le considérer comme mono-fréquentiel et je consacrerai une sous-partie dans ce chapitre (§ 4.3.4) sur le choix de la fréquence qui définira au mieux le signal pour les deux sous-espèces étudiées.

4.3.4. Application du modèle**4.3.4.1. Courbe d'atténuation**

Le modèle RAM permet de calculer l'atténuation d'un signal selon la saison (ou mois) considérée (par le choix du profil de célérité associé pour ce mois), l'angle de direction de la source (par le choix du profil de bathymétrie et le substrat du planché océanique associé pour ce secteur), pour des profondeurs de source et de récepteur imposées. Cette atténuation est représentée par une courbe d'atténuation (figure 2.28). La visualisation des courbes d'atténuation met en évidence leur légère variabilité sur la distance. Les valeurs des atténuations sont calculées en considérant une source à une fréquence f donnée qui pulse en permanence (terme ω de l'équation (4.18)). Cela génère des interférences constructives et destructives, d'où des variations importantes en termes d'atténuation (présence de pics et de creux). Dans le cadre de notre étude, les courbes d'atténuation ont été lissées à l'aide d'une fonction polynomiale d'ordre 4.

Pour chaque réseau d'hydrophones, on obtient alors 12 courbes mensuelles pour 36 angles de directions différentes et ce, pour chaque fréquence de signal pour lesquelles nous désirons connaître l'atténuation.

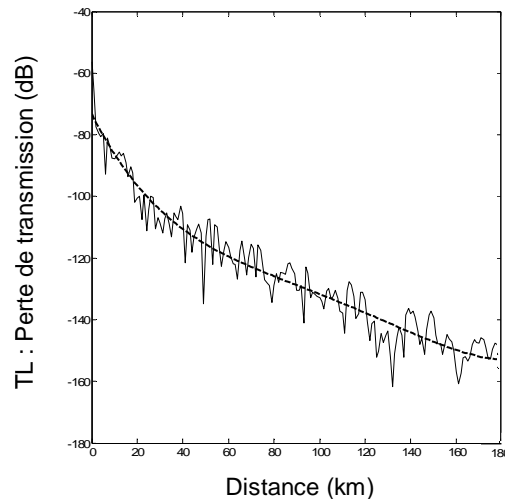


Figure 2.28 : Courbe d'atténuation initiale (noire) et lissée (pointillée) d'un signal de 35Hz pour le mois de janvier au réseau nord (10°)

4.3.4.2. Calcul des pertes

Cette courbe d'atténuation est alors utilisée pour estimer la distance entre la source et le récepteur selon les pertes de transmission calculées d'après l'équation suivante :

$$TL = SL - IR \quad (4.27)$$

Pour connaître la valeur des pertes, il est donc nécessaire de connaître la valeur de l'intensité à la source de la baleine (SL) et la valeur de l'intensité du cri reçue aux hydrophones (IR).

- Intensité à la source de la baleine :

Cette valeur est très délicate à choisir car il existe très peu d'information sur l'intensité à la source d'un signal de baleine bleue Antarctique ou pygmée. La source sonore des baleines bleues a été peu de fois estimée dans la littérature et dans des régions différentes. Cependant, nous avons vu que, à l'aide de la méthode hyperbolique, lorsque la baleine émet des sons à proximité du réseau sud, il est possible de recalculer son niveau acoustique à la source en fonction de l'intensité reçue et d'un modèle simple de propagation des ondes hydroacoustiques pour les courtes distances (le modèle sphérique). Nous avons par conséquent utilisé l'intensité moyenne estimée pour chaque espèce étudiée ainsi que l'intensité moyenne reportée dans la littérature pour la baleine bleue en générale (Thode et al 2000) et pour la baleine bleue Antarctique (Širović et al 2007).

- *L'intensité reçue aux hydrophones :*

Pour chaque signature vocale de baleine détectée, la valeur de son intensité reçue à l'hydrophone est calculée. Cependant, le modèle RAM considère les hydrophones de chaque réseau comme un seul et unique hydrophone. Par conséquent, il convient de choisir sur quel hydrophone nous allons extraire les valeurs d'intensité reçue. Dans la plupart des cas, nous avons fait l'hypothèse que les cris, qui seront utilisés dans le modèle RAM pour calculer la distance entre la baleine et le récepteur, ont été émis suffisamment loin du réseau pour que l'intensité reçue soit la même sur les 2 ou 3 hydrophones que composent chaque réseau. Les intensités reçues des cris mesurées sur l'hydrophone N2 pour le réseau nord et sur l'hydrophone S3 pour le réseau sud seront alors utilisées pour le calcul des pertes par transmission. De plus, nous avons vu dans la partie consacrée au détecteur que l'intensité reçue à l'hydrophone d'un cri de baleine a pu être mesurée sur le cri complet mais aussi sur la première et la deuxième partie qui composent ce cri. Par conséquent, en fonction de la fréquence du signal de baleine choisie pour calculer les courbes d'atténuation, nous utiliserons la valeur de l'intensité reçue correspondante.

4.3.4.3. Estimation de la distance

Une fois la valeur des pertes TL calculée, nous donnons l'estimation de la distance de détection en reportant l'intersection entre la valeur de la perte d'intensité calculée (cf. ligne grise en pointillée sur la figure 2.29) et la courbe d'atténuation sur l'axe des distances. Par exemple, si on a une perte d'intensité estimée de 110dB entre la source et le récepteur alors la source se situe à 40km du récepteur, d'après le modèle et pour le profil d'atténuation considéré (Figure 2.29).

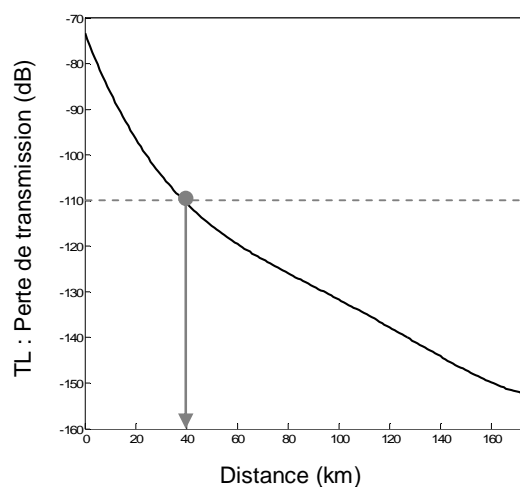


Figure 2.29 : Courbe d'atténuation lissée d'un signal de 35 Hz pour le mois de janvier au réseau nord (10°) et estimation de la distance selon les pertes de transmission.

Remarque 1

Le calcul de l'atténuation se fait sur une distance maximale (ou rayon de propagation maximal) et avec un échantillonnage (ou pas) fixés. La résolution spatiale conditionne le temps de calcul. Aussi, il est inutile de vouloir une résolution fine pour une distance maximale trop importante. Dans notre étude, nous avons effectué les calculs en considérant une distance maximale de 400km et avec une résolution spatiale de un point tous les kilomètres.

Remarque 2

Un signal émit dans l'axe du canal SOFAR voit son énergie s'atténuer très faiblement avec la distance. Au contraire, l'atténuation augmente à mesure que la source s'éloigne du SOFAR. Dans notre cas, les courbes d'atténuation que nous calculons sont valables pour un signal qui n'est pas émis dans le SOFAR puisque nous prenons comme hypothèse (par rapport à la biologie) que la baleine bleue n'émet pas de signature vocale au-delà de 50m de profondeur. Par conséquent, l'atténuation du signal est rapide.

4.3.5. Importance du choix de la fréquence du signal

Nous avons vu dans les parties précédentes consacrées au modèle de propagation RAM que le profil d'atténuation d'un signal est calculé que pour une seule et unique fréquence. Or, un cri de baleine bleue Antarctique ou un cri de baleine bleue pygmée n'est pas mono fréquentiel mais modulé en fréquence. Pour les deux espèces ces fréquences sont bien définies (Figure 2.13 - cf. § 2.2 de ce chapitre). Nous allons voir dans un premier temps si, pour des fréquences variables, le modèle RAM parvient à des estimations variables. Ensuite, nous présenterons les fréquences choisies pour les deux sous-espèces de baleine bleue étudiées.

4.3.5.1. Variation de l'atténuation selon la fréquence

Dans ce test, nous avons calculé, avec le modèle RAM, des profils d'atténuation pour des fréquences variant de 5 à 50 Hz (Figure 2.30). Si les courbes ne changent pas alors on pourra prendre une fréquence moyenne (30 Hz) pour les 2 espèces. Si l'atténuation varie en fonction de la fréquence alors il faudra choisir avec soin la fréquence du signal qui sera modélisé.

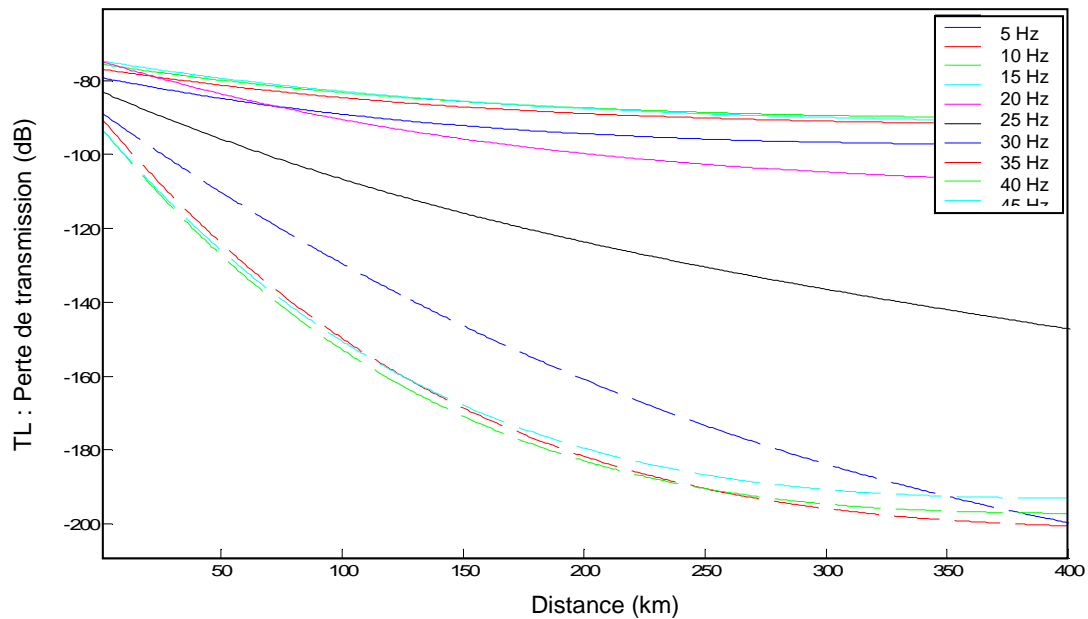


Figure 2.30 : Courbes d'atténuation lissées pour des fréquences variant de 5 à 50 Hz pour le mois de Janvier à la station nord (10°)

Dans les premiers mètres et jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres l'atténuation est croissante avec la fréquence. Un signal basse fréquence de 5 Hz se propagera sur une plus grande distance et sera atténué moins rapidement qu'un signal basse fréquence de 50 Hz. Pour des fréquences comprises entre 5 et 20 Hz, on note peu de différences dans l'atténuation. Au-delà de 20 Hz et jusqu'à 40 Hz, l'atténuation change très rapidement et cela même dans les premières dizaines de mètres. Cette bande de fréquences correspond à celle des vocalisations de baleines que nous étudions. Par conséquent, on ne pourra pas prendre une fréquence moyenne pour les deux espèces. Nous allons regarder en détail la composition des signaux de baleine afin de faire le choix de la fréquence la plus représentative du cri.

Remarque

Les différentes courbes d'atténuation pour différentes valeurs de fréquence de signal ont été tracées avec la même configuration que nous utilisons dans l'étude pour une région géographique et un mois donnés.

4.3.5.2. Choix de la fréquence pour les deux espèces.

Cette fréquence devra représenter au mieux le signal de la baleine. Nous avons donc basé notre choix sur 2 critères : la fréquence du signal où l'énergie est la plus importante et pour laquelle la durée est la plus longue.

- *L'énergie :*

Pour cela, nous allons comparer les valeurs des intensités reçues mesurées sur tout le signal, puis sur la première et la deuxième partie du signal. Ce travail a été fait pour chaque espèce. La figure 2.31 présente les résultats de cette étude. Pour le cri de la baleine bleue Antarctique, l'intensité reçue est légèrement plus importante dans la première partie du signal bien que les mesures sur la deuxième partie soient également très cohérentes avec le cri complet ($R^2 > 0,99$). L'amplitude maximale de la première partie du cri est mesurée à une fréquence de 28 Hz en moyenne. En revanche, pour le cri de la baleine bleue pygmée, il y a une légère différence entre les intensités reçues mesurées pour les différentes parties que composent cri. L'intensité reçue mesurée dans la seconde partie du signal est plus importante que celle mesurée dans la première partie. C'est cette partie du cri qui est la plus représentative du cri complet de baleine bleue pygmée ($R^2 > 0,97$).

- *La durée :*

Pour le cri de la baleine bleue Antarctique, la durée de la première partie du signal est plus longue que celle de la deuxième partie (en moyenne 14s vs 9s). Pour le cri de la baleine bleue pygmée, la durée de la première partie du signal est plus courte que celle de la deuxième partie (en moyenne 17s vs 20s).

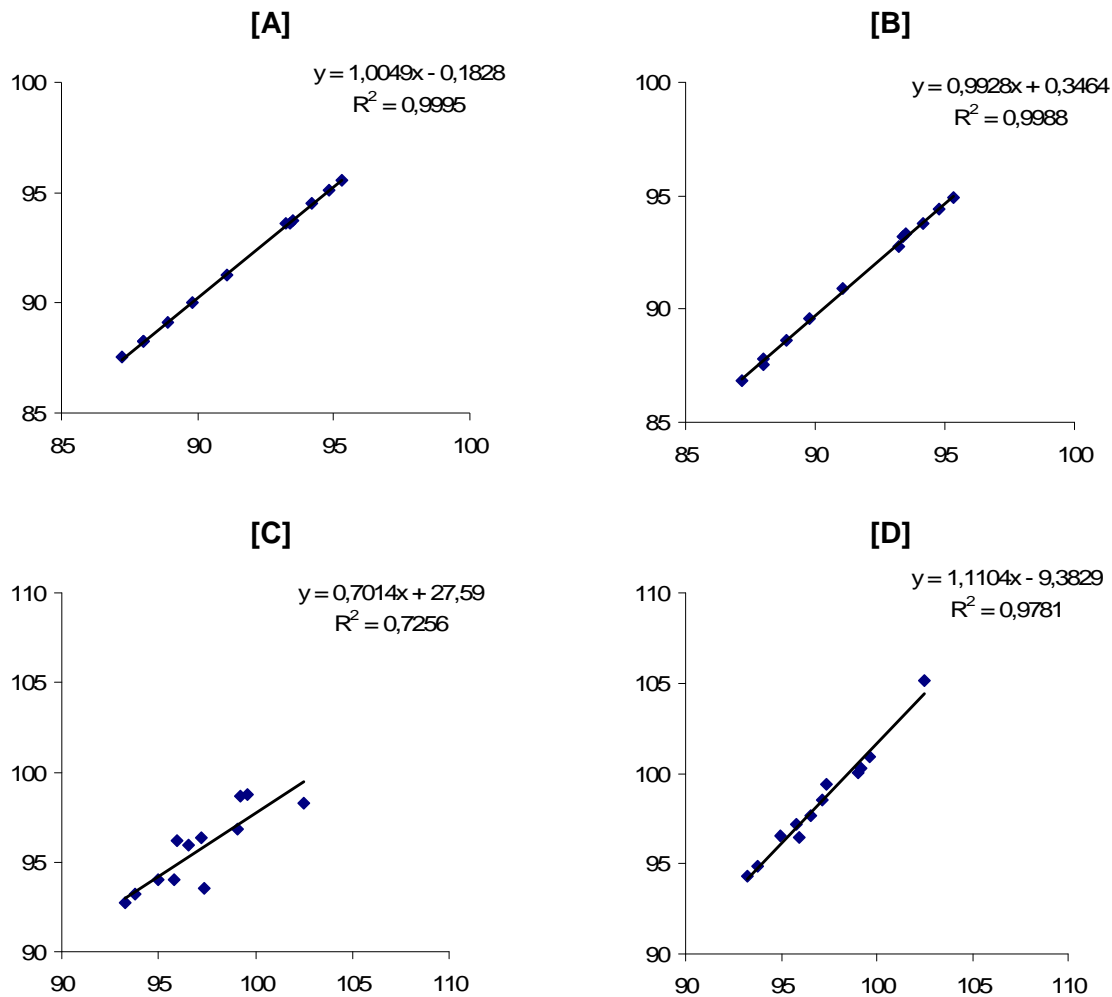


Figure 2.31 : Corrélation entre les intensités reçues mesurées sur le cri complet de baleine bleue Antarctique et [A] la partie 1 du signal et [B] la partie 2. Corrélation entre les intensités reçues mesurées sur le cri complet de baleine bleue pygmée et [C] la partie 1 du signal et [D] la partie 2 du signal.

Par conséquent, les courbes d'atténuation seront calculées à 28 Hz pour la baleine bleue Antarctique et à 25 Hz pour la baleine bleue pygmée. La figure 2.32 présente les courbes d'atténuations pour chacune ces deux fréquences.

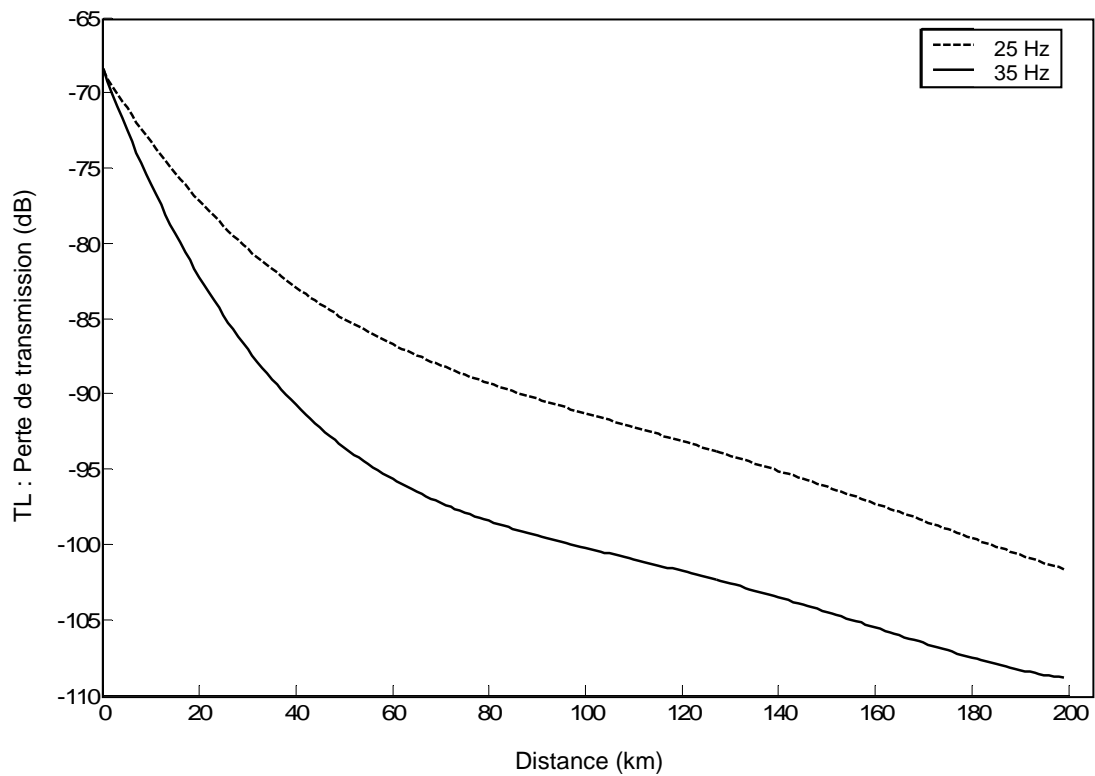


Figure 2.32 : Courbes d'atténuation lissées pour des fréquences variant de 25 à 35 Hz pour le mois de Janvier à la station nord (10°)

En conclusion, le tableau 2.8 résume les paramètres des signaux acoustiques de baleine bleue Antarctique et pygmée que nous avons intégrés dans le modèle de propagation du son.

Tableau 2.8 : Paramètres des signaux étudiés choisis pour le modèle de propagation du son.

	Signaux de BMi	Signaux de BMb
Fréquence (Hz)	28	25
Intensité à la source (dBre 1μ Pa à 1m)	179 et 189	174 et 180
Intensités reçues mesurées	Partie 1	Partie 2

4.3.6. Application

4.3.6.1. Effet spatial

La modélisation de l'atténuation des signaux de baleines bleues Antarctique et pygmées à l'aide du modèle de propagation du son spécifiquement adapté peut nous aider à mieux connaître la capacité de détection de ces signaux par la station hydroacoustique HA4. Dans un premier temps, nous avons cherché à connaître si le secteur azimutal où pouvait se situer l'animal modifiait la distance de détection et dans quelles mesures. Pour ce calcul nous avons modélisé la propagation d'un signal avec une valeur d'intensité reçue minimum de 70 dB dans tous les secteurs azimutaux des deux réseaux (pas de 10°) et tous les mois de l'année.

4.3.6.2. Distance de détection des baleines

Nous avons ensuite modélisé la propagation du son pour calculer, d'après les pertes d'intensités estimées, la distance à laquelle les baleines bleues Antarctique et pygmées peuvent se situer par rapport aux réseaux. Tous les mois, pour chaque espèce et à chaque station nous avons calculé cette distance en utilisant les intensités des cris reçus aux hydrophones et résumé dans les figures 3. 14, 3.15, 3.16 et 3.17. Nous avons choisi d'estimer ces variations mensuelles des distances de détection dans un axe nord-sud (i.e. secteur azimutal de 10° pour le réseau nord et de 180° pour le réseau sud) pour apprécier le mouvement latitudinale des baleines.

CHAPITRE III

RESULTATS & DISCUSSION



PARTIE 1 :

LES SIGNATURES ACOUSTIQUES DES GRANDES BALEINES ENREGISTREES AU SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN

Cette partie présente et discute les principaux résultats obtenus pour répondre à la première question de ce travail de thèse « **QUELLES ESPECES DE GRANDES BALEINES SONT PRESENTES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL ?** ».

1.1. Résultats

1.1.1. Analyses des enregistrements

Le dépouillement des enregistrements de la station HA4 a permis de reconnaître 11 signaux acoustiques différents modulés en fréquence et/ou en amplitude correspondant aux caractéristiques des signaux émis par les grandes baleines. Une comparaison de ces signaux avec les spectrogrammes disponibles dans la littérature a permis d'identifier avec certitudes 9 signatures acoustiques correspondant à des émissions sonores de 2 espèces de grandes baleines. L'origine biologique de 2 signatures acoustiques n'a pas pu être identifiée (Tableaux 3.1 à 3.9). Dans la suite de ce travail, j'ai fait le choix de focaliser mes analyses sur 4 signatures acoustiques présentes régulièrement dans les enregistrements : les signatures acoustiques complètes et incomplètes émis par la baleine bleue Antarctique et les signatures acoustiques complètes et incomplètes de type « Madagascar » émis par la baleine bleue pygmée. La motivation principale de ce choix était que ces 4 signaux étaient récurrents dans tous les enregistrements et présentaient une forte intensité qui dominait entièrement certaines bandes de fréquences. Par conséquent, je ne décrirai que très brièvement les autres signatures acoustiques détectées.

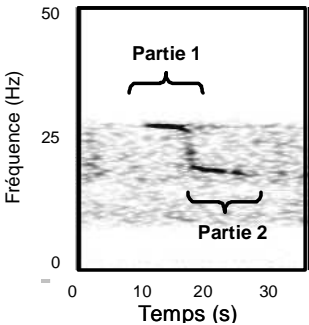
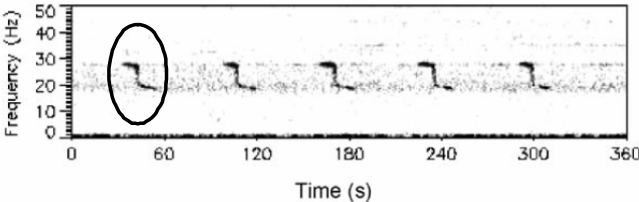
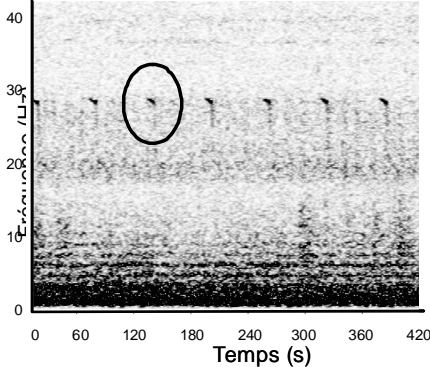
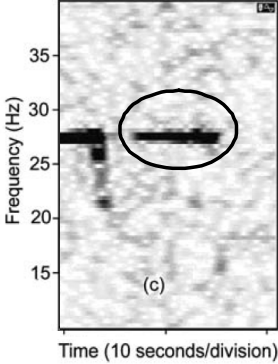
Tableau 3.1 : Principales caractéristiques des signatures acoustiques de grandes baleines repérées dans les enregistrements de la station HA4 et espèces associées d'après la littérature.

	Fréquences principales (Hz)	Durées(s)	Signatures acoustiques	Espèces et associées	Références principales
[A]	de 28 à 20	~16	Cri complet (long)	baleine bleue Antarctique	Širović et al 2004, Stafford et al 2004, Rankin et al 2005
[B]	28	~8	Cri incomplet (court)	baleine bleue Antarctique	Stafford et al 2004, Rankin et al 2005
[C]	35 et 25	~90	« <i>Type Madagascar</i> » Cri complet (2 parties)	baleine bleue pygmée	Ljungblad et al 1998
[D]	35	~17	« <i>Type Madagascar</i> » Cri incomplet (1 partie)	baleine bleue pygmée	Ljungblad et al 1998
[E]	70	~14	« <i>Type Australie</i> »	baleine bleue pygmée	McCauley 2004
[F]	de 80 à 25	~3	« <i>D calls</i> »	baleine bleue	Rankin et al 2005
[G]	de 67 à 30	~5	« <i>Arch sound</i> »	baleine bleue	Mellinger & Clark 2004
[H]	20	~2	Impulsion à 20Hz	rorqual commun	Širović et al 2004, Nieukirk et al 2004
[I]	100	~2	« <i>short pulse</i> »	rorqual commun	Širović et al 2004
[J]	50	~3	?	?	?
[K]	60	~2	?	?	?

1.1.2. Signatures acoustiques de baleine bleue Antarctique

Deux signatures acoustiques de baleines bleues Antarctique ont été observées dans les enregistrements de la station HA4 (Tableaux 3.1 et 3.2). Après comparaison avec la littérature, la première signature acoustique (Tableau 3.2 [A]) correspond au « cri long » ou « complet » caractéristique de l'espèce, qui peut se décomposer en deux parties. La seconde signature acoustique (Tableau 3.2 [B]) correspond à la première partie de ce cri long (Rankin et al 2005). Cette signature acoustique est appelée « cri court » ou « incomplet ».

Tableau 3.2 : Spectrogrammes des signatures acoustiques de baleine bleue Antarctique repérées dans les enregistrements de la station HA4 et reconnues d'après les spectrogrammes disponibles dans la littérature (cf. Tableau 3.1).

Signaux repérés dans les enregistrements de la station HA4	Signaux correspondants et espèce associée d'après la littérature
<p data-bbox="467 495 507 524">[A]</p>  <p data-bbox="316 909 659 954">FFT 1024 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming</p>	<p data-bbox="786 495 1382 555">Série de « cris complets » de <u>baleine bleue Antarctique</u> extrait de Stafford et al 2004</p>  <p data-bbox="914 909 1254 954">FFT 512 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming</p>
<p data-bbox="467 1003 507 1032">[B]</p>  <p data-bbox="320 1525 659 1568">FFT 1024 points, recouvrement de 93,75, fenêtre de Hamming</p>	<p data-bbox="820 1003 1347 1064">« Cris incomplets » de <u>baleine bleue Antarctique</u> extrait de Rankin et al 2005</p>  <p data-bbox="1011 1525 1155 1547">FFT 32768 points</p>

Au total, 318 cris complets de baleine bleue Antarctique (BMi) et 122 cris incomplets (BMie) ont été mesurés pour définir les caractéristiques (fréquence et durée) des différentes parties que compose ce signal (Tableau 3.3 [A] et [B]).

Le cri complet (Tableau 3.3 [A]), peu se décomposer en 2 parties, correspondant à des signaux de forte intensité et faiblement modulés en fréquence (< 1 Hz) à 27,5 Hz et à 19,5 Hz, séparées par un signal de transition court et de très faible amplitude. Le cri complet a une durée totale de $17,1 \pm 2,2$ s. Le cri incomplet (Tableau 3.3 [B]) est un unique signal de forte intensité et faiblement modulé en fréquence (< 1 Hz) à 27,5 Hz ; il peut être parfois suivi par une partie du signal de transition. Ce cri incomplet correspondrait à la partie 1 du cri complet (Stafford et al 2004, Rankin et al 2005). Les cris complets ou incomplets sont répétés pour former des séries de cris. Bien que la majorité des séries de cris ne contiennent qu'un seul type de cri, il arrive que les deux types de cris (complets et incomplets) soient présents dans une même série. Dans les séries de cris sélectionnées et mesurées pour cette étude (n=67), le nombre de cris par série est très variable (17 ± 6 cris ; [4–28]), de même que la durée des séries (1009 ± 36 s ; [217s-1661s]).

Tableau 3.3 : Mesures des principales caractéristiques (fréquence et durée) des cris complets [A] et incomplets [B] émis par la baleine bleue Antarctique.

		Moyenne (\pm écart-type)	Range	
[A] (n=318)	Durée (s)			
	Partie 1	7,2 \pm 1,3	4-11	
	Transition	2,8 \pm 0,7	1-4	
	Partie 2	7,1 \pm 2	5-13	
	Durée totale	17,1\pm2,5	12-19	
	Fréquence (Hz)			
	Partie 1	Fréquence de l'amplitude max :	27,5 \pm 0,1	27-28
		Fréquence de début :	27,9 \pm 0,3	27-28
		Fréquence de fin :	27,3 \pm 0,3	26-28
	Partie 2	Fréquence de l'amplitude max :	19,5 \pm 0,3	18-21
Fréquence de début :		19,7 \pm 0,4	18-21	
Fréquence de fin :		18,8 \pm 0,4	17-21	
[B] (n=122)	Durée (s)	9,8 \pm 1,6	7-12	
	Fréquence (Hz)			
	Fréquence de l'amplitude max :	27,5 \pm 0,1	27-28	
	Fréquence de début :	27,9 \pm 0,2	27-28	
	Fréquence de fin :	26,7 \pm 0,8	24-27	

Les intervalles de temps calculés entre deux cris consécutifs détectés automatiquement par bORie (n=88 871) ont été analysés. L'histogramme des fréquences relatives des intervalles calculés (Figure 3.1) met en évidence 3 modes : un premier mode correspondant à des intervalles compris entre 20 et 50 s et représentant 14% des intervalles mesurés ; un second mode correspondant à des intervalles compris entre 60 et 70 s et représentant 47% des intervalles

mesurés ; et enfin un troisième mode correspondant à des intervalles compris entre 80 et 800 s et représentant 39% des intervalles mesurés. La visualisation sur une centaine de spectrogrammes du contexte associé à ces différents types d'intervalles a permis de définir trois catégories d'intervalles :

- L'intervalle inter-cris court

D'une durée courte et variable ($42,1 \pm 12,5s$; [20s-50s]), il est mesuré quand plusieurs baleines acoustiquement actives ont été enregistrées au même moment (la différence d'intensité reçue entre les cris permet d'assurer que nous avons au minimum deux individus acoustiquement actifs).

- L'intervalle inter-cris moyen

Il est mesuré quand un seul individu est acoustiquement actif et il correspond à l'intervalle de temps entre deux cris successifs dans une même série. C'est l'intervalle le plus commun et le moins variable ($64 \pm 3,3s$; [60s-70s]).

- L'intervalle inter-série

D'une durée plutôt longue et très variable ($254,7 \pm 181,0s$; [80s-800s]), il correspond à la période de temps mesurée entre le dernier cri d'une série et le premier cri de la série suivante enregistrée.

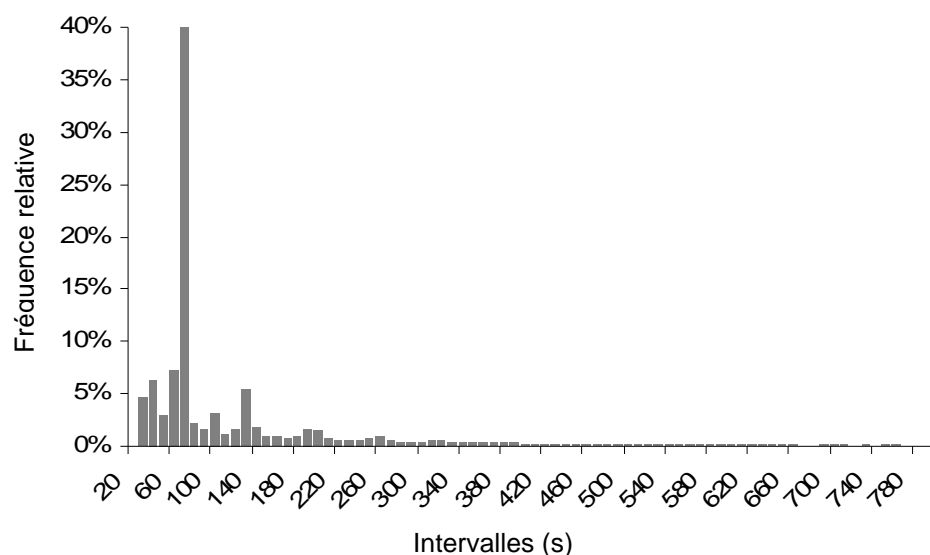


Figure 3.1 : Histogramme des fréquences relatives des intervalles entre deux cris de baleine bleue Antarctique détectés automatiquement.

1.1.3. Signatures acoustiques de baleine bleue pygmée de type « Madagascar »

Dans l’Océan Indien, trois signatures acoustiques de baleine bleue pygmée aux motifs bien distincts ont été reportées dans la littérature (Stafford et al 2005). Dans nos enregistrements, le type « Madagascar » est largement présent (Tableaux 3.1 et 3.4 [C]). Nous avons également reporté dans les enregistrements un signal hautement similaire à la première partie du signal de type « Madagascar » que nous avons associé comme telle (Tableaux 3.1 et 3.4 [D]).

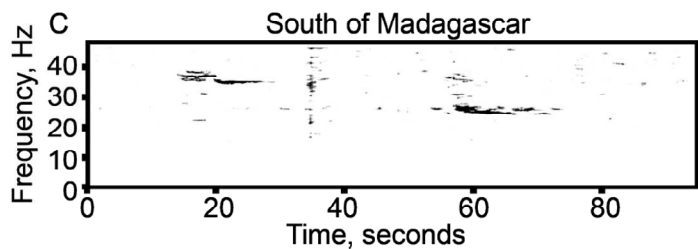
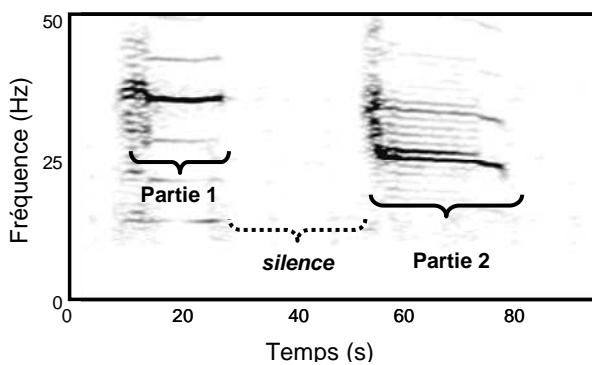
Tableau 3.4 : Spectrogramme de la signature acoustique de baleine bleue pygmée de type Madagascar repérée dans les enregistrements de la station HA4 et reconnue d’après le spectrogramme disponible dans la littérature (cf. Tableau 3.1).

Signal repéré dans les enregistrements de la station HA4

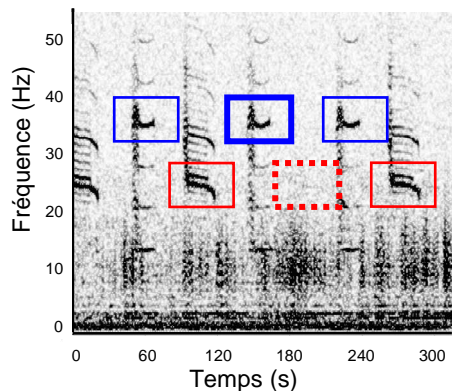
Signal correspondant et espèce associée d’après la littérature

[C]

Signal de baleine bleue pygmée de type « Madagascar » extrait de McDonald et al 2006



[D]



FFT 1024 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming

FFT 512 points, , recouvrement de 97%, fenêtre de Hamming

Au total, 105 cris de baleine bleue pygmée de type Madagascar (BMb) complets (avec les deux parties) et 20 cris de baleine bleue pygmée dit incomplets (avec uniquement la première partie, BMbe) ont été mesurés pour définir les caractéristiques (fréquence et durée) des cris (Tableau 3.5).

Pour le cri complet (Tableau 3.4 [C]), la première partie du cri est un long signal très faiblement modulé en fréquence (< 1 Hz) et dont l’amplitude maximale se situe autour de 35 Hz. Cette première partie est suivie par une période de silence. La seconde partie du cri est également un long signal composé d’un plateau très faiblement modulé en fréquence (< 1 Hz) et dont l’amplitude maximale se situe autour de 25 Hz. Les deux parties du cri sont accompagnées de fortes harmoniques. Le cri complet a une durée totale de 62,2±1,4s. Le cri incomplet (Tableau 3.4 [D]), est un unique signal de forte intensité et faiblement modulés (< 1 Hz) en fréquence à 35 Hz. Il est fortement similaire à la première partie du signal du cri complet. La majorité des séries de cris ne contiennent qu’un seul type de cri, il arrive toutefois que les deux types de cris (complets et incomplets) soient présents dans une même série, le cri incomplet correspond alors généralement à la dernière vocalisation de la série qui précède la période de silence. Le nombre de cris dans les séries sélectionnées dans cette étude (n=43) est variable (5±2 [2 – 10]), de même que la durée des séries (454±160s [163s-965s]).

Tableau 3.5 : Mesures des principales caractéristiques (fréquence et durée des cris complets [A] et incomplets [B] émis par la baleine bleue pygmée de type Madagascar.

		Moyenne (±écart-type)	Range	
[A] (n=105)	Durée (s)			
	Partie 1	16,9±1,8	8-24	
	<i>silence</i>	~20		
	Partie 2	20,2±1,8	14-24	
	Durée totale	62,2±1,4	56-65	
[A] (n=105)	Fréquence (Hz)			
	Partie 1	Fréquence de l'amplitude max :	35,2±0,2	35-36
		Fréquence de début :	35,3±0,2	35-36
		Fréquence de fin :	35,4±0,2	35-36
	Partie 2 (plateau)	Fréquence de l'amplitude max :	25,0±0,1	24-27
		Fréquence de début :	25,7±0,3	24-27
Fréquence de fin :		24,2±0,2	24-26	
[B] (n=20)	Durée (s)	16,5±1,6	10-23	
	Fréquence (Hz)			
	Fréquence de l'amplitude max :	35,2±0,2	35-36	
	Fréquence de début :	35,3±0,2	35-36	
	Fréquence de fin :	35,4±0,2	35-36	

Comme pour les baleines bleues Antarctique, les intervalles de temps calculés entre deux cris consécutifs détectés automatiquement par bORie (n=36 055) ont été analysés. L'histogramme des fréquences relatives des intervalles calculés (Figure 3.2) met en évidence 3 modes et, comme pour les baleines bleues Antarctique, les mêmes catégories d'intervalles ont été définies. L'intervalle inter-cris court représente 9% des intervalles mesurés ; il a une durée variable ($79,2 \pm 6,4s$; [60s-90s]), et est associé à l'enregistrement de plusieurs baleines acoustiquement actives au même moment. L'intervalle inter-cris moyen représente 55% des intervalles mesurés, il a une durée très peu variable ($99,1 \pm 3,1s$; [100s-120s]), c'est l'intervalle de temps entre deux cris successifs émis dans une même série. Enfin, l'intervalle inter-série long est variable ($238,5 \pm 150,2s$; [130s-900s]) et représente 37% des intervalles mesurés.

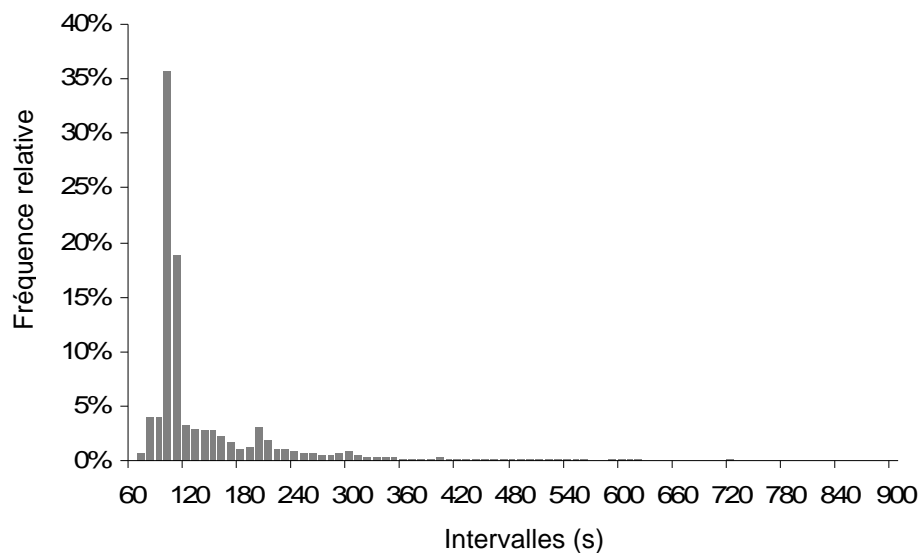


Figure 3.2 : Histogramme des fréquences relatives des intervalles entre deux cris de baleine bleue pygmée de type Madagascar détectés automatiquement.

1.1.4. Les autres signatures acoustiques

D'autres signatures acoustiques observées occasionnellement dans les enregistrements de la station hydroacoustique HA4 ont été isolées et caractérisées afin d'identifier les espèces de grandes baleines émettrices de ces signaux.

1.1.4.1. Signature acoustique de baleine bleue pygmée de type « Australie »

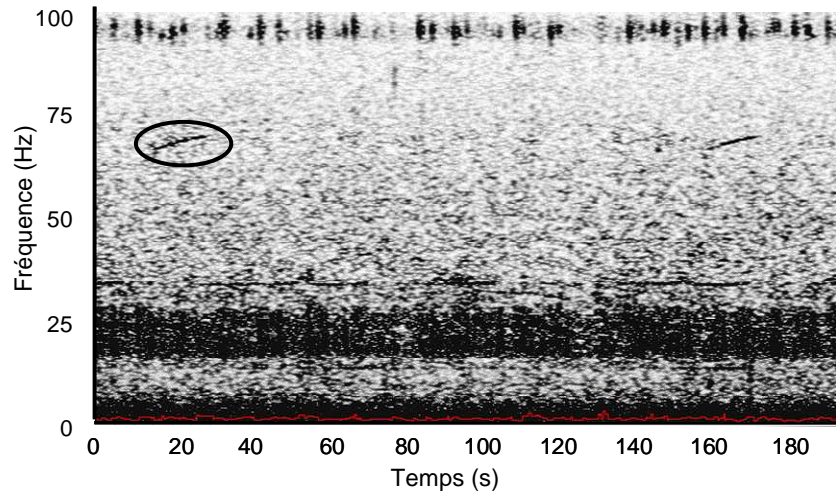
La signature acoustique de type « Australie » de la baleine bleue pygmée se compose de trois longs signaux émis successivement et peu modulés en fréquence (21-22Hz pour le signal I, 20-26 Hz pour le signal II et 19 Hz pour le signal III ; Tableaux 3.6). Le second signal présente la plus forte intensité et chaque signal est accompagné de fortes harmoniques (McCauley et al 2001, 2004). Dans cette étude, sur les spectrogrammes des enregistrements de la station HA4, on ne distingue pas les trois signaux principaux que composent cette signature acoustique à leurs fréquences fondamentales; la bande fréquentielle de 19 à 28 Hz étant fortement couverte par les signatures acoustiques de baleines bleues Antarctique et pygmées de type Madagascar. Cependant, une harmonique à 70 Hz appartenant à la seconde composante de cette signature acoustique a été repérée occasionnellement dans les enregistrements (Tableaux 3.1 [E] et 3.6). Ce signal est long ($14,6 \pm 1,6$ s) et augmente légèrement en fréquence (de $69,2 \pm 0,6$ à $72,5 \pm 0,3$ Hz), le maximum d'énergie se situe autour de 70 Hz. Cette harmonique est souvent utilisée pour distinguer la présence de cette espèce dans des conditions où le RSB est faible (McCauley et al 2004).

Tableau 3.6 : Spectrogramme de la signature acoustique de baleine bleue pygmée de type Australie repérée dans les enregistrements de la station HA4 et reconnue d'après les spectrogrammes disponibles dans la littérature (cf. Tableau 3.1)

Signaux repérés dans les enregistrements de la station HA4

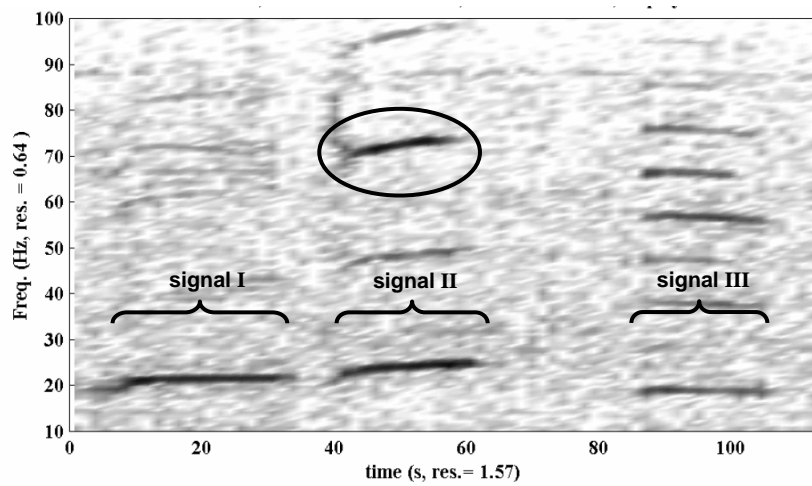
Signaux correspondants et espèce associée d'après la littérature

[E]



FFT 1024 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming

Vocalisation de baleine bleue pygmée de type « Australie »
extrait de McCauley et al 2000



1.1.4.2. Signatures acoustiques « hautes fréquences »

De nombreux signaux, fortement modulés dans les plus hautes fréquences des enregistrements ont été repérés à des périodes données. Ces signaux de courte durée sont très variables en forme et en fréquence. Ici, j'ai fait le choix d'en distinguer deux types :

- *Le « D calls » :*

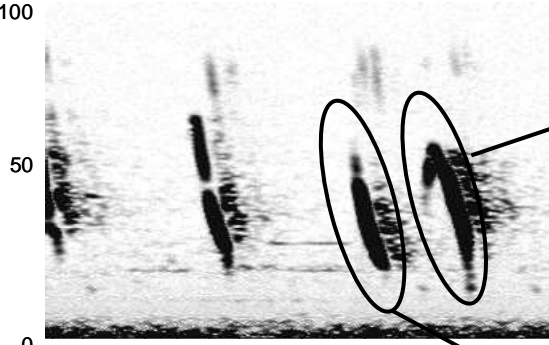
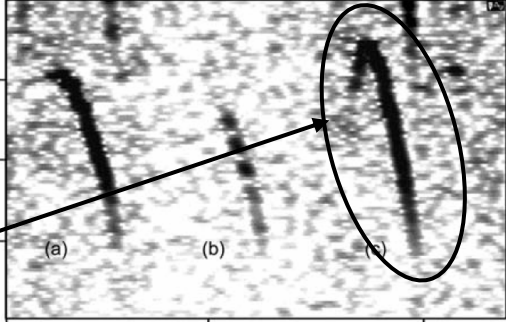
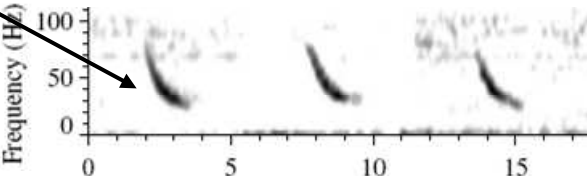
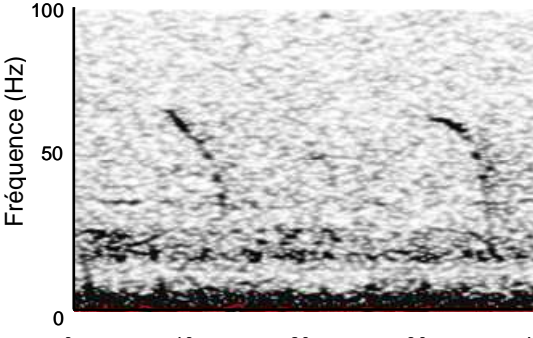
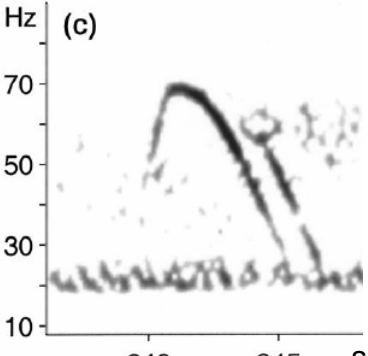
C'est un signal court ($3,5 \pm 0,6$ s) qui diminue en fréquence $77,2 \pm 10,1$ à $24,7 \pm 6,7$ Hz (Tableaux 3.1 et 3.7 [F]) durant son émission. Son rythme de production est variable, il peut être émis seul (rare) ou en série avec une fréquence d'émission plus ou moins régulière. Dans la littérature, ce signal a été attribué comme étant une signature acoustique de baleine bleue (Rankin et al 2005) ou de rorqual boréal (Baumgartner et al 2008).

- *Le « arch sound »*

C'est un signal « hautes fréquences » également mais d'une durée légèrement plus longue que le *D calls* ($5,1 \pm 0,6$ s). Il présente un léger plateau au début de signal à la fréquence maximale ($67,8 \pm 1,7$ Hz) puis diminue jusqu'à $31,9 \pm 2,2$ Hz (Tableaux 3.1 et 3.7 [G]). Dans la littérature, ce signal a été attribué comme une signature acoustique de baleine bleue (Mellinger et al 2003).

Dans nos enregistrements, ces deux signaux ont été fréquemment repérés en association avec des cris complets ou incomplets de baleine bleue Antarctique et des signatures acoustiques de type Madagascar émis par la baleine bleue pygmée.

Tableau 3.7 : Spectrogrammes des signatures acoustiques « hautes fréquences » de baleine bleue et/ou de rorqual boréal repérées dans les enregistrements de la station HA4 et reconnues d’après les spectrogrammes disponibles dans la littérature (cf. Tableau 3.1)

Signaux repérés dans les enregistrements De la station HA4	Signaux correspondants et espèces associées d’après la littérature
<p data-bbox="419 465 459 495">[F]</p>  <p data-bbox="256 1137 624 1189">FFT 512 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming</p>	<p data-bbox="932 450 1262 510">« <i>D calls</i> » de <u>baleine bleue</u> extrait de Rankin et al 2005</p>  <p data-bbox="1011 887 1235 936">Time (10 seconds/division) FFT 2048 points,</p> <p data-bbox="1075 969 1118 999">Ou</p> <p data-bbox="751 1037 1445 1099">Série de signatures acoustiques dites « basses fréquences » de <u>rorqual boréal</u> extrait de Baumgartner et al 2008</p>  <p data-bbox="810 1149 1401 1323">Frequency (Hz) Time (seconds)</p>
<p data-bbox="448 1435 488 1464">[G]</p>  <p data-bbox="193 1921 751 1953">FFT 1024 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming</p>	<p data-bbox="932 1429 1321 1491">« <i>Arch sound</i> » de <u>baleine bleue</u> extrait de Mellinger et al 2003</p>  <p data-bbox="967 1921 1289 1953">FFT 256 points, fenêtre de Hamming</p>

1.1.4.3. Signatures acoustiques de rorqual commun

Des signatures acoustiques caractéristiques du rorqual commun ont été détectées à la station HA4. Le signal principal enregistré est une impulsion courte ($1,3 \pm 0,2$ s) qui varie en fréquence durant son émission (de $30,1 \pm 1,5$ à $16,2 \pm 1,1$ Hz), l'énergie principale se situe autour de 20 Hz ; d'où son nom « l'impulsion de 20 Hz » (Tableaux 3.1 et 3.8 - [H]). Ce signal est répété avec des intervalles inter-cris courts ($IC_{court} = 10,2 \pm 1,1$ s) ou longs ($IC_{long} = 21 \pm 7$ s). Cette répétition plus ou moins régulière des impulsions de 20 Hz forme des séries de cris de durée variable. On peut alors distinguer des séries longues ($882 \pm 54,6$ s ; 77 ± 10 cris), moyennes (483 ± 72 s ; 35 ± 5 cris) ou courtes (134 ± 45 s ; 12 ± 4 cris) interrompues par des périodes de silence ($89,6 \pm 12,7$ s). Ces différentes séries peuvent se décomposer en petites séquences de 2 à 6 cris émis avec un intervalle inter-cris court, interrompues par des intervalles inter-cris longs. Parfois, durant un intervalle inter-cris long, un signal plus court et très peu modulé est visible ; ce signal est nommé « *backbeat* », et a une fréquence principale autour de 15 Hz (Tableaux 3.1 et 3.8 [H]). L'impulsion de 20 Hz est parfois associée à un autre signal émis simultanément, avec la même durée dans des fréquences hautes. Ce signal, très peu modulé en fréquence (de $101,5 \pm 0,8$ à $96,7 \pm 0,4$ Hz), présente une fréquence principale autour de 99 Hz et se nomme « *short pulse* » (Tableaux 3.1 et 3.8 [I]).

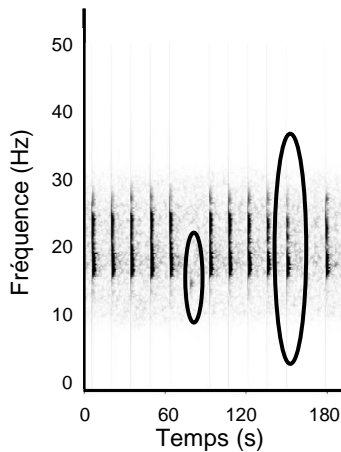
Tableau 3.8 : Spectrogrammes des signatures acoustiques de rorqual commun repérées dans les enregistrements de la station HA4 et reconnues d’après les spectrogrammes disponibles dans la littérature (cf. Tableau 3.1)

Série de signaux repérés dans les enregistrements de la station HA4

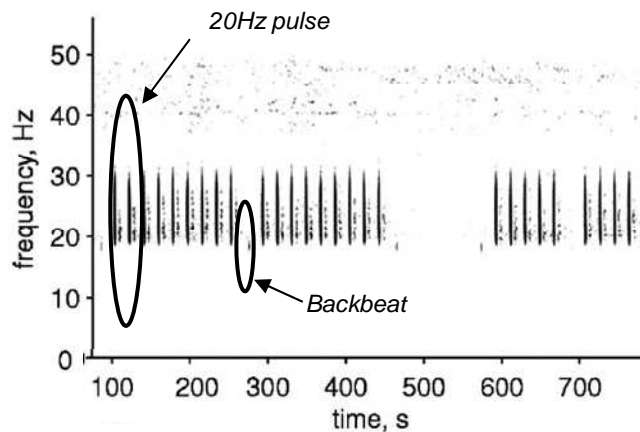
Signaux correspondants et espèce associée d’après la littérature

[H]

Séries de « 20Hz Pulse » et de « backbeat » de rorqual commun extrait de Nieu Kirk et al 2004



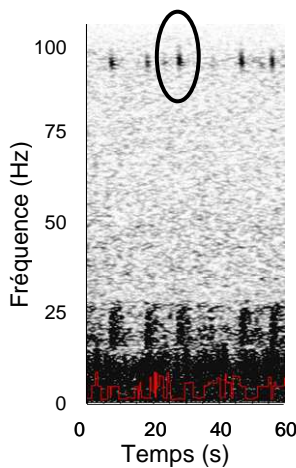
FFT 1024 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming



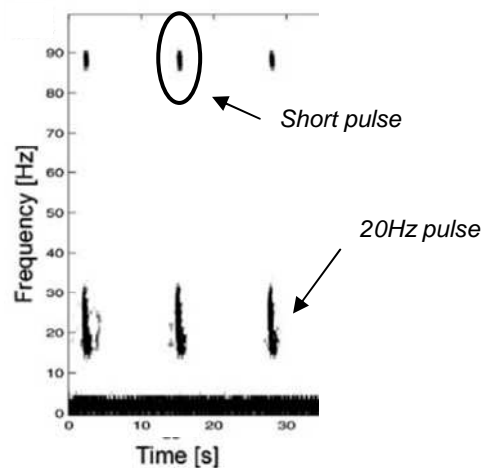
FFT 512 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming

[I]

Séries de « short pulse » de rorqual commun associés à des « 20Hz pulse » extrait de Širović et al 2004



FFT 1024 points, recouvrement de 93,75%, fenêtre de Hamming

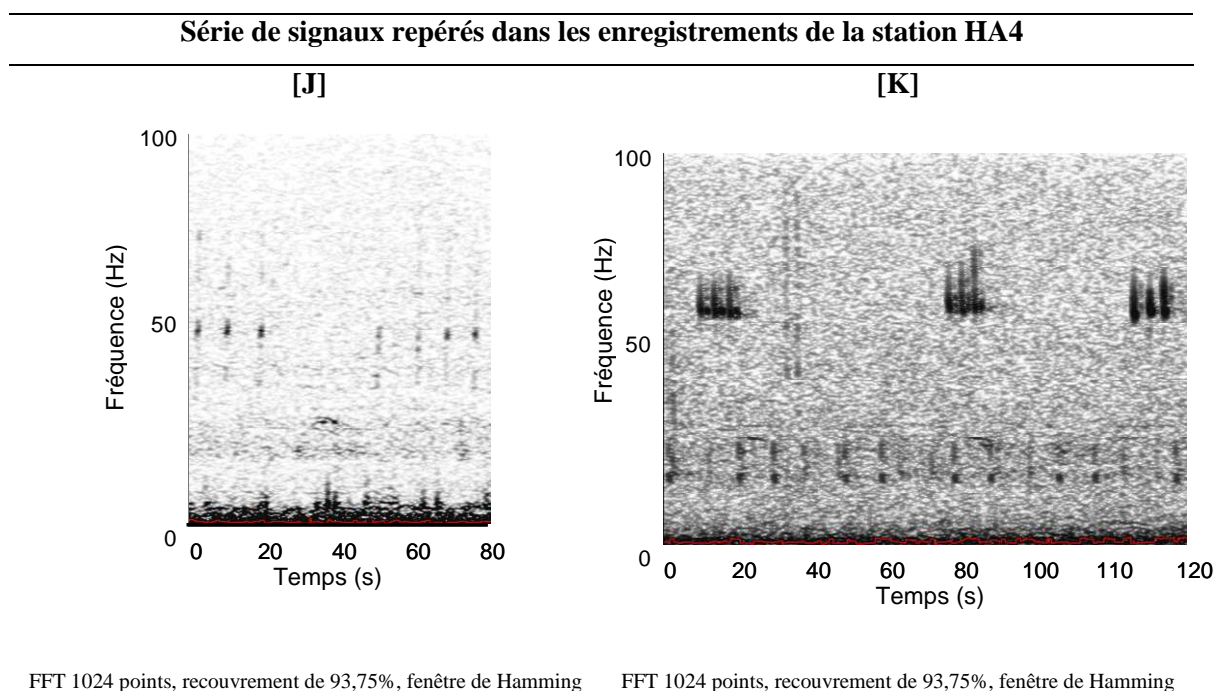


FFT 500 points, recouvrement de 90%, fenêtre de Hanning

1.1.4.4. Signatures acoustiques non associées

Deux autres types de signaux ont été repérés dans les enregistrements mais n'ont pas pu être associés à une espèce de grande baleine d'après la littérature. Le premier signal (Tableaux 3.1 et 3.9 [J]) est court ($2,6 \pm 0,4$ s) et présente une énergie principale autour de 50 Hz (de $51,2 \pm 1,1$ à $46,1 \pm 1,2$ Hz). Il est répété régulièrement ($7 \pm 1,3$ s) pour former des séries composées d'une dizaine de cris. Le second signal (Tableaux 3.1 et 3.9 [K]) a été enregistré avec des signatures vocales de rorqual commun. Ce signal, de courte durée ($2,5 \pm 0,5$ s) et de forte intensité autour de 61 Hz (variation de $67,4 \pm 2,2$ à $58,6 \pm 1,2$ Hz), est répété régulièrement ($IC=1,8 \pm 0,3$ s) pour former des courtes séries composées 2 ou 3 cris ($IS=56,3 \pm 2$ s).

Tableau 3.9 : Spectrogrammes des signatures acoustiques repérées dans les enregistrements de la station HA4 mais non associées à une espèce d'après les spectrogrammes disponibles dans la littérature (cf. Tableau 3.1)



1.2. Discussion

Les signaux acoustiques repérés

De par les données historiques récoltées durant la chasse à la baleine ou les observations visuelles conduites depuis une trentaine d'années dans l'hémisphère sud, nous savons que six espèces de baleines à fanons sont présentes dans la partie Indienne de l'Océan Austral : la baleine bleue, le rorqual commun, le rorqual boréal, le petit rorqual, la baleine à bosse et la baleine franche australe. L'observatoire d'écoute passive utilisé dans cette étude a détecté, sur une année d'enregistrement, des signatures acoustiques indicatrices de la présence de deux de ces six espèces de grandes baleines à savoir la baleine bleue et le rorqual commun. Des signatures acoustiques associées au rorqual boréal ont peut être été repérées dans les enregistrements mais les caractéristiques de la durée et de la fréquence finale du signal différent de celle reportées dans la littérature (durée : $3,5 \pm 0,6$ s [cette étude] vs $1,4 \pm 0,4$ s [Baumgartner et al 2008] ; fréquence finale : $24,7 \pm 6,7$ Hz [cette étude] vs $34,0 \pm 6,2$ Hz [Baumgartner et al 2008]). Cette signature acoustique « basse fréquence » de rorqual boréal n'a jamais été enregistrée dans l'hémisphère sud (Rankin & Barlow 2007, Baumgartner et al 2008); seuls des signaux supérieurs à 200 Hz ont été enregistrés en présence de rorquals boréals à proximité de la péninsule Antarctique (McDonald et al 2005). Dans cette étude, la fréquence d'échantillonnage du système d'écoute ($f_e=250$ Hz) ne permettait pas d'enregistrer ces signaux typiques. De même que la bande fréquentielle du système d'enregistrement ne couvrait qu'une petite partie du répertoire vocal du petit rorqual (60 Hz-20 kHz), de la baleine à bosse (20 Hz-40 kHz) et de la baleine franche australe (50-200 Hz). Aucune signature acoustique de ces trois espèces n'a été visualisée, même partiellement, sur les spectrogrammes des enregistrements de la station HA4. Il est néanmoins possible que ces espèces soient présentes dans le sud-ouest de l'Océan Indien mais les capacités de notre système d'écoute ne permettent pas de détecter leur présence via leur signature acoustique.

Les signaux acoustiques de baleine bleue

La présente étude révèle, par leurs signatures acoustiques distinctes, la présence de deux-sous-espèces de baleine bleue dans la partie Indienne de l'Océan Austral : la baleine bleue Antarctique et la baleine bleue pygmée. Cette étude révèle également la présence de deux populations de baleine bleue pygmée dominée par le type Madagascar avec de rare visite du type Australien. Actuellement, basées sur des différences morphologiques, génétiques ou géographiques, les baleines bleues sont divisées en 4 sous-espèces (Rice 1998) et dans certaines régions du globe, ces sous-espèces peuvent être subdivisées en groupe, stock ou sous-populations, comme c'est le cas pour la baleine bleue dans l'Océan Pacifique ; leur distinction acoustique est alors un bon moyen de les différencier (Stafford et al 2001, Mellinger et al 2007). On ne distingue actuellement pas moins de 9 signatures acoustiques régionales typiques attribuées à la baleine bleue (McDonald et al 2006) et dans le secteur Indien, pas moins de 4 signatures distinctes ont été enregistrées. Deux d'entre elles sont associées à la présence de la sous-espèce de baleine bleue pygmée (Type Madagascar et type Australie), une est associée à la présence de la sous-espèce de baleine bleue Antarctique et une est associée à la présence de la sous-espèce de baleine bleue type Sri-Lanka (Figure 1.6). Ces signatures acoustiques ont une base commune : elles sont de basses fréquences (< 100 Hz), de longues durées (> 10 s) et de fortes intensités. Durant l'émission, le signal est modulé en fréquence et en amplitude formant un motif particulier. Les signaux sont répétés pendant plusieurs minutes avec un intervalle de temps régulier. A partir de ces bases communes, on distingue, selon les régions ou les océans, des différences dans la forme, dans la composition, dans la durée et dans la fréquence du signal. Ces signatures acoustiques régionales sont stables dans le temps, certaines ayant été reportées depuis plus de 30 ans (e.g. la baleine bleue dans le nord-est de l'Océan Pacifique ; Thompson et al 1965, McDonald et al 2001). Peu d'études ont reportés des différences individuelles dans les signatures vocales des baleines bleues (Clark 1995, Stafford & Moore 2005) et beaucoup de travail reste à faire dans ce domaine.

La sous-espèce Antarctique

Dans notre étude, deux signatures acoustiques caractéristiques des baleines bleues Antarctique ont été très souvent enregistrées dans la partie Indienne de l'Océan Austral : le cri complet (ou long) et le cri incomplet (ou court). Les caractéristiques de ces signaux sont similaires à celles reportées dans la littérature pour des cris enregistrés tout autour de

l'Antarctique (Ljungblad et al 1998, Širović et al 2004, Rankin et al 2005, McKay et al 2005) et dans les basses latitudes des océans Pacifique et Indien (Stafford et al 1999a, 2004, McCauley et al 2004). Ces signaux n'avaient jamais encore été reportés dans le sud-ouest de l'Océan Indien auparavant.

Le cri complet de la baleine bleue Antarctique peut être décomposé en deux parties dont le maximum d'énergie se situe dans la première partie du signal soit à 28 Hz. Le cri incomplet est composé uniquement de la première partie du cri complet. Dans cette étude, l'enregistrement des deux signaux dans une même série de cris et avec une intensité reçue similaire confirme que le signal incomplet ne correspond pas à un signal complet dont la deuxième partie (la partie la plus basse en fréquence) serait atténuée par la propagation du signal de la source d'émission (i.e. la baleine) au système d'écoute (i.e. l'hydrophone). Ces deux signatures acoustiques sont bien distinctes et cette grande variabilité dans la signature acoustique à 28 Hz des baleines bleues Antarctique avait déjà été soulignée auparavant (Rankin et al 2005) et il est actuellement difficile d'expliquer pourquoi ces grandes baleines utilisent deux signaux si ressemblant. En combinant des observations visuelles et acoustiques, il serait peut être possible de mieux comprendre dans quels contextes ces deux types de signaux sont émis (alimentation, plongées, repos etc.) ou par quels individus (sexe, âge, statut reproducteur, etc.).

Le maximum d'énergie à 28 Hz est le caractère commun à ces deux signaux. La faiblesse des écarts-types issus des mesures des caractéristiques des signaux enregistrés à différentes périodes de l'année suggère que cette partie du signal est stable et sans différence inter-individuelle. Ce critère permet alors d'associer ces signaux avec confiance à la baleine bleue Antarctique. Pour ces raisons, il a été établi que tout signal de 28 Hz long et très peu modulé en fréquence peut être associé à la présence de baleine bleue Antarctique dans l'Océan Austral méridional (Rankin et al 2005). Notre étude montre ici qu'il est possible d'établir la même hypothèse dans le secteur Indien de l'Océan Austral. Ceci peut être très utile pour confirmer rapidement la présence de baleine bleue Antarctique dans des séries d'enregistrements où le RSB ne permettrait pas de distinguer entièrement le cri complet dans son intégralité. De plus, en combinant des observations acoustiques et visuelles et en se focalisant dans la bande fréquentielle de 28 Hz, il devient possible, sur le terrain de confirmer rapidement la présence de baleine bleue Antarctique dans un secteur ou de distinguer deux espèces ou sous-espèces de grandes baleines difficilement identifiables en mer.

Dans l'Océan Austral méridional, les signatures acoustiques de baleine bleue Antarctique enregistrées n'étaient pas émises en série (Rankin et al 2005). En revanche, autour de la péninsule Antarctique et dans les basses latitudes, ces signaux ont été enregistrés en série (Ljungblad et al 1998, Stafford et al 2004) mais avec un nombre de cris par série inférieur aux valeurs reportées dans cette étude (17 ± 6 cris, de 4 à 28 [cette étude] vs $6,5 \pm 3,4$ cris, de 1 à 16 [Stafford et al 2004]). Actuellement, on ignore les raisons pour lesquelles les signaux des grandes baleines sont ou non émis en série. Cette caractéristique peut possiblement être liée à l'activité de l'animal pendant son activité vocale. En effet, les périodes d'interruptions entre deux séries de cris correspondent à la respiration de l'animal en surface (Walker 1963, Patterson & Hamilton 1964, Northrop et al 1971, Cummings et al 1986, Watkins et al 1987); par conséquent, il est possible d'utiliser la longueur des séries pour mesurer le rythme et la durée des plongées des baleines bleues. Dans notre étude, la durée moyenne des séries (1009 ± 36 s ; [217s-1661s]) est, par ailleurs, très cohérente avec les durées de plongée reportées dans la littérature notamment durant les périodes d'alimentation (Oleson et al 2007a, 2007b), ce qui pourrait suggérer que les baleines bleues enregistrées depuis l'archipel Crozet étaient engagées dans un comportement d'alimentation.

La sous-espèce pygmée

Dans notre étude, trois signatures acoustiques caractéristiques des baleines bleues pygmées ont été enregistrées dans la partie Indienne de l'Océan Austral : le type « Madagascar » complet, le type « Madagascar » incomplet et une harmonique du type « Australie ». Les types Madagascar complets et incomplets sont les signaux de baleine bleue pygmée les plus communément enregistrés à la station HA4. Le type Madagascar complet est similaire à la signature acoustique émise par des baleines bleues pygmées enregistrées au large de Madagascar (Ljungblad et al 1998). Le type Madagascar incomplet n'avait jamais été reporté auparavant mais sa grande similarité et sa présence à la place d'un cri Madagascar complet dans les séries de cris enregistrées nous permettent de l'associer avec confiance à la baleine bleue pygmée de type Madagascar. Cette sous-espèce ne semble pas systématiquement émettre son signal avec les deux parties distinctes qui le compose et les raisons à cela sont actuellement inconnues. Le signal incomplet étant souvent présent à la fin d'une série et avant la période de respiration en surface, il est possible d'imaginer qu'il soit lié à l'activité de la baleine ou encore qu'il indique une information ou un statut aux autres congénères. Ces signatures acoustiques

n'avaient jamais été reportées en zone subantarctique auparavant et notre base de données acoustique est la plus importante disponible actuellement concernant ces signaux.

Dans les enregistrements, une harmonique de la signature acoustique de baleine bleue pygmée de type Australie a été enregistrée occasionnellement et uniquement sur le réseau nord. L'enregistrement de cette signature vocale a dans notre étude, montré, pour la première fois, une présence de quelques baleines bleues pygmées « d'Australie » à l'ouest de l'Océan Indien. Bien évidemment, ceci est à vérifier par rapport à la capacité de détection de notre réseau, mais le faible nombre de détection reporté ici laisse supposer que le système d'écoute ne doit pas détecter les populations de l'ouest de l'Australie qui sont acoustiquement très actives en particulier durant l'été austral (McCauley et al 2001, 2004). Par conséquent, la présence de cette signature vocale révèle peut-être un mouvement longitudinal des individus de l'ouest de l'Australie vers le sud-ouest de l'Océan Indien.

Les signaux « hautes fréquences »

Pendant l'émission des cris caractéristiques des baleines bleues Antarctique et pygmées, de signaux acoustiques ont été repérés dans les hautes fréquences des enregistrements de la station HA4. Ces signaux de courte durée présentent une grande variation dans leur forme et dans leur modulation en fréquence. Parmi ces signaux et d'après la littérature, nous avons distingué le *D calls* (Rankin et al 2005, Oleson et al 2007b) et le *arch sound* (Mellinger & Clark 2003). Ces signaux ont été détectés en présence de baleine bleue dans différents océans du monde et plus particulièrement dans les zones connues d'alimentation des grandes baleines notamment en Antarctique (Rankin et al 2005, Širović 2006), dans l'estuaire du St Laurent (le « *downsweep audible call* » Berchok et al 2006), dans l'Océan Pacifique (le « *short pulse* » Thompson et al 1996, le « *type IV* » Stafford et al 2001 ou le « *D calls* » ; McDonald et al 2001, Oleson et al 2007) et dans l'Océan Atlantique (le « *arch sound* » ; Mellinger & Clark 2003, Nieurkirk et al 2004). Oleson et al (2007) ont, par ailleurs, associé ces signaux particuliers à un comportement d'alimentation des baleines bleues. En effet, ces signaux ont été enregistrés par plusieurs baleines (mâles et femelles), proches les unes des autres, durant les plongées peu profondes (< 35 m) qui suivent les plongées alimentaires. Différents auteurs ont également remarqué ce contexte et ont associé ce signal à un son de contact entre les individus (McDonald et al 2001, Thode et al 2000, Bass & Clark 2002, Rankin et al 2005, Berchok et al 2006), en

soulignant que ces signaux hautes fréquences sont généralement émis en même temps que les signaux basses fréquences caractéristiques des baleines bleues. En Antarctique, ces signaux avaient déjà été enregistrés en même temps que des signaux caractéristiques de baleine bleue Antarctique (Rankin et al 2005, Širović et al 2005) mais, dans cette étude, c'est la première fois qu'ils sont reportés en présence de signaux caractéristiques de baleine bleue pygmée. De par le monde, nous avons vu que les signatures acoustiques basses fréquences des baleines bleues présentent des caractéristiques communes mais leurs motifs sont distincts géographiquement ou régionalement. Ici, nous voyons que ces signaux de hautes fréquences associés à un comportement d'alimentation ne semblent pas présenter de différences géographiques ou régionales et sont émis dans le monde par, au minimum, trois sous-espèces de baleines bleues. Cette signature acoustique serait alors un signal commun relié possiblement à une activité que les baleines bleues partageraient à travers le monde, en l'occurrence l'alimentation. La détection de ces signaux dans nos enregistrements viendrait renforcer notre hypothèse d'activité alimentaire des baleines bleues Antarctique et pygmées dans la partie Indienne de l'Océan Austral.

Deux signatures acoustiques courtes et de hautes fréquences ont été détectées dans les enregistrements de la station HA4 mais n'ont pas pu être associées à une espèce de grande baleine. Ces signaux ont été enregistrés en même temps que des signatures vocales de baleines bleues Antarctique et de rorquals communs. Il est possible que ces signaux soient associés à ces espèces comme nous venons de le voir pour les *D calls* et les *Arch sounds* mais aucune confirmation n'est possible actuellement.

Le rorqual commun

Dans notre étude, des signatures acoustiques caractéristiques des rorquals communs ont été occasionnellement enregistrées dans la partie Indienne de l'Océan Austral suggérant une présence de cette espèce dans la zone. Le signal le plus fréquemment observé dans notre étude correspond à la description de « l'impulsion de 20 Hz » typique du rorqual commun décrite dans la littérature (Watkins et al 1987) et enregistrée dans les océans Atlantique, Pacifique et en Antarctique (Watkins et al 1987, Thompson et al 1992, Croll et al 2002, Moore et al 1998, Širović et al 2004). Ce signal n'avait jamais encore été reporté dans le sud-ouest de l'Océan Indien auparavant.

Les deux intervalles inter-cris distingués dans cette étude avaient déjà été reportés dans la péninsule Antarctique (Širović et al 2004). Plusieurs auteurs ont tenté d'associer la durée des séries et le rythme de production des cris avec le comportement des rorquals communs. Ainsi, il est établi qu'en période de reproduction, l'impulsion de 20 Hz est émise sous forme de longues séries composées d'impulsions répétées à intervalle régulier (Schevill et al 1964, Watkins et al 1987, Thompson et al 1992). Au contraire, les impulsions émises en séries de courtes durées avec un intervalle irrégulier seraient associées à un comportement d'alimentation ou de contact entre individus (Watkins 1981, McDonald et al 1995, Moore et al 1998). Cependant, des séries d'impulsions répétées à intervalle régulier ont déjà été enregistrées dans des aires d'alimentation (Clark et al 2002, Croll et al 2002, Samaran 2004, Širović et al 2004). Dans cette étude, nous avons enregistré les deux cas et il devient alors difficile d'associer un comportement particulier à ces signaux.

Dans les enregistrements de la station HA4, nous avons remarqué deux caractéristiques particulières dans les signatures vocales de rorqual commun. Premièrement, l'impulsion typique à 20 Hz est parfois associée à une impulsion autour de 99 Hz, le *short pulse*. Cette particularité avait déjà été décrite uniquement dans l'hémisphère sud, mais à une fréquence plus basse ($89,2 \pm 0,7$ Hz ; Širović et al 2004). Deuxièmement, l'impulsion typique à 20 Hz peut être suivie par une petite vocalisation vers 15 Hz, le *backbeat*. Cette petite impulsion avait déjà été enregistrée ailleurs dans le monde et en particulier dans l'hémisphère nord (Clark et al 2002, Nieurkirk et al 2004, Samaran 2004, Rebull et al 2006). Certains auteurs ont attribué cette particularité comme le résultat d'une séparation géographique (Thompson et al 1992) ou génétique (Clark et al 2002). La présence du *short pulse* dans nos enregistrements peut supposer que ce signal soit propre au rorqual commun de l'hémisphère sud avec une différence régionale dans la fréquence principale (e.g. péninsule Antarctique et sud-ouest de l'Océan Indien). En revanche, la présence du *backbeat* dans nos enregistrements semble aller à l'encontre d'une différence géographique ou génétique. Le répertoire vocal des rorquals communs nécessite d'être mieux connu et le contexte d'émission des signaux pourrait possiblement apporter les explications de la présence de certaines signatures acoustiques.

Conclusion

Dans cette première partie, en réponse à la question suivante « **QUELLES ESPECES DE GRANDES BALEINES SONT PRESENTES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL ?** », les enregistrements de la station hydroacoustique HA4 confirment la présence de la baleine bleue Antarctique, de deux populations de baleines bleues pygmées le type Madagascar et le type Australien, du rorqual commun et possiblement du rorqual boréal dans cette zone. La bande fréquentielle que couvre la station d'enregistrement ne permet pas de confirmer avec certitude la présence du rorqual boréal de même que la présence de la baleine à bosse, du petit rorqual et de la baleine franche australe.

Les trois espèces ou sous-espèces de grandes baleines détectées via leurs signatures acoustiques partagent la même aire géographique. L'étude de la variation saisonnière de ces signatures acoustiques permettra de connaître les périodes de présence de chaque espèce.

L'enregistrement de signaux de hautes fréquences durant l'émission de signatures vocales des baleines bleues Antarctique et pygmée suggère que ces deux sous-espèces s'alimentent dans la zone d'écoute.

PARTIE 2 :

VARIATION SAISONNIERE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES DES GRANDES BALEINES ENREGISTRES AU SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN

La première partie de ce travail de thèse a montré que les baleines bleues et le rorqual commun étaient les principales sous-espèces et espèces de grandes baleines enregistrées à la station hydroacoustique HA4. Cette partie présente et discute les principaux résultats obtenus pour répondre à la seconde question de ce travail de thèse « **QUAND EST-CE QUE CES SOUS-ESPECES ET ESPECES DE GRANDES BALEINES SONT PRESENTES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL? »** ».

2.1. Résultats

Les spectrogrammes de la globalité des enregistrements (Figure 2.11) ainsi que les résultats obtenus dans la partie précédente m'ont amené à faire le choix de développer des méthodes et de focaliser mes analyses sur les quatre signatures acoustiques présentes le plus fréquemment dans les enregistrements : les signatures acoustiques complètes (ou courtes) et incomplètes (ou longues) émis par la baleine bleue Antarctique et les signatures acoustiques complètes et incomplètes de type « Madagascar » émis par la baleine bleue pygmée. Je ne décrirai que très brièvement la saisonnalité des signaux acoustiques de type « Australie » émis par la baleine bleue pygmée, la saisonnalité des signaux acoustiques hautes fréquences mis par les baleines bleues et la saisonnalité des signaux acoustiques émis par le rorqual commun.

2.1.1. La baleine bleue : signaux principaux

Dans cette partie, lorsque l'on parlera de baleine bleue pygmée il s'agira uniquement du type Madagascar.

2.1.1.1. Nombre de cris

Au total, 311 633 cris de baleine bleue Antarctique et 77 972 cris de baleine bleue pygmée de type Madagascar complets et incomplets ont été détectés automatiquement avec notre détecteur de mai 2003 à avril 2004 sur les 5 hydrophones de la station HA4.

A. Différences inter-hydrophones et inter-réseaux

Les figures 3.3 et 3.4 mettent en évidence le nombre mensuels de signatures acoustiques de baleine bleue Antarctique et pygmée détectées par hydrophone ainsi que le nombre d'heures d'enregistrements disponibles pour le mois considéré.

Pour ces deux sous-espèces, il n'y a pas de différence significative dans le nombre et dans la distribution mensuelle des cris détectés entre les hydrophones d'un même réseau (test de *Kolmogorov-Smirnov* inter-hydrophones pour les réseaux nord et sud : $p > 0,05$). Par conséquent, nous avons choisi d'analyser uniquement les signaux provenant de l'hydrophone N2 pour le réseau nord et de l'hydrophone S3 pour le réseau sud.

Les enregistrements de l'hydrophone du réseau nord contiennent 2,6 fois plus de signaux acoustiques de baleine bleue Antarctique (complets et incomplets) que les enregistrements de l'hydrophone du réseau sud. La distribution mensuelle du nombre de cris détectés entre les deux réseaux est significativement différente (test de *Kolmogorov-Smirnov* inter-réseau : $p < 0,05$). Par conséquent, pour cette signature acoustique, on distinguera les deux réseaux dans l'analyse des enregistrements.

Par contre, très peu de signaux acoustiques de baleine bleue pygmée ont été détectés dans les enregistrements de l'hydrophone du réseau sud et ces cris ont été détectés ponctuellement dans l'année, le plus souvent durant quelques jours. Par conséquent, pour cette signature acoustique, les analyses se feront sur les enregistrements du réseau nord uniquement.

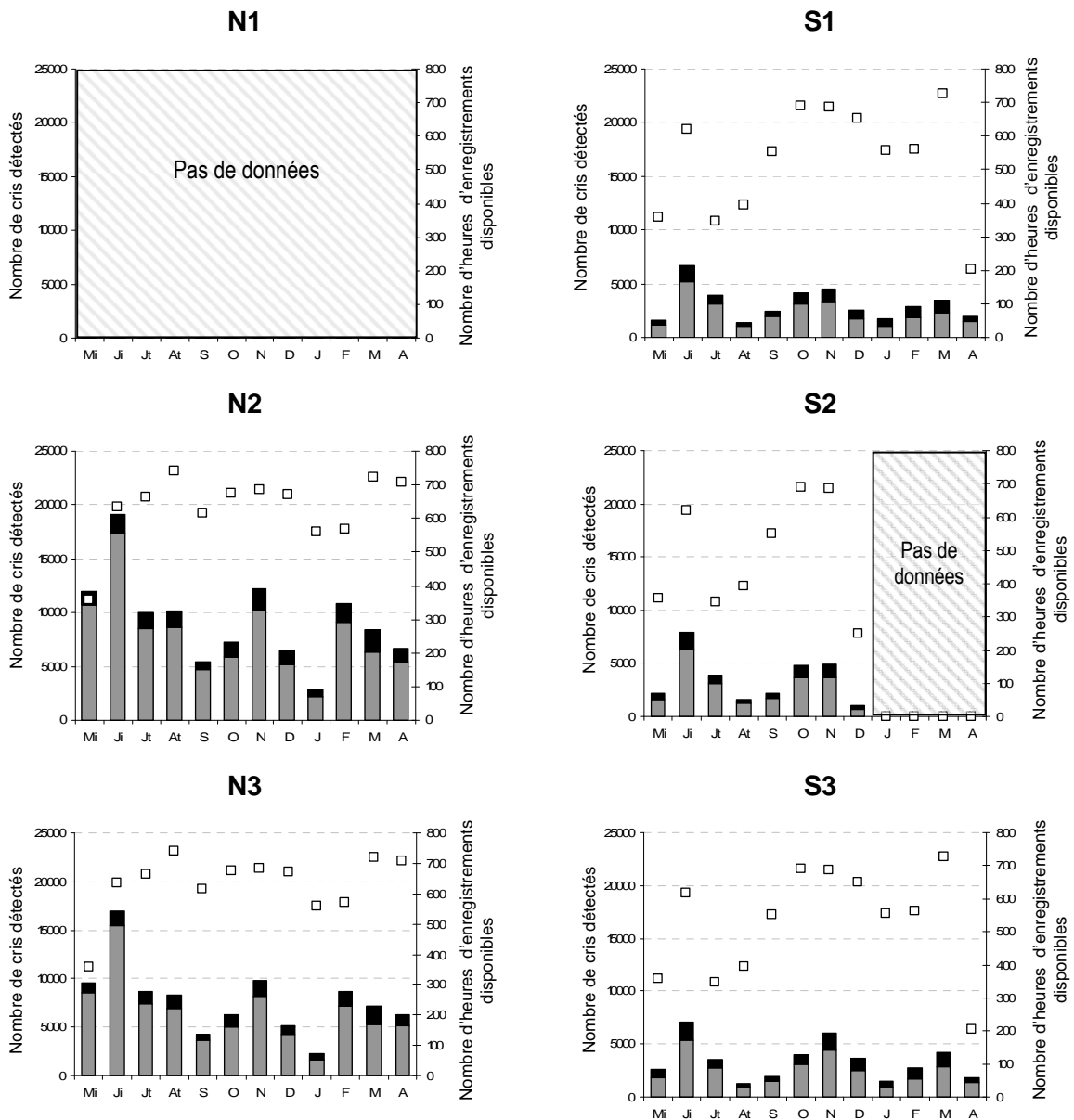


Figure 3.3 : Nombre de cris émis par les baleines bleues Antarctique et détectés aux différents hydrophones de la station HA4. Les bars (axe de gauche) représentent le nombre de cris total complets (gris) et incomplets (noir) mensuels détectés. Les carrés blancs (axe de droite) représentent le nombre mensuel d’heures d’enregistrements traités.

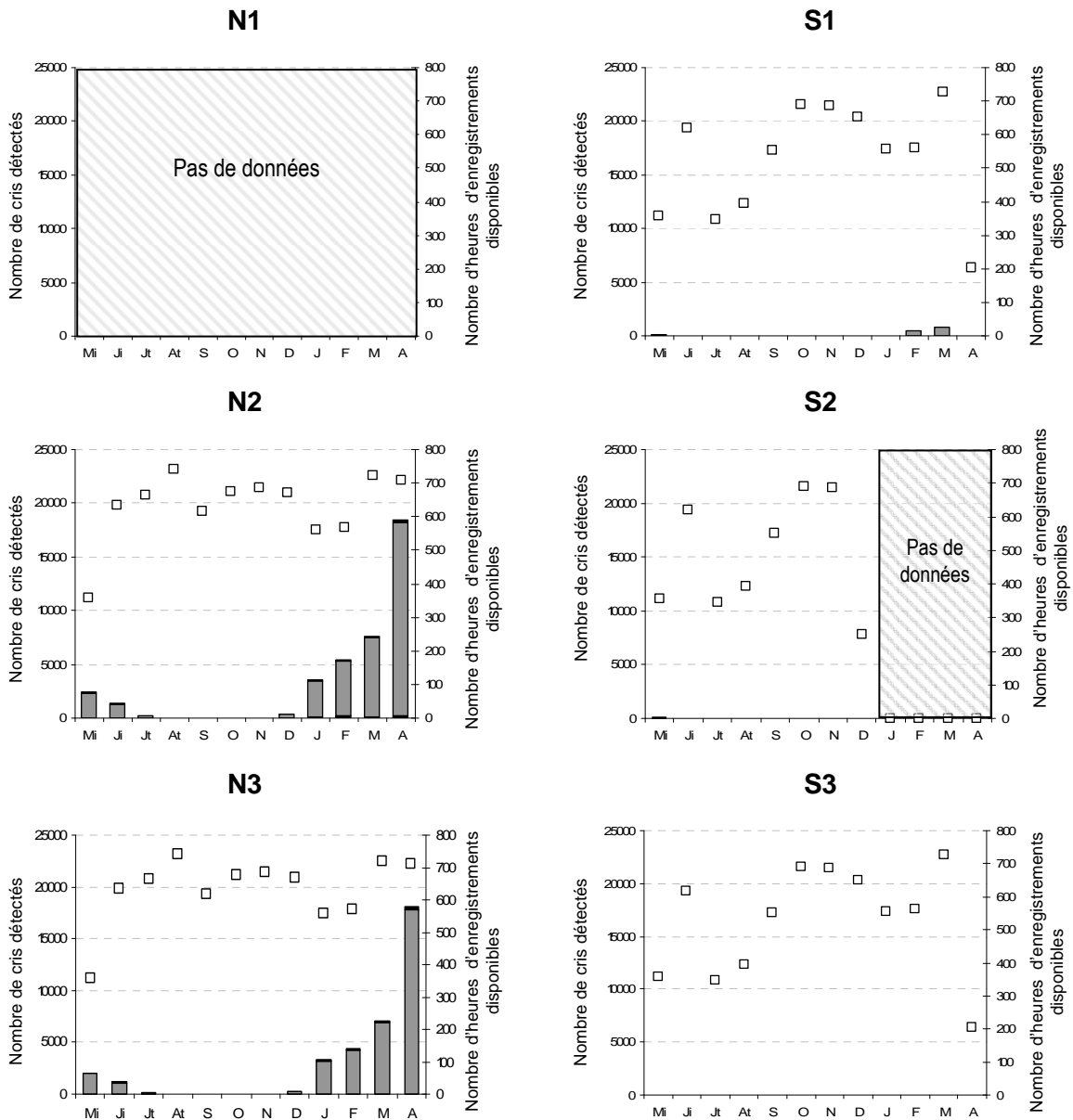


Figure 3.4 : Nombre de cris émis par les baleines bleues pygmées et détectés aux différents hydrophones de la station HA4. Les bars (axe de gauche) représentent le nombre de cris total complets (gris) et incomplets (noir) mensuels détectés. Les carrés blancs (axe de droite) représentent le nombre mensuel d'heures d'enregistrements traités.

B. Cris complets et incomplets

En moyenne, sur l'année, environ 16% et 25% des signatures acoustiques de baleine bleue Antarctique détectées respectivement sur les enregistrements du réseau nord et du réseau sud sont des cris incomplets. Ces cris sont détectés toute l'année, sans tendance saisonnière particulière. Pour les deux réseaux, il n'y a pas de différence significative dans la distribution

mensuelle de ces deux signatures acoustiques et, dans le reste de l'analyse, on ne les distinguera plus.

Seulement 5% des cris de baleine bleue pygmée détectés dans les enregistrements du réseau nord sont des cris incomplets et il n'y a pas de différence significative dans la distribution mensuelle de ces deux cris. Ils seront également regroupés dans le reste de l'analyse.

C. Saisonnalité de la baleine bleue Antarctique

Pour étudier la variation saisonnière des signaux acoustiques de grandes baleines détectés à la station HA4, l'été austral sera défini de décembre à février ; l'automne, de mars à mai ; l'hiver, de juin à août et le printemps, de septembre à novembre (Figure 3.5).

- *Sur le réseau nord :*

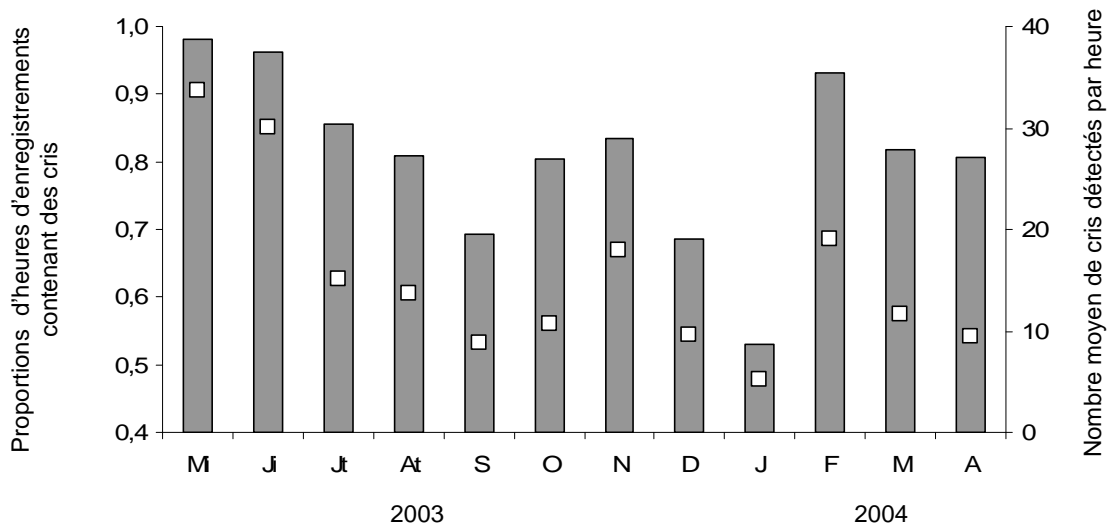
Les signatures acoustiques de baleines bleues Antarctique ont été détectées toute l'année (Figure 3.5 [A]). La proportion d'heures d'enregistrements disponibles contenant des cris est maximum en mai (environ 98%) puis diminue progressivement jusqu'en septembre. Pendant cette période, correspondant à la fin de l'automne et au début du printemps austral, le nombre moyen de cris détectés diminue (de 34 cris / heure à 9 cris / heure), plus particulièrement entre juin et juillet. Durant le printemps (septembre, octobre, novembre), le nombre de cris détectés augmente progressivement puis diminue jusqu'au mois de janvier où, le nombre moyen de cris détectés par heure atteint son minimum (5 cris / heure). Durant ce mois, seulement 50% des enregistrements traités contiennent des cris. A la fin de l'été, en février, la proportion d'heures d'enregistrements contenant des cris augmente brusquement ainsi que le nombre de cris détectés. Au début de l'automne (mars et avril), le nombre de cris détectés est constant.

- *Sur le réseau sud :*

Les signatures acoustiques de baleine bleue Antarctique ont été détectées toute l'année (Figure 3.5 [B]). De façon générale, le nombre moyen de cris détectés par heures est faible (<10 cris par heures). Des cris sont néanmoins détectés dans plus de 45% des enregistrements traités. La proportion d'heures d'enregistrements disponibles contenant des cris est importante à la fin de l'automne et au début de l'hiver où elle augmente très légèrement de mai à juillet avant de diminuer brusquement en août. Durant le printemps, le nombre de cris détectés augmente progressivement puis diminue jusqu'au mois de janvier, où le nombre moyen de cris détectés par

heure atteint son minimum (<3 cris / heure). Comme sur le réseau nord, à la fin de l'été, la proportion d'heures d'enregistrements contenant des cris augmente brusquement ainsi que le nombre de cris détectés. Au début de l'automne (mars et avril), le nombre de cris détectés varie peu.

[A]



[B]

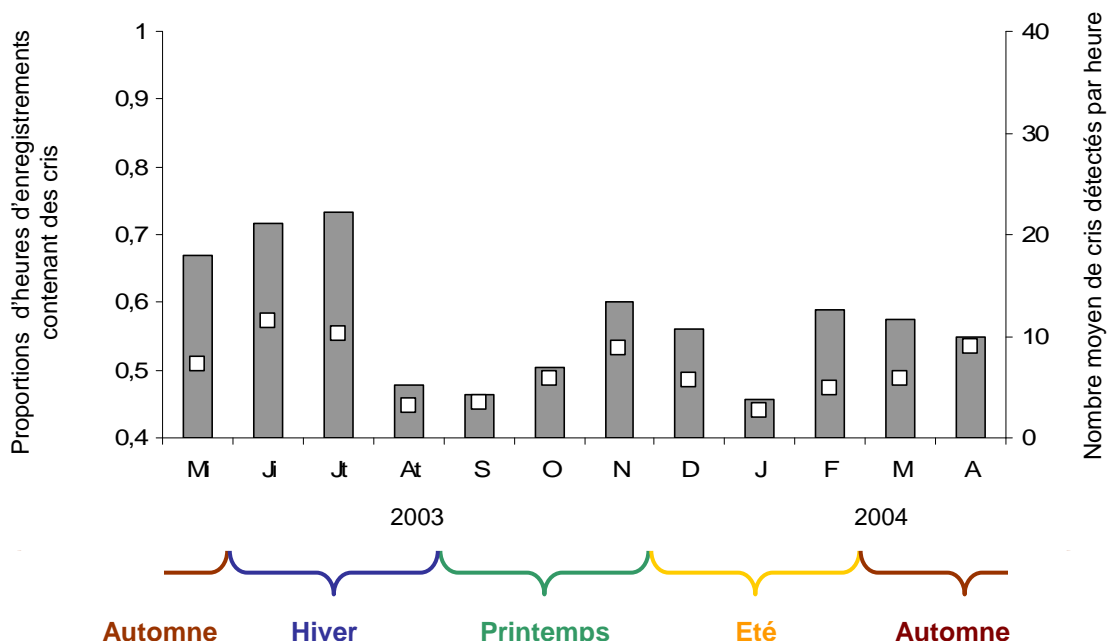
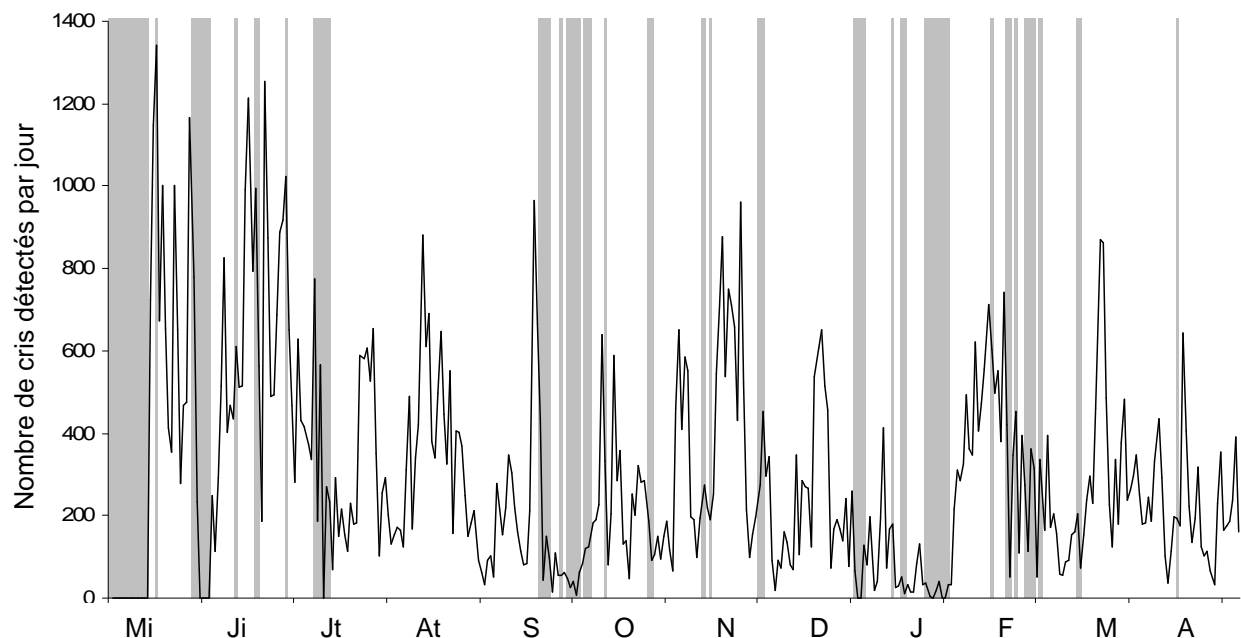


Figure 3.5 : Saisonnalité des cris de baleines bleues Antarctique (complets et incomplets) détectés sur le réseau nord [A] sur le réseau sud [B]. Les bars (axe de gauche) représentent la proportion d'heures d'enregistrements contenant des cris et les carrés blancs (axe de droite) représentent le nombre moyen mensuel de cris détectés par heure d'enregistrements disponibles pour le mois considérés.

Remarque

Les figures 3.6 [A] et [B] sont une autre façon de représenter la distribution saisonnière du nombre de cris détectés. Le nombre de cris n'est pas sommé par mois mais par jour ce qui permet de visualiser les jours de données indisponibles sur les deux réseaux.

[A]



[B]

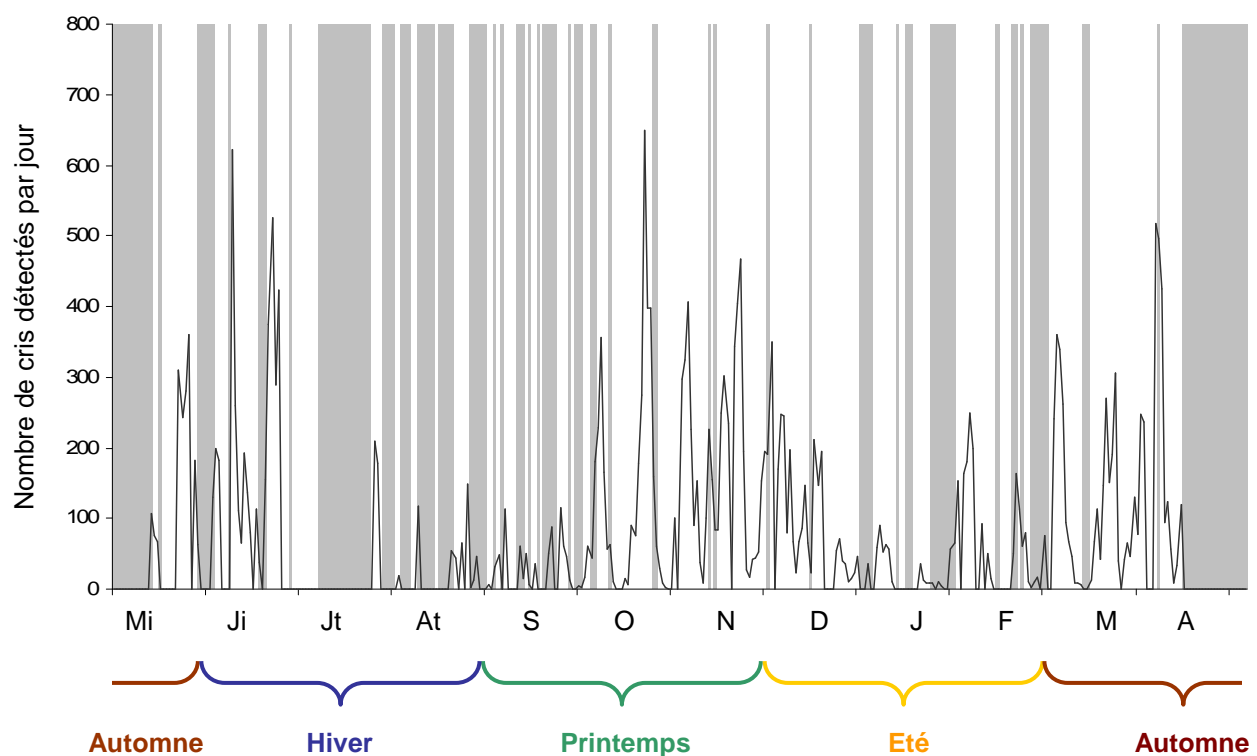


Figure 3.6 : Variation journalière du nombre de cris de baleine bleue Antarctique détectés sur les enregistrements du réseau nord [A] et du réseau sud [B]. Les plages grisées correspondent aux journées où certaines heures d'enregistrements n'étaient pas disponibles.

Pour la baleine bleue Antarctique, en prenant en compte les intervalles de temps entre les cris détectés et les séries de cris, au maximum une quarantaine de cris pourra être détectés par heure d'enregistrement traité si un seul individu émet des signaux acoustiques. Dans les enregistrements du réseau nord, ce nombre maximal est souvent dépassé au cours de l'année suggérant alors que plusieurs individus émettraient des signaux en même temps, en particulier pour les mois de mai et juin (Figure 3.7).

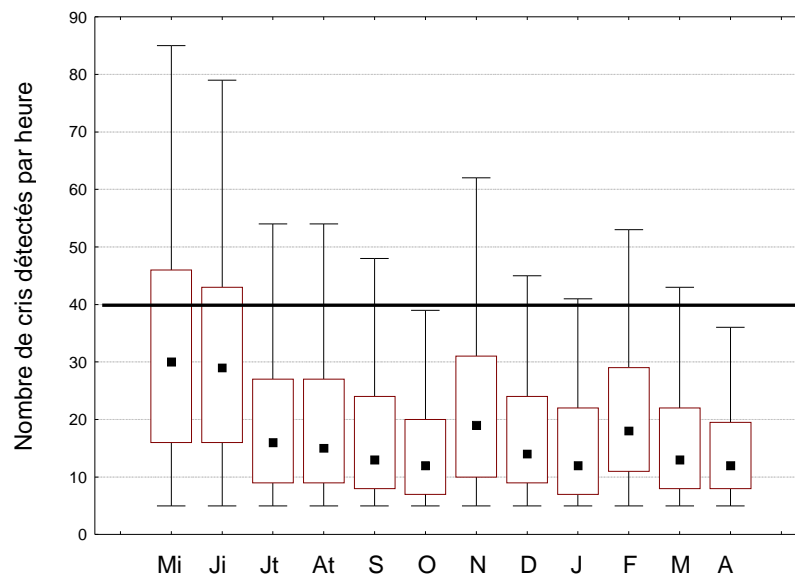


Figure 3.7 : Boîtes à moustaches mensuelles des nombres de cris de baleine bleue Antarctique détectés par heure d'enregistrement sur le réseau nord.

D. Saisonnalité de la baleine bleue pygmée de type Madagascar

La variation du nombre de signatures acoustiques de baleine bleue pygmée détectés à la station nord a révélé une forte saisonnalité (Figure 3.8). De janvier à avril, plus de 45% des enregistrements disponibles contenaient des cris ; en revanche, le reste de l'année, les enregistrements contenaient peu ou pas du tout de cris, en particulier entre août et novembre. Pour la période d'étude, le nombre de cris détectés diminue de mai à juillet soit à la fin de l'automne et au début de l'hiver ; puis aucun cri n'est détecté jusqu'au début de l'été. De décembre à mars, le nombre de cris augmente progressivement jusqu'à atteindre un nombre maximal en avril (26 cris / heure). Pendant cette période la proportion d'heure d'enregistrements contenant des cris varie fortement. En février et mai le nombre de cris détectés est le même mais ces cris sont émis dans une période de temps plus courte en mai qu'en février.

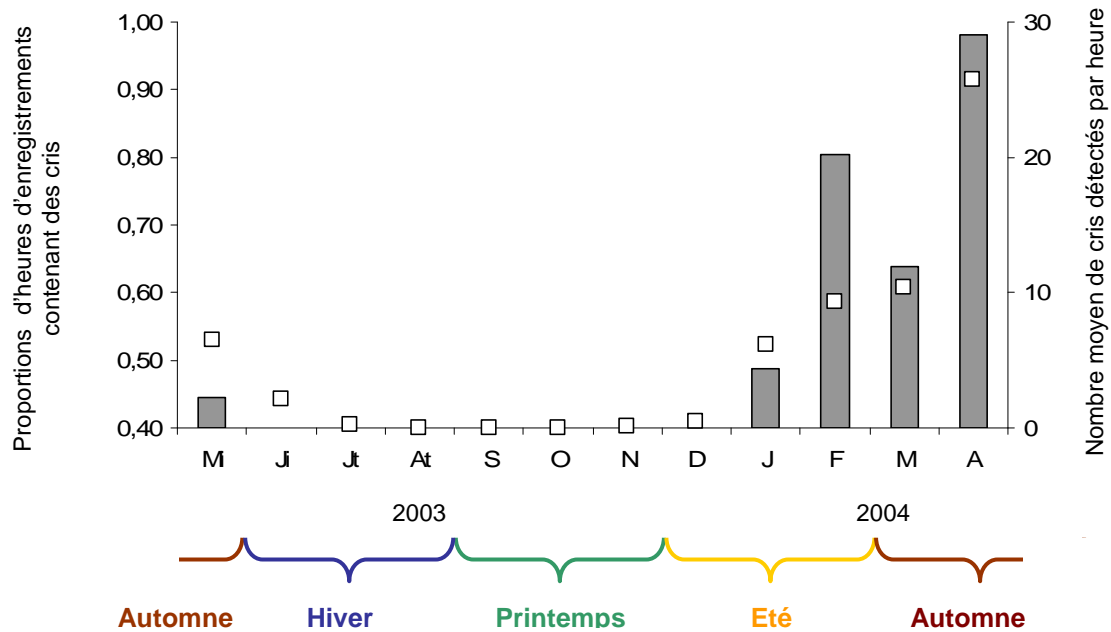


Figure 3.8 : Saisonnalité des cris de baleines bleues pygmées (complets et incomplets) détectés sur le réseau nord. Les bars (axe de gauche) représentent la proportion d'heures d'enregistrements contenant des cris et les carrés blancs (axe de droite) représentent le nombre moyen mensuel de cris détectés par heure d'enregistrements disponibles pour le mois considéré.

Remarque

Comme pour les cris de baleines bleues Antarctique, le nombre de cris détectés a été sommé par jour (Figure 3.9). Cette représentation permet d'observer plus en détail la forte augmentation du nombre de cris détectés sur le réseau nord en avril, ainsi que les quelques jours, sur le réseau sud, où des cris ont été détectés.

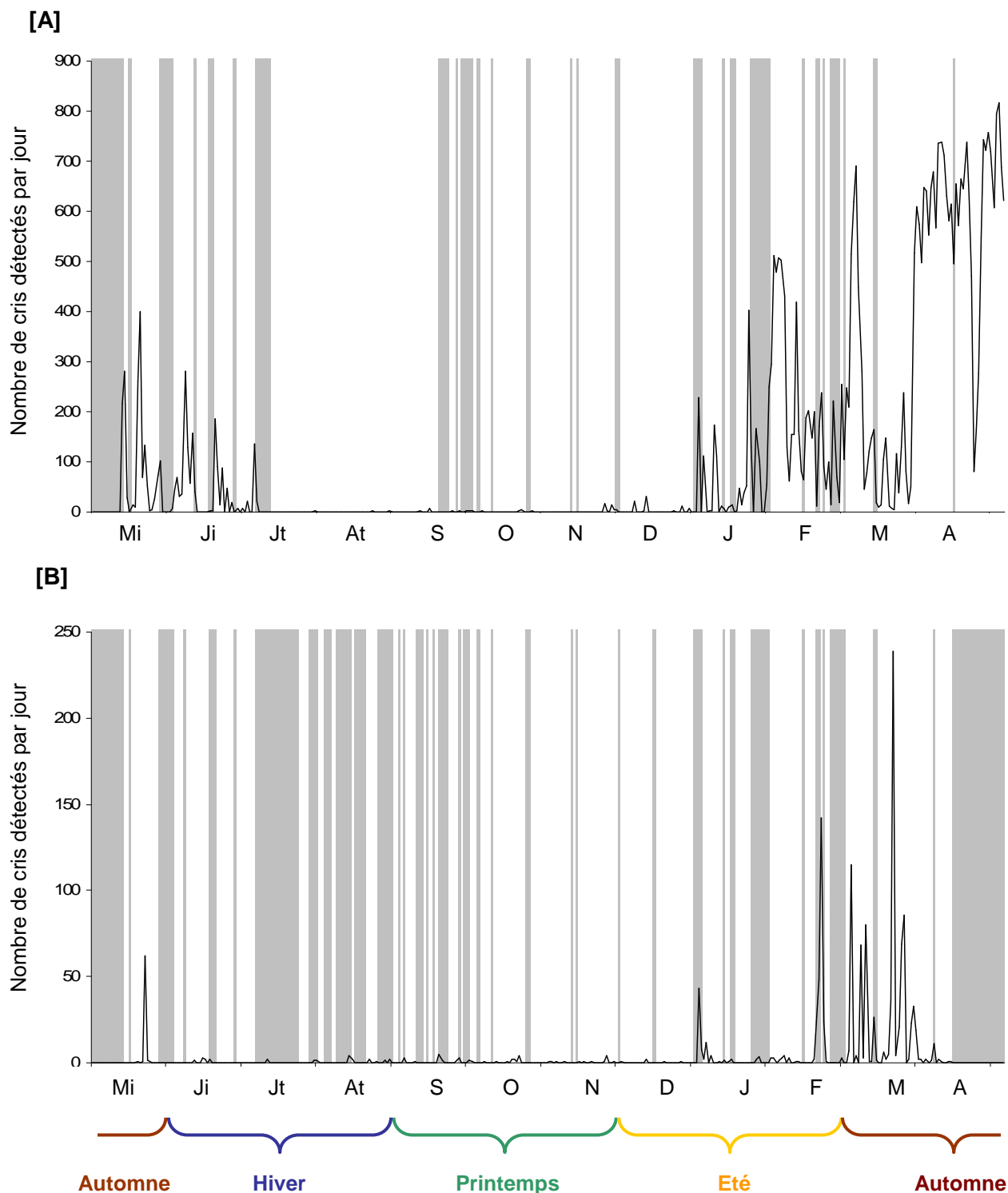


Figure 3.9 : Variation journalière du nombre de cris de baleine bleue pygmée détectés sur les enregistrements du réseau nord [A] et du réseau sud [B]. Les plages grisées correspondent aux journées où certaines heures d'enregistrements n'étaient pas disponibles.

Pour la baleine bleue pygmée, en prenant en compte l'intervalle entre les cris et l'intervalle entre les séries, un seul individu peut émettre au maximum une vingtaine de cris par heure. Dans les enregistrements de l'hydrophone N2, ce nombre maximal de cris est largement

dépassé durant les mois où cette espèce est présente suggérant que plusieurs individus émettraient des signaux en même temps (i.e. de janvier à juin - Figure 3.10).

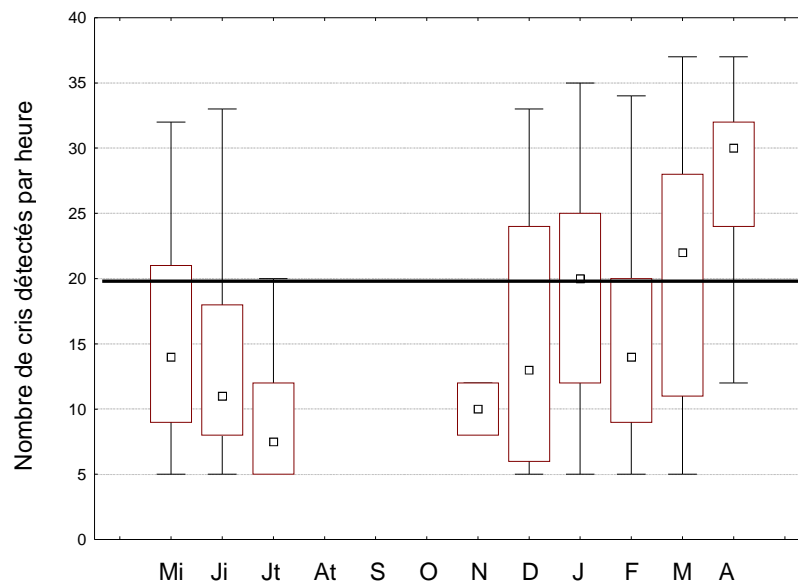


Figure 3.10 : Boîtes à moustaches mensuelles des nombres de cris de baleine bleue pygmée détectés par heure d'enregistrement sur le réseau nord.

2.1.1.2. Intensité des cris mesurée aux hydrophones

A. Différences inter-hydrophones et inter-réseaux

Pour les signatures acoustiques des deux sous-espèces de baleines bleues détectées à la station HA4, nous avons mesuré l'intensité moyenne mensuelle reçue sur les 5 hydrophones. Les figures 3.11 et 3.12 comparent, pour chacune des sous-espèces de baleine bleue, les intensités moyennes mensuelles reçues sur les deux réseaux. Il n'y a pas de différence significative dans la valeur des intensités mensuelles reçues entre les hydrophones d'un même réseau (valeurs mesurées sur le cri complet; test de *Student* inter-hydrophone réseaux nord et sud : $p > 0,05$). Le reste de l'analyse se fera avec les intensités reçues sur l'hydrophone N2 pour le réseau nord et sur l'hydrophone S3 pour le réseau sud.

En revanche, il y a une différence significative dans la valeur des intensités mensuelles reçues entre le réseau nord et le réseau sud (valeurs mesurées sur le cri complet et sur les différentes parties du cri ; test de *Student* inter-réseau: $p < 0,05$). Les intensités mensuelles moyennes mesurées sur le réseau sud sont nettement supérieures à celles mesurées sur le réseau

nord. La distribution mensuelle des intensités est également très différente (test de *Kolmogorov Smirnov* inter-réseau : $p < 0,005$). Pour chaque sous-espèce de baleine bleue étudiée, le reste des analyses des intensités des cris reçues aux hydrophones se fera séparément sur les deux réseaux.

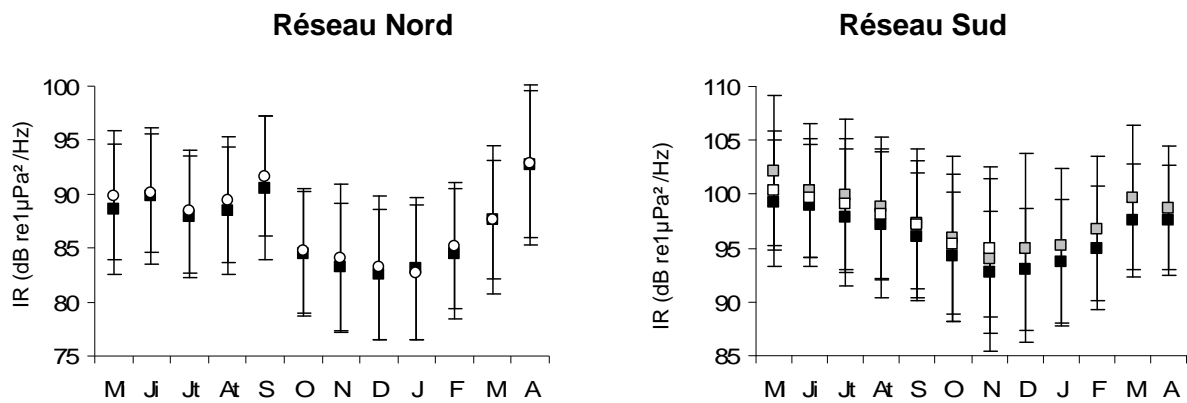


Figure 3.11 : Intensité mensuelle moyenne (en dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) et écarts-types mesurés sur les cris complets de baleine bleue Antarctique sur le réseau nord (hydrophones N2 en noir et N3 en blanc) et sur le réseau sud (hydrophones S1 en blanc, S2 en gris et S3 en noir).

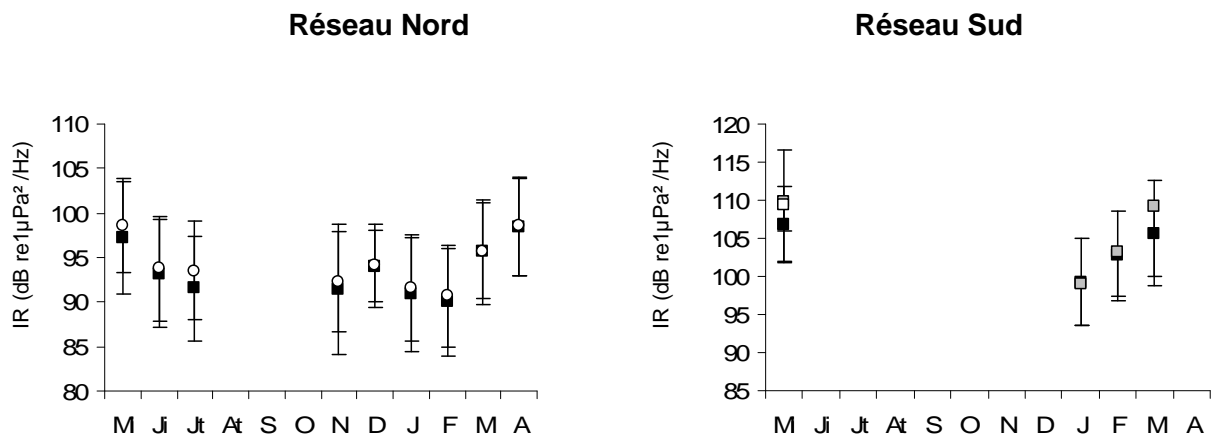


Figure 3.12 : Intensité mensuelle moyenne (en dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) et écarts-types calculés sur les cris complets de baleine bleue pygmée reçue sur le réseau nord (hydrophones N2 en noir et N3 en blanc) et sur le réseau sud (hydrophones S1 gris en, S2 en blanc et S3 en noir).

B. Différences entre les parties du cri mesurées

On rappellera que IR_{Tout} est l'intensité moyenne mensuelle des cris calculée sur le signal complet, IR_{Part1} et IR_{Part2} l'intensité moyenne mensuelle calculée respectivement sur la première et la deuxième partie du cri. Pour les deux réseaux, si on compare les intensités reçues mesurées sur les différentes parties du signal, nous remarquons que l'intensité reçue est

très légèrement plus importante dans la première partie du cri des baleine bleue Antarctique, soit à 28 Hz (Figure 3.13), et dans la deuxième partie du cri de baleine bleue pygmée (Figure 3.14), soit à 35 Hz. Cette particularité a motivé le choix des bandes fréquentielles sur lesquelles nous avons fait la modélisation des distances estimées à partir des cris détectés (cf. Figure 2.31 [A] et [B] – Chapitre II Matériel et méthodes, partie 4, § 4.3.5.2). Ici, dans le reste de l’analyse nous travaillerons uniquement sur l’intensité moyenne mensuelle reçue calculée sur le cri complet.

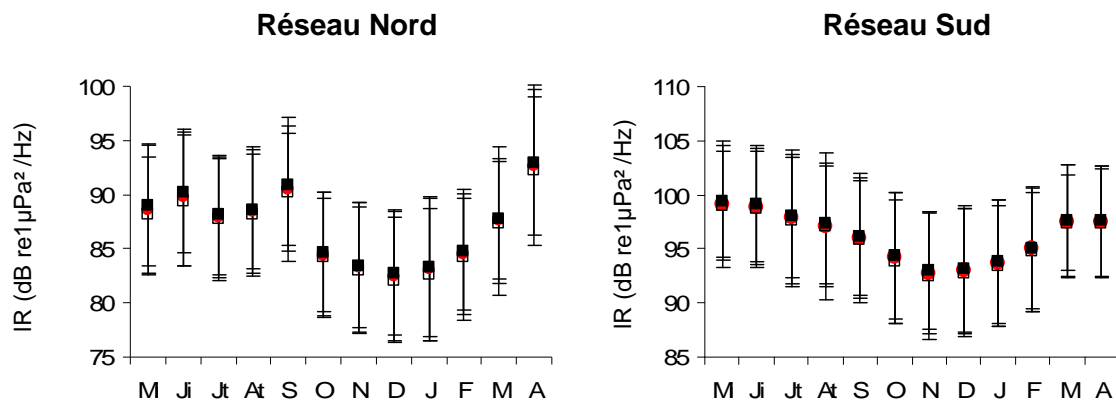


Figure 3.13 : Intensité mensuelle moyenne (en dB re 1 μ Pa²/Hz) et écarts-types calculés sur la première partie des cris (en noir), sur la seconde partie (en transparent) et sur l’intégralité des cris (en rouge) de baleine bleue Antarctique reçus sur le réseau nord] et sur le réseau sud.

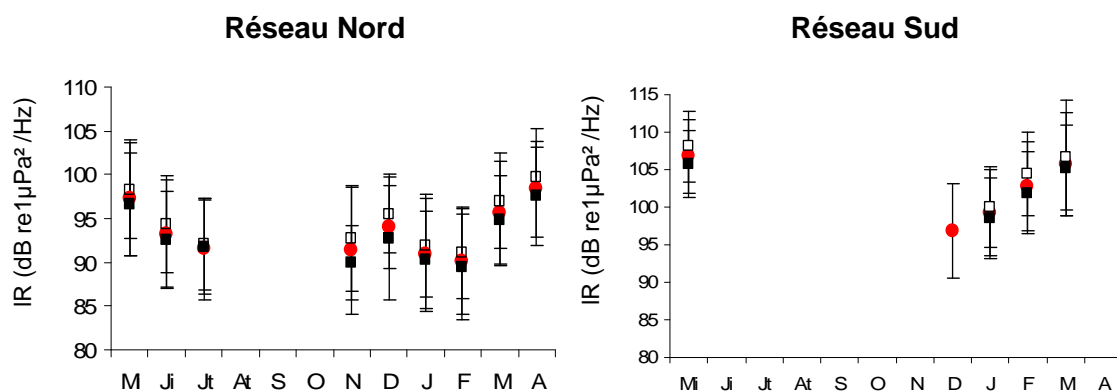


Figure 3.14 : Intensité mensuelle moyenne (en dB re 1 μ Pa²/Hz) et écarts-types calculés sur la première partie des cris (en noir), sur la seconde partie (en transparent) et sur l’intégralité des cris (en rouge) de baleine bleue pygmée reçus sur le réseau nord et sur le réseau sud.

C. Analyse des intensités des cris de baleine bleue Antarctique

La figure 3.15 permet de comparer, pour chaque réseau, les intensités reçues mensuelles moyennes des cris de baleine bleue Antarctique détectés sur les deux réseaux avec le niveau de pression acoustique du bruit ambiant mesuré dans la bande de fréquences 17-30Hz. Pour les deux réseaux, le bruit ambiant est supérieur aux intensités reçues des cris sauf pour le mois d'avril, sur le réseau nord où l'intensité moyenne dépasse légèrement le bruit ambiant.

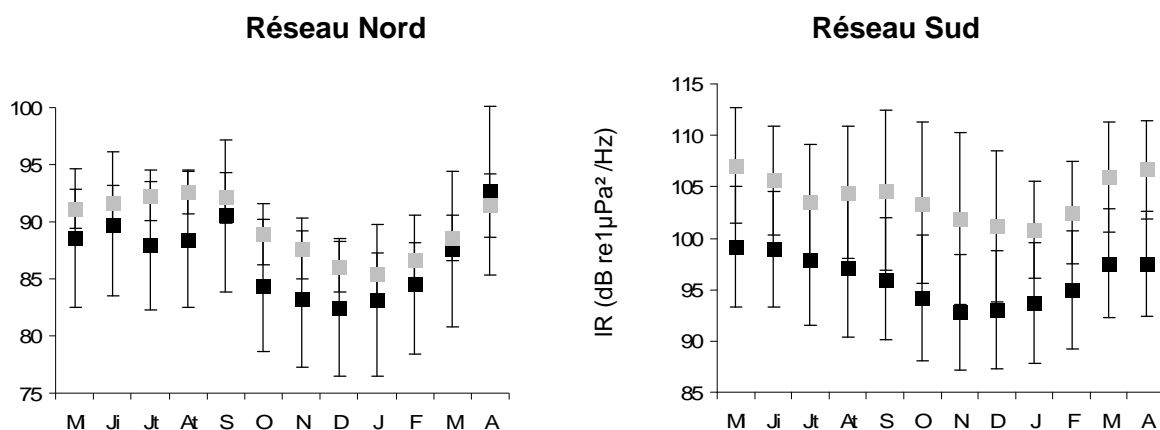


Figure 3.15 : Intensité mensuelle moyenne (en dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) et écarts-types calculés sur l'intégralité des cris de baleine bleue Antarctique (en noir) et niveau de pression acoustique du bruit ambiant mesuré sur la bande de fréquences de 17-30Hz (en gris) sur le réseau nord et sur le réseau sud.

- Réseau nord :

L'intensité moyenne mensuelle reçue calculée sur la signature acoustique de baleine bleue Antarctique est maximum en avril ($92,7\pm 7$ dBre $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, $n=10327$) et minimum en décembre ($82,5\pm 2$ dBre $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, $n=4982$). On observe de nombreuses variations de mai à septembre (± 2 dBre $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$), puis une forte diminution de septembre à décembre (-8 dBre $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) suivie d'une augmentation de janvier à avril ($+9$ dBre $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$). La figure 3.16 permet de visualiser la variation mensuelle de l'ensemble des intensités reçues calculées. De octobre à mars, on remarque une nette diminution des intensités vers les valeurs extrêmes les plus faibles ; au contraire, d'avril à septembre, on remarque une nette augmentation des intensités vers les valeurs extrêmes les plus fortes et une absence presque totale de cris vers les valeurs extrêmes les plus faibles.

- Réseau sud :

L'intensité moyenne mensuelle reçue diminue de mai à novembre avec un maximum en mai ($99,2 \pm 6$ dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, $n=1714$) et un minimum en novembre ($92,8 \pm 6$ dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, $n=4436$), puis augmente de novembre à mars-avril. Cette variation est d'environ 5 dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$. D'octobre à février, on remarque une nette diminution des intensités vers les valeurs extrêmes les plus faibles. En mars on a un net décalage vers les valeurs les plus fortes (figure 3.17).

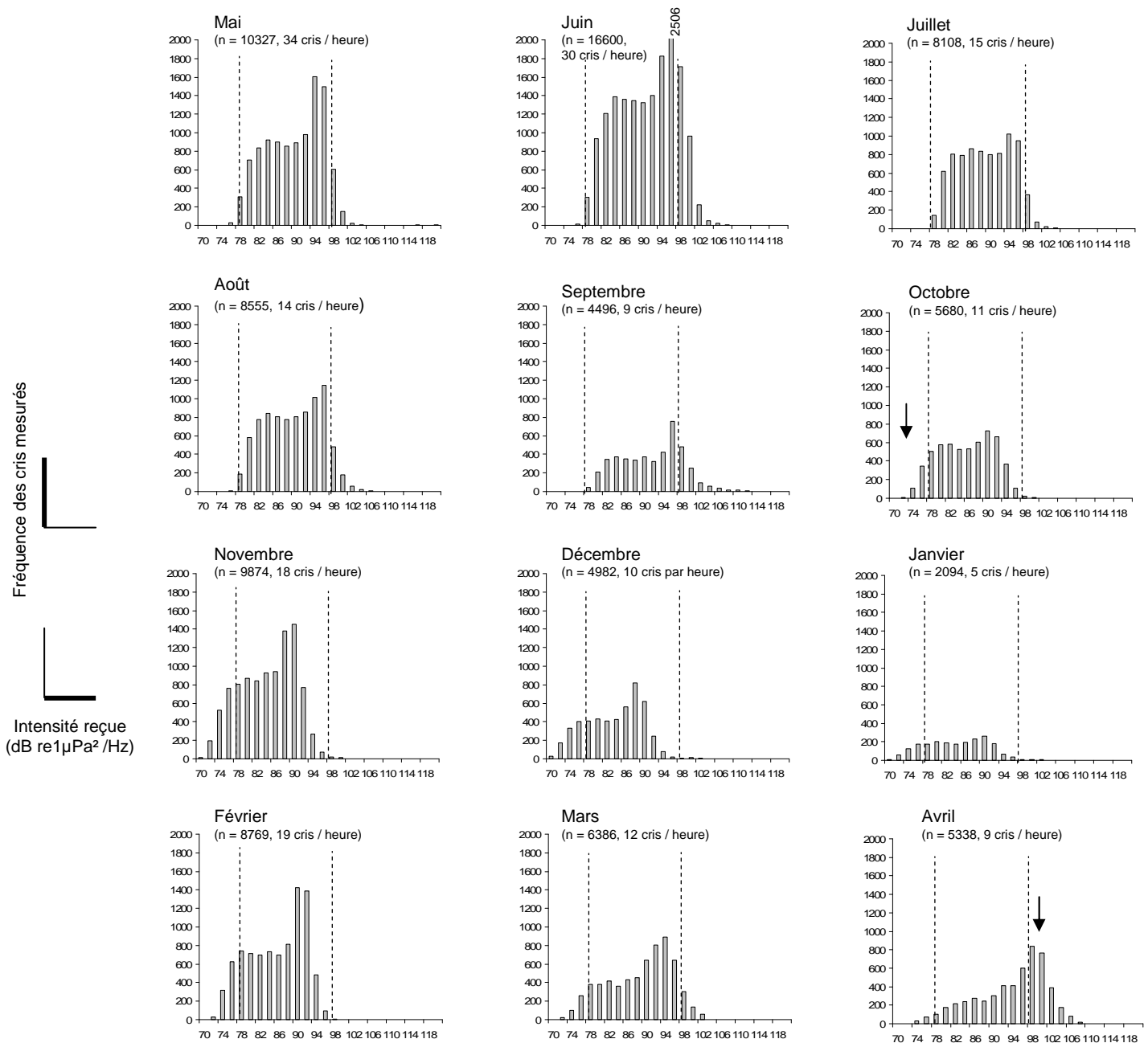


Figure 3.16 : Histogrammes de densité de fréquence des intensités reçus des cris de baleine bleue Antarctique enregistrés sur l'hydrophone N2 du réseau nord. La majorité des intensités est comprise entre 78 et 98 dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

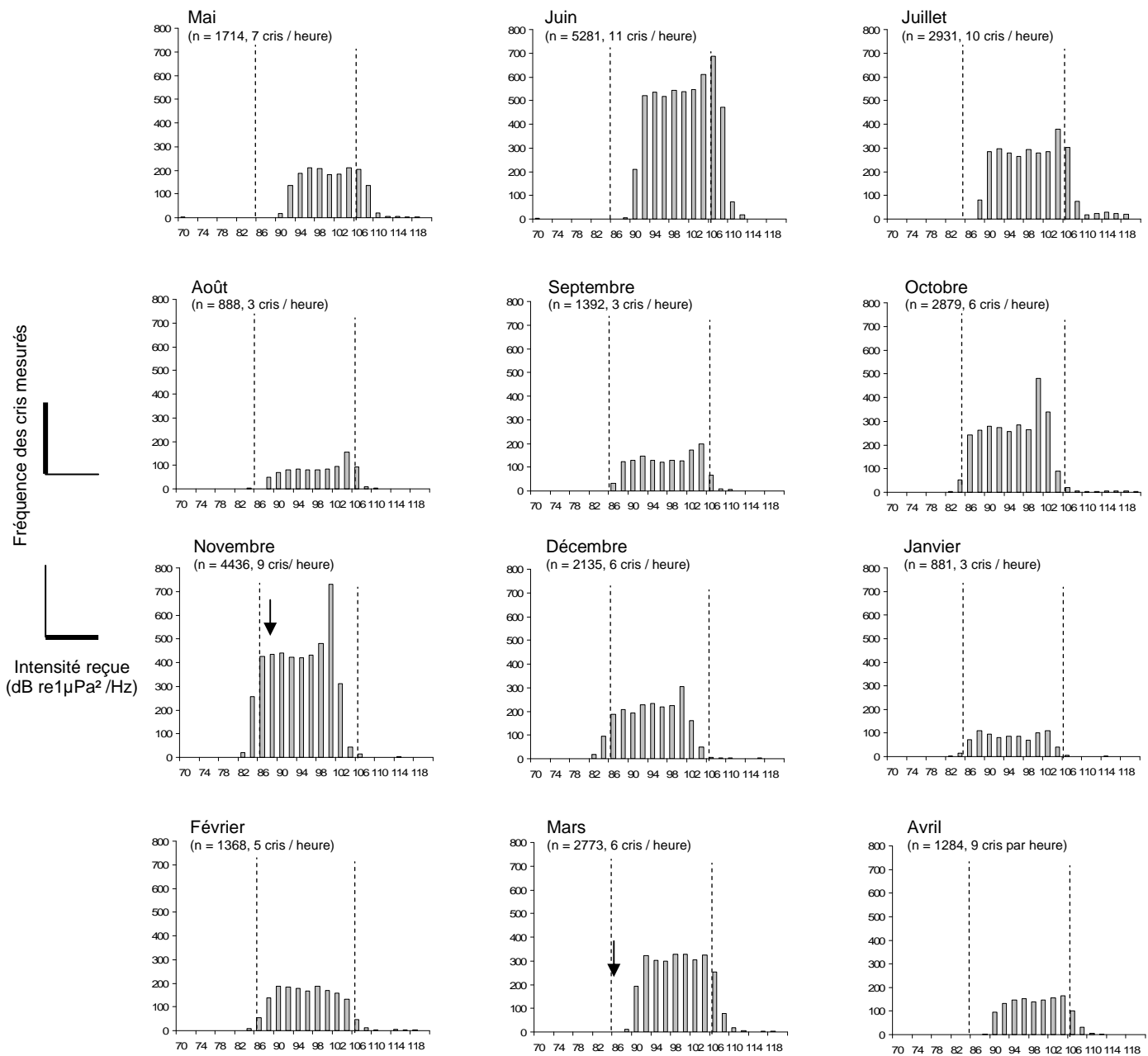


Figure 3.17 : Histogrammes de densité de fréquence des intensités reçues des cris de baleine bleue Antarctique enregistrés sur l’hydrophone S3 du réseau sud. La majorité des intensités sont comprises entre 86 et 106 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

D. Intensité des cris de baleine bleue pygmée

La figure 3.18 permet de comparer, pour chaque réseau, les intensités reçues mensuelles moyennes des cris de baleine bleue pygmée détectés sur les réseaux nord et sud avec le niveau de pression acoustique du bruit ambiant mesuré dans la bande de fréquences 17-50Hz. Sur le réseau nord, les intensités reçues des cris sont légèrement supérieures au bruit ambiant sauf pour les

mois de février, juin et juillet. En revanche sur le réseau sud, le peu de cris détectés présente une intensité reçue bien inférieure au bruit ambiant.

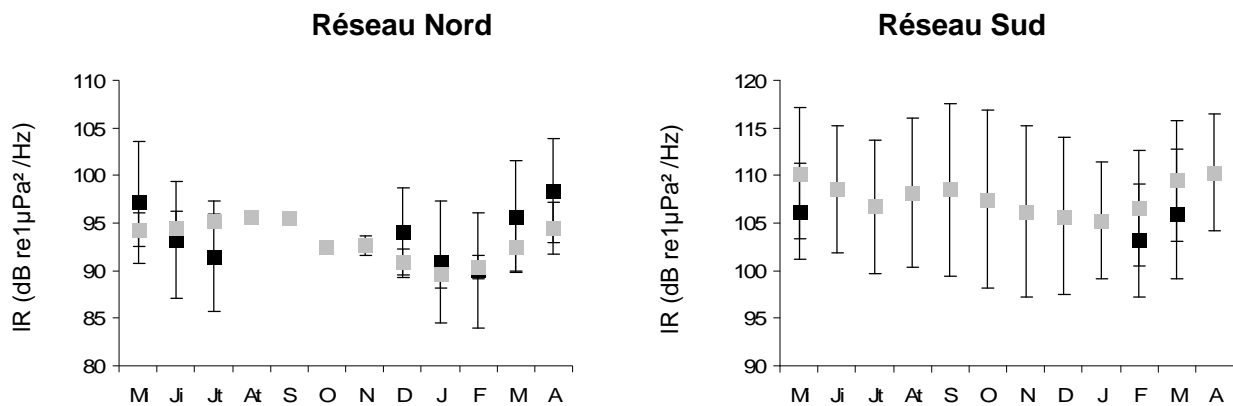


Figure 3.18 : Intensité mensuelle moyenne (en dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) et écarts-types calculés sur l'intégralité des cris de baleine bleue pygmées (en noir) et niveau de pression acoustique du bruit ambiant mesuré sur la bande de fréquences de 17-50Hz (en gris) sur le réseau nord et sur le réseau sud.

- Réseau nord :

L'intensité moyenne mensuelle reçue des signatures acoustiques de baleine bleue pygmée est maximum en avril ($98,4 \pm 5$ dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, $n=17870$) et minimum en février (90 ± 6 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, $n=4400$). On observe une diminution de mai à juillet (-6 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) et de décembre à février (-4 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$), puis une forte augmentation de février à avril ($+8$ dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$). Le mois de novembre n'ont pas été pris en compte dans l'analyse car le nombre de cris mesurables durant cette période était très faible ($n < 40$). La figure 3.19 permet de visualiser la variation mensuelle de l'ensemble des intensités reçues calculées. De façon générale très peu de cris ont des intensités reçues faibles. A partir du mois de mars et jusqu'au mois de mai, la majorité des cris ont une intensité reçue forte.

- Réseau sud :

Très peu de signatures acoustiques de baleine bleue pygmée ont été détectés et uniquement durant quelques jours aux mois de mai, février et mars. Les intensités reçues des cris mesurés sont légèrement plus faibles en février.

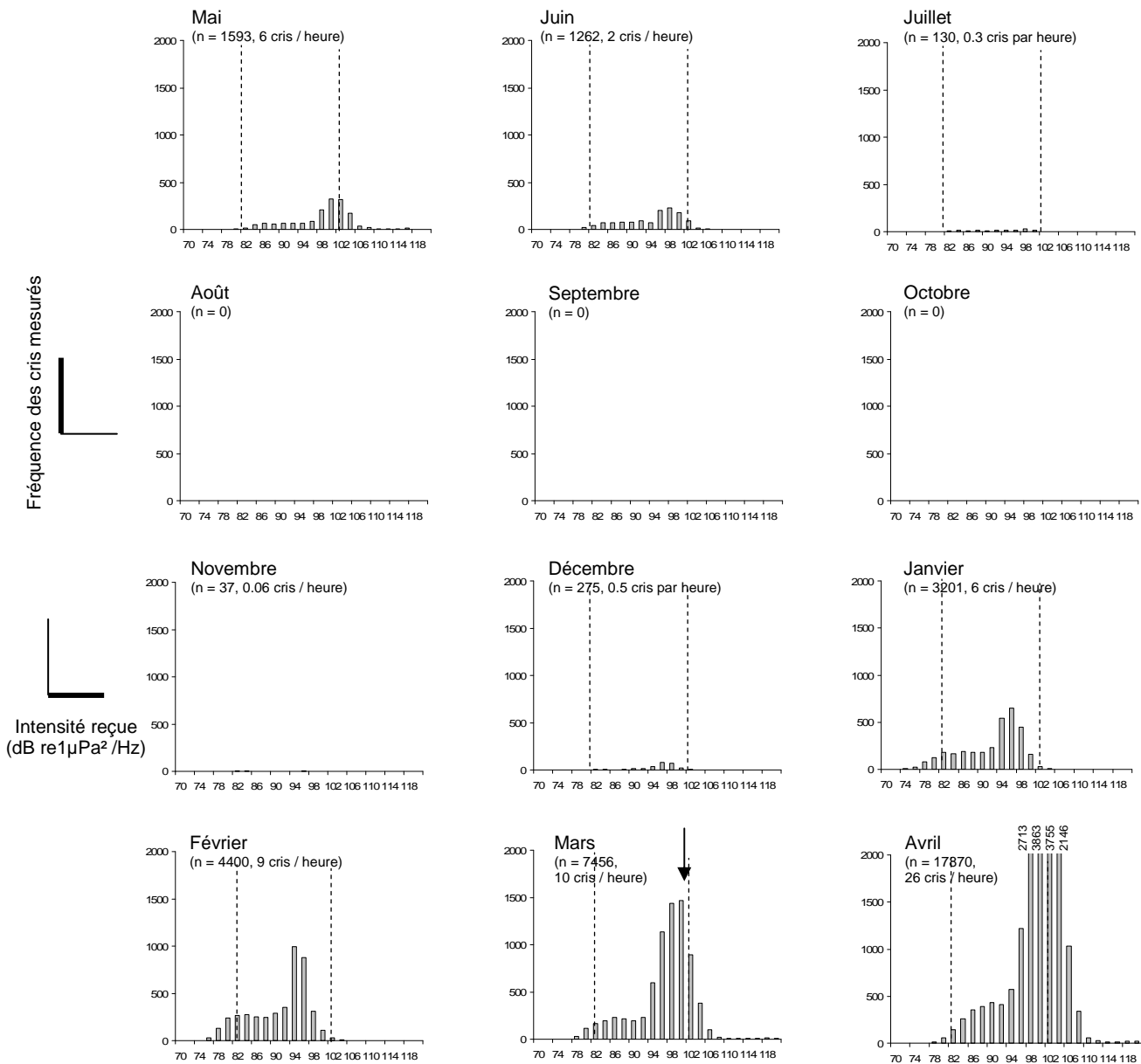


Figure 3.19 : Histogrammes de densité de fréquence des intensités reçus des cris de baleine bleue pygmée enregistrés sur l'hydrophone N2 du réseau nord. La majorité des intensités est comprise entre 82 et 102 dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

2.1.2. Autres signaux de baleine bleue

La saisonnalité des autres signatures acoustiques émis par les baleines bleues et repérées dans les enregistrements de la station HA4 a été évaluée uniquement par le visionnage des spectrogrammes.

2.1.2.1. Baleine bleue pygmée type Australie

Très peu de signatures acoustiques de baleine bleue de type Australie ont été repérés sur les spectrogrammes et uniquement au mois de janvier, février, mars et avril.

2.1.2.2. Signaux acoustiques « hautes fréquences »

Les signaux hautes fréquences des baleines bleues, le *D calls* et le *arch sound* ont été enregistrés occasionnellement en juillet, septembre et décembre, puis la fréquence de signaux observés augmente à partir de la fin du mois de janvier et ce jusqu'en avril.

2.1.3. Le rorqual commun

L'impulsion de 20 Hz, caractéristique du rorqual commun a été observée occasionnellement de juin à octobre puis plus régulièrement de mars à avril.

2.2. Discussion

La variation saisonnière des grandes baleines

L'approche acoustique pour l'étude des baleines utilise les signaux détectés comme des indicateurs de la présence des espèces dans une zone. Il ne révèle pas le nombre ou l'abondance des baleines présentes car actuellement il n'existe aucun proxy entre le nombre de cris détectés et le nombre de baleines (Mellinger et al 2007). Dans cette étude, l'enregistrement des signatures acoustiques émis par des grandes baleines confirme leur présence dans le secteur Indien de l'Océan Austral. La variation saisonnière de l'enregistrement de leurs signatures acoustiques permet de connaître les périodes de présence et d'absence des différentes espèces. La baleine bleue Antarctique est présente toute l'année dans le secteur Indien de l'Océan Austral ; au contraire, les baleines bleues pygmées de type Madagascar, de type Australie et le rorqual commun sont présents dans cette zone occasionnellement. Pour chaque espèce ou sous-espèce, nous analyserons donc, en détails, la saisonnalité et les éventuelles raisons de la présence de ces grandes baleines dans ce secteur.

La baleine bleue

Dans la partie Indienne de l'Océan Austral, les données de captures ont révélé la présence de deux sous-espèces de baleine bleue durant l'été austral ; la baleine bleue Antarctique et la baleine bleue pygmée (Zemsky & Sazhinov 1994, Branch et al 2007a, 2007b, 2008). Les aires de répartition et les schémas de migration de ces deux sous-espèces sont très peu connus. Durant l'été austral, période correspondant à leur activité d'alimentation, les captures et les observations visuelles ont montré une nette séparation géographique entre les deux sous-espèces (Ichihara 1966, Kato et al 1995). Les baleines bleues Antarctique seraient généralement situées au sud du 56^{ème} parallèle alors que les baleines bleues pygmées resteraient au nord du 52ème parallèle (Branch et al 2008) en particulier entre 0° et 80°E (ce qui correspond à notre zone d'étude) ; bien que des populations de baleine bleue pygmée aient été reportées en Nouvelle Zélande, en Australie et au Chili (Ichihara 1966, Kato et al 1995, Gill 2002). Durant l'hiver austral, on ignore quasiment tout de la répartition des deux sous-espèces. Autour de l'Antarctique, des enregistrements acoustiques ont révélé une présence annuelle des baleines bleues Antarctique

(Širović et al 2004, McKay et al 2005, Mellinger et al 2007) ; mais des signatures acoustiques ont également été détectés à la fin de l'automne et au milieu de l'hiver (de mai à juillet) aux latitudes tempérées des océans Indien et Pacifique (Stafford et al 2004) et durant tout l'hiver et jusqu'au milieu du printemps (de juin à octobre) à l'ouest de l'Australie (32°S-115°E, McCauley et al 2004). Durant l'hiver austral, aucune observation visuelle de baleine bleue pygmée n'a été reportée à ce jour mais des signatures acoustiques ont été enregistrées en mai et en juin au nord et à l'ouest de l'Océan Indien (McCauley et al 2004, Stafford et al 2005).

La présente étude révèle que, en zone subantarctique, dans la partie Indienne de l'Océan Austral, des signatures acoustiques de baleines bleues Antarctique ont été détectées toute l'année et des signatures acoustiques de baleines bleues pygmées ont été détectées uniquement de décembre à juin, soit du début de l'été au début de l'hiver austral. Ces deux sous-espèces de baleines bleues semblent alors partager à un moment de l'année la même aire géographique.

Pour les deux sous-espèces, nous avons représenté mensuellement le nombre de cris détectés par le détecteur automatique bORie et nous avons constaté que ce nombre variait au fil des saisons. Différentes raisons peuvent expliquer cela. La variation du nombre de cris peut être attribuée à la variation de l'activité vocale des baleines. Nous ne connaissons actuellement pas les raisons pour lesquelles les baleines bleues émettent des sons. La majorité des signaux basses fréquences émis par les baleines bleues n'a pas encore été reliée à une activité particulière comme l'alimentation, le déplacement ou la reproduction. De la même manière, on ignore quels individus, au sein d'une population, émettent des signaux acoustiques et si cette activité est temporaire ou permanente. Durant notre période d'étude, puisque nous n'avons aucune observation visuelle témoignant de la présence de baleines bleues Antarctique ou pygmées en l'absence d'activité vocale, cette hypothèse est donc tout à fait envisageable. Lors des enregistrements de baleines bleues Antarctique combinés avec des observations visuelles, il avait d'ailleurs été précisé que les baleines observées n'avaient pas systématiquement émis de signaux acoustiques (Rankin et al 2005).

Cependant, d'autres raisons peuvent expliquer les variations saisonnières du nombre de cris détectés à la station HA4. Pour repérer et compter les signaux de baleines présents dans les enregistrements, le détecteur utilisé dans cette étude a été configuré pour détecter des cris de baleines bleues Antarctique et pygmées ayant une intensité reçue aux hydrophones jusqu'à -15 dB par rapport à la puissance acoustique du bruit ambiant. Or, toute l'année, nous avons observé

que la puissance acoustique du bruit ambiant était, globalement, supérieure à l'intensité des cris reçus aux hydrophones. Sur le réseau sud, nous avons également constaté que, non seulement le bruit ambiant était plus fort que sur le réseau nord, mais que le nombre de cris détectés sur ce réseau étaient presque trois fois plus faible que sur le réseau nord. Dans ce cas, les effets du bruit ambiant sur la capacité de détection du système, et donc sur la variation globale du nombre de cris détectés, sont alors clairement mis en évidence. Par conséquent, la variation saisonnière du nombre de cris détectés pourra être attribuée à la variation saisonnière du bruit ambiant qui réduirait durant certaines périodes les capacités de détection du système. Cependant, et pour les deux sous-espèces, nous avons constatés que les mois où le bruit ambiant était le plus fort c'est-à-dire du milieu de l'automne (avril) jusqu'au début du printemps (septembre), le nombre de cris détectés était plus important par rapport au reste de l'année. De plus, l'hypothèse que la variation du nombre de cris détectés soit le résultat de la variation saisonnière du bruit ambiant n'est valable que si les baleines restent toujours au même endroit et qu'elles émettent des signaux sonores avec la même intensité à la source. Or, même si nous ignorons encore beaucoup de choses concernant la variation de l'intensité à la source des signaux de baleines bleues, nous savons que cette espèce effectue des déplacements saisonniers et que, à l'exception des sous-espèces ou sous-populations non-migrantes comme la baleine bleue pygmée du nord de l'Océan Indien (Sri Lanka), ces baleines restent rarement au même endroit toute l'année. Par conséquent, les variations du nombre de cris détectés peuvent être le reflet d'un déplacement des populations au-delà des capacités de détections de la station. La variation saisonnière des intensités reçues aux hydrophones serait alors le principal témoin de l'éloignement ou du rapprochement des baleines acoustiquement actives par rapport aux hydrophones. L'étude des distances estimées à partir des cris détectés avec le modèle de propagation du son spécifiquement adapté à la zone d'écoute et aux signaux d'intérêts permettra alors de confirmer cette hypothèse que nous utiliserons ici.

Dans cette partie, par l'étude combinée de la variation du nombre et des intensités des cris détectés, nous allons interpréter la variation saisonnière de la présence des baleines bleues Antarctique et pygmées. On notera que la majorité des interprétations seront déduites de l'analyse faite sur le réseau nord. En effet, le réseau sud étant fortement bruité, le nombre de cris est très certainement sous-estimé et l'analyse des variations et des tendances sera à prendre avec précaution.

La baleine bleue Antarctique

Automne et hiver

Pour la première fois, cette étude révèle la présence de la sous-espèce de baleine bleue Antarctique au dessus du 56^{ème} parallèle toute l'année, en particulier durant l'automne et l'hiver austral. En effet, des signatures acoustiques sont détectées dans quasiment tous les enregistrements disponibles en mai et en juin (sur le réseau nord), ce qui suggère que les baleines bleues Antarctique sont largement présentes en zone subantarctique à la fin de l'automne et au début de l'hiver. Pendant cette période, le nombre de cris moyen détectés par heure est maximal et indique que, majoritairement, plusieurs individus acoustiquement actifs sont présents durant la même période. Les intensités reçues sont fortes par rapport au reste de l'année, suggérant que les baleines sont à proximité du réseau. Cette période coïncide très certainement avec la période de migration des grandes baleines vers le nord et qui fait suite à la période d'alimentation intensive dans les hautes latitudes. Par une approche acoustique similaire, dans la péninsule Antarctique, il a été reporté que le nombre de cris détectés diminue considérablement entre avril et mai suggérant le départ d'une partie de la population acoustiquement active vers le nord (Širović et al 2004).

Pendant tout l'hiver et jusqu'au début du printemps (septembre), le nombre de cris détectés diminue progressivement. A une échelle journalière, le nombre de cris varie fortement et on détecte ainsi plusieurs pics de détection dont un en juillet et un en août. Ces pics ne sont pas facilement interprétables et plusieurs hypothèses peuvent alors être envisageables. La variation du nombre de cris peut être le reflet de l'activité vocale des baleines qui diminuerait durant l'hiver. Si, comme pour les baleines à bosse, l'activité vocale des baleines bleues est liée à la reproduction alors, pendant l'hiver, il est possible d'enregistrer des fortes variations dans le nombre de cris selon le nombre de baleines présentes dans la zone et leurs activités. Ces variations peuvent être également le résultat de déplacements permanents des baleines autour de la zone d'écoute. Dans ce cas, durant l'hiver, les baleines bleues Antarctique seraient largement dispersées en zone subantarctique. Nous ne savons pas si les baleines détectées sont les mêmes durant cette période, par conséquent, il est également possible d'envisager que ces signaux soit le reflet d'un flux inconstant de baleines migrantes vers le nord. Dans ce cas, la majeure partie des individus serait arrivée en mai et en juin dans cette zone ; puis, un décalage dans les dates de migrations ferait que certains individus arriveraient plus tard dans la saison et passeraient ainsi

durant quelques jours ou quelques heures à proximité de la zone de détection de la station HA4, ce qui expliquerait alors une augmentation ponctuelle dans le nombre de cris détectés. Ces décalages interindividuels dans les dates de migration ont déjà été reportés chez certaines espèces de grandes baleines et seraient dues à une différence d'âge, de sexe ou de statut reproducteur des individus (Dawbin 1997).

Printemps et été

De septembre à novembre, le nombre de cris moyen par heure augmente ainsi que le nombre d'heures durant lesquelles ces cris ont été détectés. En revanche, l'intensité des cris détectés diminue fortement. Ce changement peut alors être assimilé comme la signature du passage des baleines du nord vers le sud, sur de courtes périodes de temps, à proximité de Crozet et qui correspondrait au flux migratoire des grandes baleines vers les hautes latitudes et les zones d'alimentations estivales. D'après les observations visuelles de baleines bleues Antarctique au sud du 60^{ème} parallèle (Kasamatsu et al 1996), le nombre de baleines bleues augmente peu de novembre à février suggérant que la majorité des baleines bleues sont déjà présentes en zone Antarctique en novembre. Par conséquent, il est possible que la période de migration nord – sud se soit déroulée avant, c'est-à-dire en septembre ou en octobre, comme le suggèrent nos résultats. Cette augmentation du nombre de cris détectés a également été vue sur le réseau sud mais la grande différence dans le nombre de détection entre les deux réseaux ne permet pas de dire si on observe un décalage dans le nombre de cris détectés entre le passage des baleines du nord vers le sud. Le trajet migratoire se fait généralement par une route directe et de nombreuses observations de baleines bleues ont été reportées l'été dans la zone Antarctique localisée à la même longitude que notre aire d'écoute (Kasamatsu et al 1996).

De la fin du printemps (novembre) au milieu de l'été (janvier) le nombre de cris diminue fortement et l'intensité reçue des cris est à sa valeur la plus faible. La majorité des baleines a probablement quitté la zone et une partie de la population reste à la limite de la zone de détection autorisée par le détecteur automatique. A la fin de l'été (février), le nombre de cris augmente brusquement ainsi que l'intensité des cris mesurés à la station. Ces nets changements de détections supposent une arrivée importante des baleines bleues Antarctique dans notre zone de détection à la fin de l'été. Cette augmentation peut être interprétée comme le retour d'une partie de la population des hautes latitudes vers les moyennes latitudes après la période d'alimentation estivale. Cependant ce retour en zone subantarctique semble avoir lieu relativement tôt alors que

le maximum de cris détectés en Antarctique a lieu aux mois de mars, avril et mai (Širović et al 2004, McKay et al 2005, Mellinger et al 2007). Nous pouvons alors supposer que cette augmentation en février soit tout simplement un rapprochement des baleines non-migrantes vers Crozet et la zone de capacité de détection de notre système. La diminution du nombre de cris au début de l'automne (mars) suggère que l'espèce n'est plus concentrée autour de la zone de Crozet et qu'elle se disperse certainement à l'automne. En mars et avril, le nombre de cris est constant. Les baleines sont présentes dans le secteur et leurs activités vocales ou leurs déplacements font légèrement varier le nombre de détections. Les intensités reçues sont largement distribuées, confirmant la dispersion de l'espèce, mais la majorité des cris sont enregistrés au plus proche du réseau. A la fin de l'automne (mai) l'augmentation importante du nombre de détection suggère cette fois davantage le retour des baleines migrantes vers la zone subantarctique.

A ce jour, aucune étude n'avait révélé une présence annuelle de baleine bleue Antarctique en zone subantarctique. Ces résultats vont à l'encontre des schémas classiques de migrations de cette espèce reconnus actuellement (Kasamatsu & Joyce 1995, Kasamatsu et al 2000). En hiver, les résultats de la présente étude coïncident avec les détections de signatures acoustiques de baleines bleues dans les basses latitudes (Stafford et al 2004, McCauley et al 2004) et révèle que le sud-ouest de l'Océan Indien est une zone de présence des baleines bleues Antarctique pendant la saison de reproduction. Cependant, en été, cette étude révèle tout d'abord qu'une partie de la population de baleines bleues Antarctique quitte la zone subantarctique pour effectuer leur migration vers la zone Antarctique. Cependant, une détection annuelle de cris dans la zone suppose qu'une autre partie de la population resterait en zone subantarctique durant la période d'alimentation. L'âge, le statut reproducteur ou la condition individuelle des animaux pourraient expliquer de telle différence. Les baleines non-migrantes trouveraient alors des ressources alimentaires en zone subantarctique et probablement à proximité du front subantarctique, zone très productive particulièrement pendant l'été. La diminution de l'intensité des cris de baleine bleue Antarctique à la station durant cette période suggère un léger déplacement de la population et l'étude sur la localisation nous permettra probablement d'évaluer cette distance.

La baleine bleue pygmée

Type Madagascar

La sous-population de baleines bleues pygmées majoritairement présente dans le sud-ouest de l'Océan Indien est, d'après la signature vocale caractéristique enregistrée, celle de Madagascar. Ce résultat est parfaitement en accord avec la localisation géographique de notre aire d'écoute. Sur le réseau sud, les uniques signatures acoustiques enregistrées ont été détectées uniquement durant l'été et sur de très courtes périodes de temps (de l'ordre de quelques heures à quelques jours) et avec une intensité reçue très importante. Par conséquent, très peu de baleines bleues pygmées semblent évoluer au sud de notre aire d'écoute et les seuls individus détectés au sud restent très proches de la station.

La présence de baleines bleues pygmées de type Madagascar dans la partie Indienne de l'Océan Austral présente une très forte saisonnalité. Le nombre de cris détectés (mensuel ou journalier) est faible à la fin de l'automne puis devient quasi nul durant tout l'hiver et le début du printemps. Il augmente progressivement au début de l'été avant d'atteindre son maximum durant la deuxième moitié de l'automne (avril). La variation de l'intensité des cris reçus aux hydrophones révèle à son tour un éloignement en automne-hiver (mai-juin) puis un rapprochement progressif des individus acoustiquement actifs par rapport à la station l'été.

Par conséquent, ces résultats suggèrent que les baleines bleues pygmées de type Madagascar sont présentes dans la partie Indienne de l'Océan Austral durant la fin du printemps, l'été et atteint son maximum au milieu de l'automne austral. La diminution importante du nombre de signatures acoustiques dans la deuxième partie de l'automne suggère, soit un arrêt de l'activité vocale de l'espèce, soit un départ des individus au delà de la capacité de détection de notre système. Cette espèce a été enregistrée au sud de Madagascar en décembre (Ljungbald et al 1998) et au nord de l'Océan Indien en mai et juin (Stafford et al 2005) ce qui suggèrent un déplacement des populations vers le nord de l'Océan Indien en hiver. Les observatoires d'écoutes à l'ouest de l'Australie et en Antarctique n'ont jamais détecté de signatures acoustiques de baleines bleues pygmées de type Madagascar auparavant, que ce soit en hiver ou en été.

Nous avons vu, dans la partie précédente, que la présence dans les enregistrements de signaux hautes fréquences en association avec des signatures acoustiques de baleines bleues pouvait être un indice de l'activité d'alimentation des baleines bleues. Dans notre étude, ce signal a largement été enregistré en même temps que les signatures acoustiques des baleines bleues pygmées soit de janvier à avril. Par conséquent, la présente étude révèle que, pendant

l'été, tout comme pour les baleines bleues Antarctique, les baleines bleues pygmées de type Madagascar semblent se nourrir en zone subantarctique. Par ailleurs, notre zone d'écoute est peu éloignée du front subantarctique, zone très productive particulièrement pendant l'été où d'importantes biomasses zooplanctoniques sont disponibles pour l'alimentation des baleines bleues. Cependant, de récentes études suggèrent que l'activité vocale des baleines, qui a lieu dans les 30-50 premiers mètres de la colonne d'eau, peut être incompatible avec l'acquisition des ressources et plus particulièrement les plongées alimentaires profondes (Oleson et al 2007). Par conséquent, l'efficacité d'avoir un tel comportement acoustique en période d'alimentation intensive reste discutable. Dans cette étude, la production de cris durant les mois de janvier à mars est intermittente ; par conséquent, il est possible que les baleines distinguent les deux activités. Les proies des baleines bleues effectuent des migrations nyctémérales rendant compatibles l'activité d'alimentation et de vocalisation à certaines périodes de la journée (Stafford et al 2005). Une étude plus détaillée sur la variation du nombre de cris selon l'heure de la journée permettrait de voir si l'activité vocale varie au cours de la journée.

Type Australie

Quelques signatures acoustiques caractéristiques de la baleine bleue pygmée d'Australie présentes dans les enregistrements de la station HA4 témoignent de la présence occasionnelle de quelques individus de cette sous-population durant l'été et au début de l'automne au sud-ouest de l'Océan Indien. La baleine bleue pygmée d'Australie est acoustiquement très active durant l'été austral à l'ouest de l'Australie (McCauley et al 2001, 2004, Stafford et al 2005). Par conséquent, la présence de ces signaux acoustiques dans nos enregistrements témoigne d'un déplacement d'un ou plusieurs individus de la sous-population des baleines bleues pygmées de l'est de l'Océan Indien vers la partie centrale et ouest du bassin durant l'été. Comme pour la baleine bleue pygmée de type Madagascar, les baleines bleues pygmées de type Australie sont en période d'alimentation intensive durant cette période (Gill 2002). L'hypothèse d'un déplacement de quelques individus d'Australie vers la zone des fronts subantarctiques de l'ouest de l'Océan Indien pour s'y alimenter est alors envisageable. Pour préciser les éventuelles migrations longitudinales de cette sous-population de baleines bleues pygmées, il serait particulièrement intéressant de vérifier si, plus à l'est de notre réseau, vers les îles Kerguelen par exemple, des signaux acoustiques de baleines bleues pygmées de type Australie sont détectés à une période de l'année et en particulier l'été.

Le rorqual commun

Les impulsions de 20 Hz caractéristiques de la présence des rorquals communs ont été enregistrées dans le sud-ouest de l’Océan Indien de juin à octobre, soit durant l’hiver et le printemps austral mais aussi au début de l’automne (mars). La détection de ces signaux durant l’hiver austral suggère alors la présence occasionnelle de rorqual commun dans cette zone durant cette période. L’augmentation des signaux au début de l’automne correspond davantage à la période de migration de l’espèce vers les moyennes latitudes. En péninsule Antarctique, les signatures acoustiques typiques de rorquals communs ne sont plus détectées dès le mois de juin et jusqu’au début du mois de mars suggérant que, durant cette période, ces grandes baleines quittent la zone pour migrer vers des eaux plus tempérées (Širović et al 2004). Dans notre étude, la présence de signatures vocales typiques de rorquals communs dans nos enregistrements dès le mois de mars suggère que certaines de ces grandes baleines migrent en zone subantarctique à la fin de l’été et reste dans ces latitudes durant l’hiver. Durant ces différents mois, la présence occasionnelle de ces signaux acoustiques souligne que ces animaux n’occupent certainement pas un secteur géographique proche de notre aire d’écoute l’hiver.

Le système d’écoute

Bien que les enregistrements issus de la station HA4 aient apporté de nouvelles connaissances sur les grandes baleines présentes dans le secteur Indien de l’Océan Austral, la détection des signaux acoustiques des grandes baleines a révélé que le système d’écoute n’était pas tout à fait optimisé pour une étude acoustique sur des sources biologiques en mouvement. En effet, au sein d’un même réseau, il apparaît que les hydrophones enregistrent approximativement la même chose (même nombre de cris détectés, même intensité, même niveau de pression acoustique du bruit ambiant) et la courte distance séparant les hydrophones dans un triplet n’est pas suffisante pour apprécier une variation dans le nombre de cris révélatrice d’un déplacement de population par exemple. Le travail sur la saisonnalité des cris détectés à la station hydroacoustique HA4 aurait par ailleurs pu être fait sur un seul hydrophone par réseau. Cette information peut être intéressante dans le cadre d’une éventuelle exploitation, pour l’étude des grandes baleines, des enregistrements issus des autres stations du SSI actuellement en place dans l’Océan Indien.

Conclusion

Dans cette seconde partie, en réponse à la question suivante « **QUAND EST-CE QUE CES SOUS-ESPECES ET ESPECES DE GRANDES BALEINES SONT PRESENTES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL?** », les enregistrements de la station hydroacoustique HA4 révèlent qu'une partie de la population de baleines bleues Antarctique est présente durant l'hiver austral et qu'elle semble migrer vers le sud dès le mois de septembre. Cependant, une autre partie de la population semble rester à proximité de la zone subantarctique l'été, où elle se nourrit probablement dans la zone des fronts subantarctiques. Durant cette période, le secteur Indien de l'Océan Austral semble être également une aire d'alimentation privilégiée des baleines bleues pygmées de type Madagascar. Cette étude révèle la sympatrie de ces deux sous-espèces de baleines bleues durant l'été et une partie de l'automne. De même que la détection de quelques cris de baleines bleues pygmées de type Madagascar en même temps que des signaux de type Australie met en évidence la sympatrie de ces deux sous-populations.

Le secteur Indien de l'Océan Austral semble être une zone de présence de la baleine bleue Antarctique et du rorqual commun durant l'hiver. En revanche, l'absence de signatures acoustiques de baleines bleues pygmées de type Madagascar durant cette période indique que cette sous-espèce ne privilégie pas cette zone pour la reproduction.

L'étude des données de captures avait déterminé la zone des 52-56°S comme la frontière entre les deux sous-espèces de baleine bleue ; il est, par conséquent, surprenant d'enregistrer leurs présences dans le même secteur géographique. Cette étude tend à confirmer la présence de la baleine bleue pygmée au delà de cette frontière une partie de l'année mais indique également la présence de la baleine bleue Antarctique à ces latitudes toute l'année. Pour cette sous-espèce, les frontières de distribution latitudinales ne semblent pas si fixes. L'étude sur la localisation permettra de connaître la capacité de détection de notre réseau et d'établir où se situent ces deux sous-espèces dans la partie Indienne de l'Océan Austral.

PARTIE 3 :

LOCALISATION DES BALEINES BLEUES ANTARCTIQUE ET PYGMEES AU SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN : ELEMENTS DE REPONSE.

Par la détection de leurs signatures acoustiques caractéristiques, les premières et secondes parties de ce travail de thèse ont montré que trois espèces ou sous-espèces de grandes baleines étaient présentes au sud-ouest de l'Océan Indien. Le rorqual commun est présent occasionnellement et uniquement au début de l'automne et durant l'hiver. La baleine bleue Antarctique est présente toute l'année : cependant, la diminution du nombre de cris et de l'intensité reçue suppose qu'une partie de la population s'éloignerait et, possiblement, quitterait la zone durant l'été austral. La baleine bleue pygmée de type Madagascar est présente uniquement une partie de l'année, durant l'été et l'automne. La saisonnalité des détections des signatures acoustiques des deux sous-espèces de baleines bleues suggère des déplacements de population. Nous allons tenter, dans cette dernière partie, de mettre en évidence ces déplacements et de connaître « **OU LES DEUX SOUS-ESPECES DE BALEINES BLEUES SONT-ELLES LOCALISEES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL ?** ». Cette partie présente et discute les principaux résultats obtenus pour répondre à cette question.

3.1. Résultats

3.1.1. Localisation par méthode de triangulation

Les résultats de la localisation des baleines bleues Antarctiques et pygmées à l'aide de la méthode de triangulation adaptée à la station HA4 seront présentés selon les trois scénarios possibles décrits dans le chapitre précédent (Matériel et Méthodes § 4.2.5). Cette méthode a été appliquée sur tous les enregistrements du réseau sud disponibles de mai 2003 à décembre 2004 pour calculer les angles de provenance de la source émettrice d'une séquence de cris en utilisant la différence dans les temps d'arrivée des cris sur les 3 hydrophones du réseau. Les critères

imposés et décrits dans les méthodes ont retenus un total de 95 séquences composées de 4 à 23 cris de baleines bleues Antarctique soit 723 cris répartis sur 55 jours. En revanche, il n'a été retenu, après application de nos critères, que 6 séquences composées de 45 cris de baleines bleues pygmées répartis sur seulement 2 heures d'enregistrements (on rappellera qu'un très faible nombre de signatures acoustiques caractéristiques de la baleine bleue pygmée avait été détecté sur le réseau sud – cf. Figure 3.2). Dans ces séquences, le croisement des hyperboles a été possible, permettant alors de positionner l'animal et de suivre sa trajectoire. Ce scénario particulier sera traité dans la partie suivante.

3.1.1.1. Scénario 1 : estimation de l'angle moyen de provenance de la baleine avec un seul réseau

Rappelons que, dans ce scénario, le résultat de l'application de la méthode de triangulation indique que, pour une séquence de cris étudiée, l'angle moyen de provenance de la source déduit présente un écart-type étroit ; autrement dit, d'un cri à l'autre, la position de la baleine varie peu et on peut alors déduire dans quel angle moyen l'animal se situe par rapport au réseau.

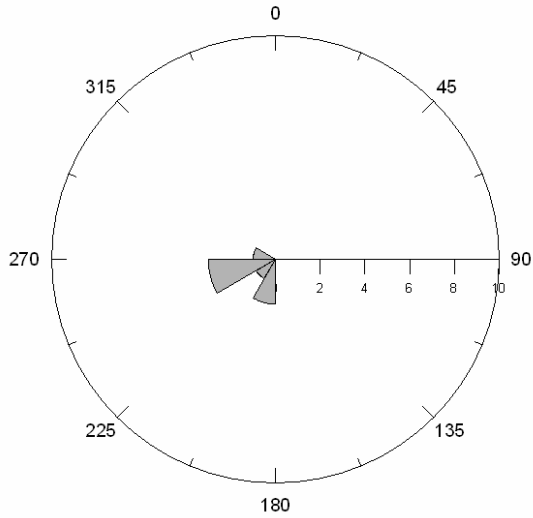
Les figures 3.20 et 3.21 résument, mois par mois, les angles moyens obtenus pour les différentes séquences de cris de baleines bleues Antarctique retenues. Au mois de mai, très peu de cris ont passés les critères ($n=9$). Le travail s'est fait uniquement sur 2 séquences réparties sur 2 jours différents. Les 2 angles moyens déduits indiquent la même direction, à savoir nord-ouest. Au mois de juin, un nombre maximum de cris a satisfait à nos critères ($n=325$) et 32 angles ont été calculés, répartis sur 14 jours. La majorité de ces angles indique une direction sud. Au mois de juillet, moins de cris ont été retenus, via nos critères ($n=128$) et 15 angles ont été calculés, répartis sur 6 jours uniquement (au début et à la fin du mois). Une grande partie des angles indique les directions est et sud-est. Nous reviendrons sur certaines séquences de ce mois dans cette partie. En août, nettement moins d'heures d'enregistrements étaient disponibles sur le réseau sud. Néanmoins, seuls 30 cris répartis sur 5 jours (au début et à la fin du mois) ont satisfait les critères. Néanmoins, les angles moyens ne définissent pas une direction principale pour ce mois. En septembre, nos critères ont permis de retenir 7 séquences composées de 53 cris réparties sur 6 jours bien distincts dans le mois. Les angles moyens calculés sont ouest sud-ouest. En octobre, nous avons obtenu 14 séquences composées de 84 cris répartis sur 8 jours bien distincts dans le mois. Les angles moyens sont nettement orientés sud. En novembre, nous avons 85 cris répartis

sur 18 séquences. Ces séquences étaient également réparties de façon homogène dans le mois (12 jours). Les angles moyens sont orientés sud mais une partie tend vers la direction ouest. Enfin, en décembre, très peu de cris ont vérifié les critères ($n=9$). Les 2 angles moyens sont opposés, ne permettant pas de définir une direction principale pour ce mois.

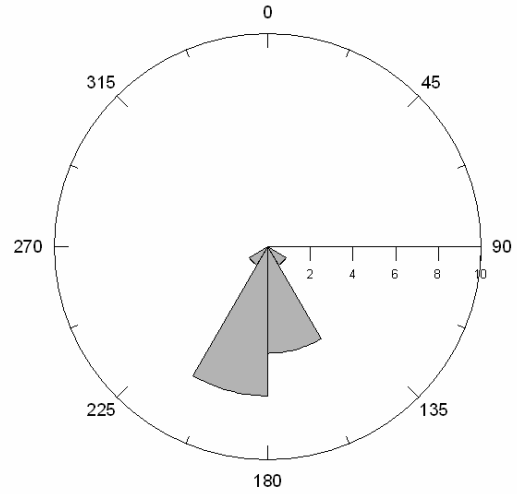


Figure 3.20 : Histogrammes circulaires de fréquences des angles moyens déduits de la méthode de triangulation pour les cris de baleines bleues Antarctique détectés sur le réseau sud de mai à août 2003. La longueur des segments correspond au nombre de séquences de cris sur lesquelles l'angle déterminé a été calculé.

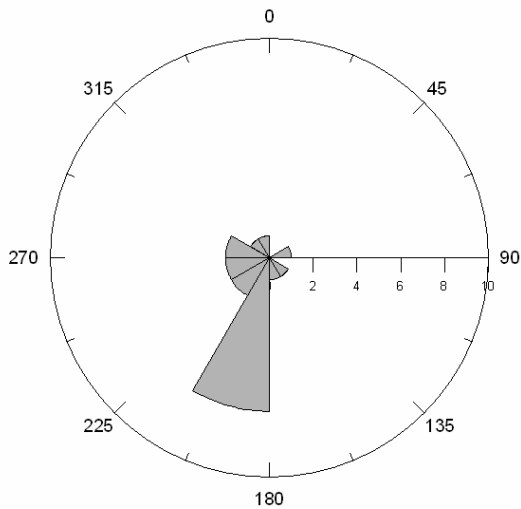
septembre (n=7 séquences)



octobre (n=14 séquences)



novembre (n=18 séquences)



décembre (n=2 séquences)

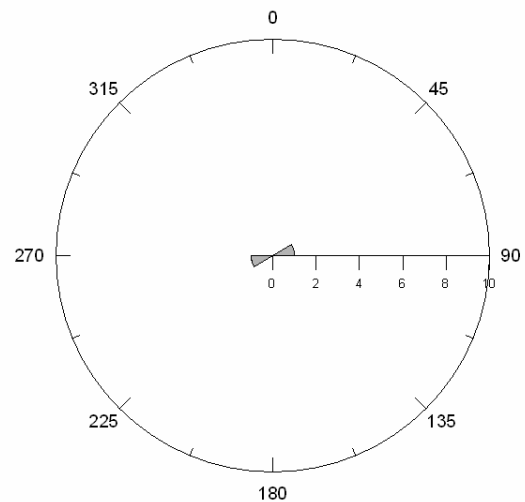


Figure 3.21 : Histogrammes circulaires de fréquences des angles moyens déduits de la méthode de triangulation pour les cris de baleines bleues Antarctique détectés sur le réseau sud de septembre à décembre 2003. La longueur des segments correspond au nombre de séquences de cris sur lesquelles l'angle déterminé a été calculé.

3.1.1.2. Scénario 2 : estimation de la position de la baleine avec les deux réseaux

Dans ce scénario, l'angle moyen de provenance de la baleine déduit par la méthode de triangulation est localisé au nord-est du réseau sud. Cette zone est décrite, par les constructeurs de la station, comme la zone de détection que recouvrent les deux réseaux. Par conséquent, pour toutes les séquences de cris indiquant cette direction, nous avons recherché si ces cris avaient également été détectés sur le réseau nord. Le rythme de production et la mesure des intervalles inter-cris ont alors été utilisés pour authentifier les cris dans les enregistrements du réseau nord. A une seule occasion (en juillet), nous avons une série de cris de baleine bleue Antarctique dans laquelle la majorité de cris de la séquence (n=16) ont été détectés sur les deux réseaux.

La différence des temps d'arrivée des signaux a été calculée entre les hydrophones d'un même réseau et entre les hydrophones des deux réseaux. La qualité des enregistrements sur le réseau sud a rendu difficile l'estimation du délai pour de nombreux cris de cette série. Le croisement des hyperboles a toutefois été possible pour quelques cris et la position de la source a alors pu être estimée. La figure 3.22 présente les résultats des croisements des hyperboles obtenus pour deux cris consécutifs et indique, par conséquent, la position de la source du signal. La baleine est localisée à 150-200km de la station.

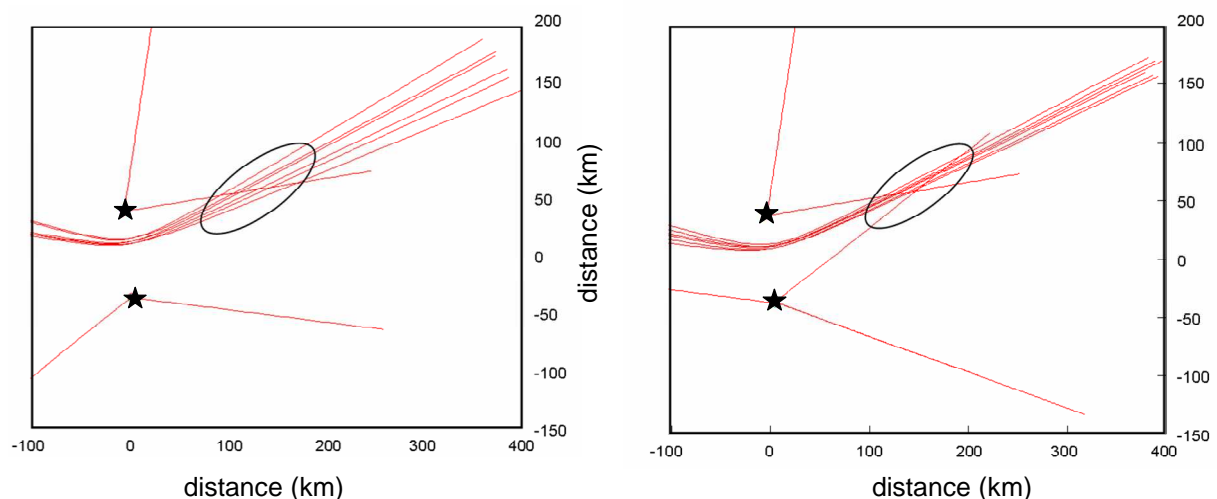


Figure 3.22 : Exemples de l'estimation de la position d'une baleine bleue Antarctique par méthode hyperbolique à la station HA4. Les deux étoiles représentent les deux réseaux de la station. Les intersections des hyperboles obtenues pour chaque réseau et entre les deux réseaux indiquent que la source est située à environ 150-200km de la station.

3.1.1.3. Scénario 3 : estimation des positions de la baleine et suivis de trajectoires.

Sur le réseau sud, la visualisation des figures du tracé des hyperboles a permis de mettre en évidence quelques séquences où les hyperboles résultantes se croisaient à proximité du réseau, déterminant ainsi la position exacte en 2 dimensions de l'animal. Nous avons effectué un suivi précis de la trajectoire de l'animal ou « *tracking* » afin d'en extraire certaines caractéristiques telles que la vitesse de déplacement et l'intensité sonore mesurée à la source. Nous illustrons cela par les deux suivis de trajectoire suivants, l'un issu de signaux acoustiques émis par une baleine bleue Antarctique et l'autre à partir de signaux acoustiques émis par une baleine bleue pygmée.

A. Tracking de baleine bleue Antarctique

La méthode de triangulation a été appliquée sur 11 séquences consécutives composées de 4 à 20 cris de baleine bleue Antarctique détectés durant une période de 5 heures en juillet 2003. Pour chaque séquence, un angle de direction moyen de la source a été déduit révélant un changement de cap progressif de l'animal de 230° à 50° (Figure 3.23).

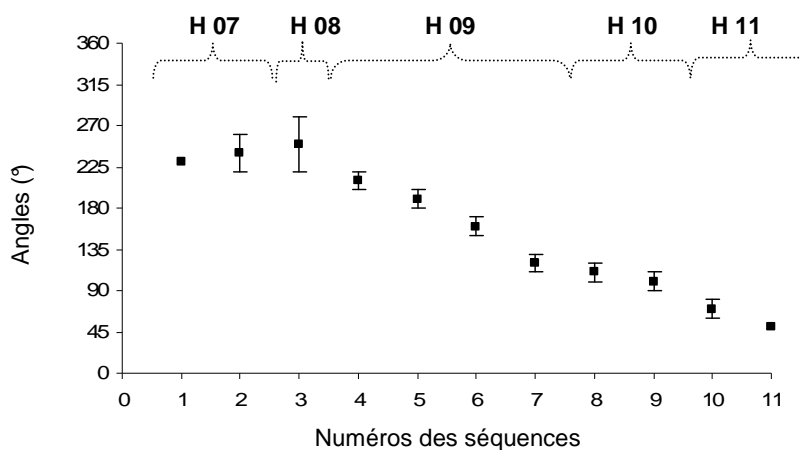


Figure 3.23 : Angles moyens pour 11 séquences de cris d'une baleine bleue Antarctique consécutives obtenus par la méthode hyperbolique pour des cris détectés durant 5 heures (de l'heure 07 à l'heure 11) en juillet 2003 sur le réseau sud.

Ce changement a lieu précisément durant l'heure 09. Pour cette heure, l'intervalle entre les cris était régulier, suggérant qu'un seul individu était acoustiquement actif (Figure 3.22 [A]).

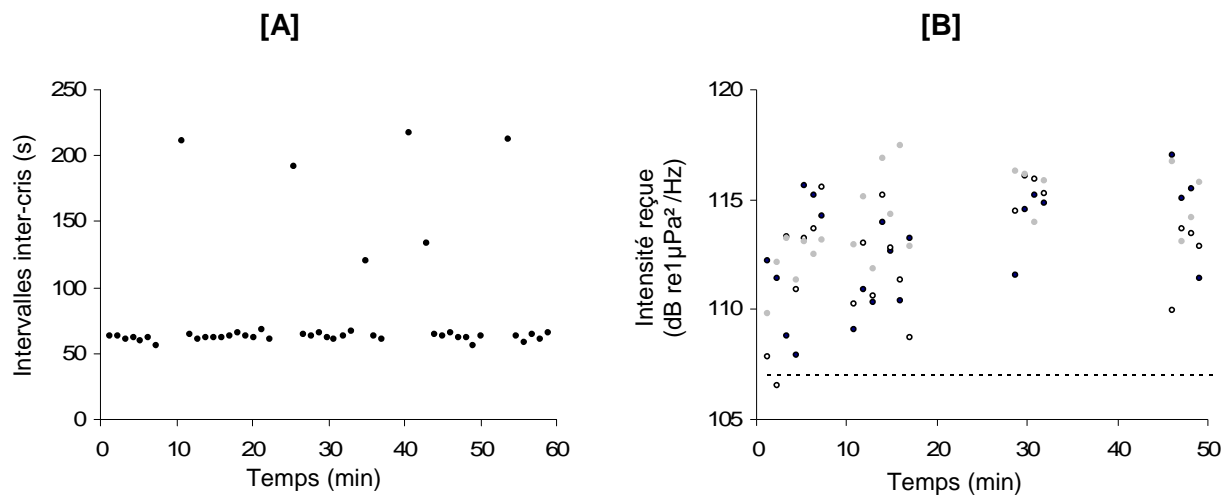


Figure 3.24 : [A] Intervalles inter-cris mesurés sur tous les cris de baleine bleue Antarctique de l'heure 09 et [B] intensités reçues sur l'hydrophone S1 (noir), S2 (blanc) et S3 (gris) mesurées sur les 4 séquences de cris retenus pour le suivi de trajectoire. Sur [B], la ligne horizontale en pointillée à 107 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ correspond au niveau acoustique du bruit ambiant mesuré dans cet enregistrement.

La visualisation du tracé des hyperboles a été faite sur les 22 cris des 4 séquences retenues dans cette heure. Le RSB était positif et les intensités reçues étaient peu variables d'un hydrophone à l'autre (Figure 3.24 [B]) mais augmentaient légèrement et de la même manière sur les 3 hydrophones, suggérant qu'au cours de l'enregistrement, l'animal se rapprochait du réseau. Pour chaque cri étudié, les intersections entre les deux ou trois hyperboles, ont été relevées quand cela était possible, soit sur 7 cris, et placées sur une carte géographique contenant le réseau (Figure 3.25 [A]). Pour chaque position relevée, la distance R entre la baleine et chacun des trois hydrophones du réseau a été mesurée. Ce premier travail a permis de calculer la vitesse de déplacement de l'animal entre chaque position (Figure 3.25 [B]). Cette vitesse de nage est de 15 ± 10 km/h. Pour chaque hydrophone, la distribution des intensités reçues IR de chaque cri utilisé pour estimer la position a été tracée en fonction de la distance R entre la baleine et l'hydrophone (Figure 3.26 [A]). La pente de la droite de régression passant par les points de l'hydrophone S2 (le plus proche de la baleine) représente le coefficient de l'atténuation (Figure 3.24 [6]). Pour calculer l'intensité du cri à la source, nous faisons l'hypothèse que l'atténuation est sphérique. Ainsi, pour ce scénario, j'ai calculé que l'intensité à la source devait être de **179 ± 5 dB re $1\mu\text{Pa}$ à 1m.**

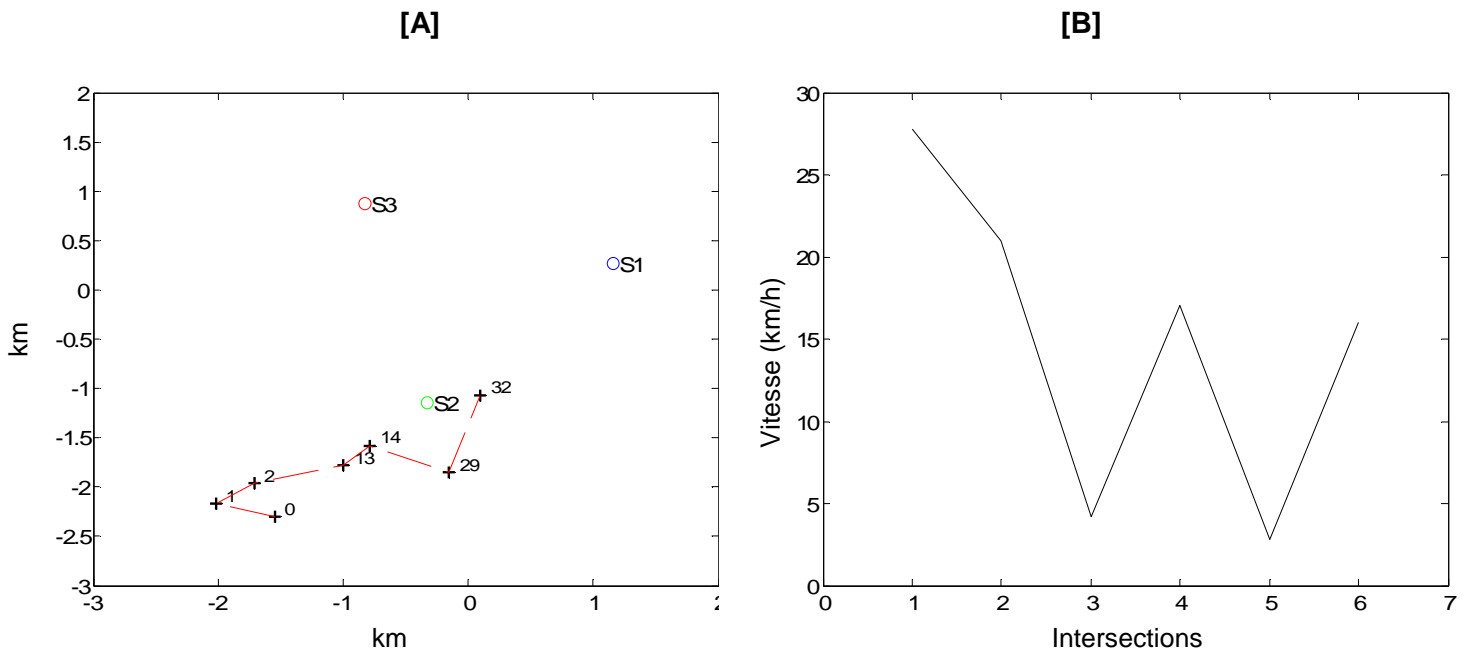


Figure 3.25 : [A] Tracé de la trajectoire de la baleine bleue Antarctique obtenu après mesure des intersections (chaque point représente une position et l'indice associé est le temps en minute à laquelle cette position a été mesurée dans l'enregistrement) et [B] vitesse associée pour chaque position.

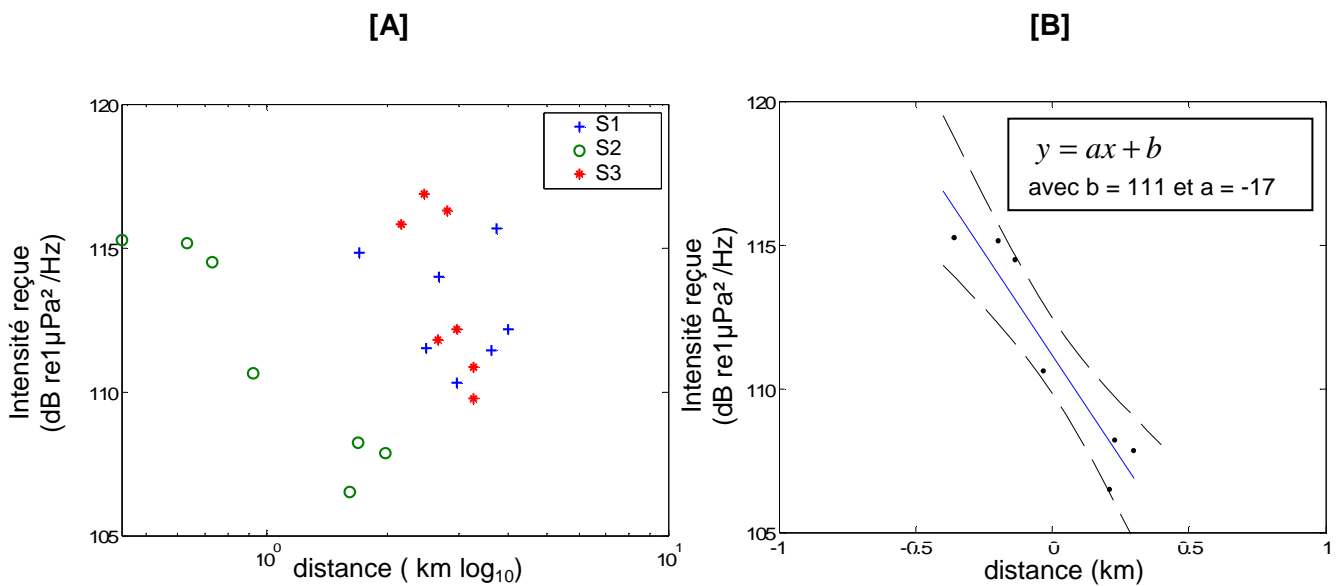


Figure 3.26 : [A] Intensités reçues en fonction des distances mesurées sur les 3 hydrophones du réseau sud et [B] droite de régression des intensités reçues sur l'hydrophone S2 avec un intervalle de confiance à 95%.

B. Tracking de baleine bleue pygmée

Très peu de cris de baleine bleue pygmée ont été détectés sur le réseau sud. Cependant, en mai 2003, pendant un peu plus de 2 heures, 58 cris de fortes intensités ont été détectés. L'intervalle entre les cris était régulier, suggérant qu'un seul individu était acoustiquement actif à ce moment là (Figure 3.27 [A]).

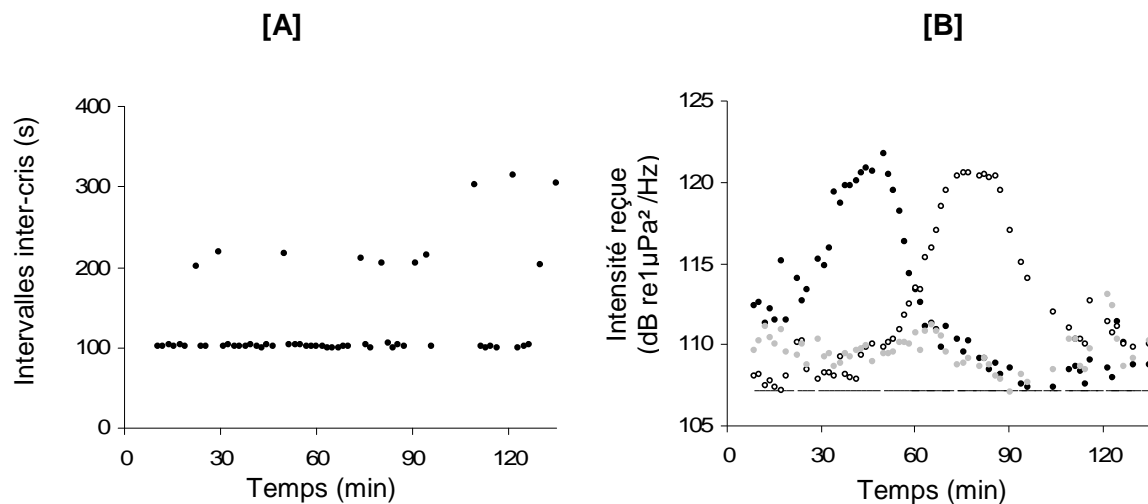


Figure 3.27 : [A] Intervalles inter-cris et [B] intensités reçues sur l'hydrophone S1 (noir), S2 (blanc) et S3 (gris) mesurés sur la série de cris de baleine bleue pygmée étudiée pour le suivi de trajectoire. Sur [B], la ligne horizontale en pointillée à 107 dB re 1 μPa²/Hz correspond au niveau acoustique du bruit ambiant mesuré pour cet enregistrement.

Le RSB était positif et les intensités reçues étaient variables d'un hydrophone à l'autre (Figure 3.27 [B]) suggérant qu'au cours de l'enregistrement, l'animal se rapproche de l'hydrophone S1 puis s'en éloigne pour se rapprocher de l'hydrophone S2. Sur l'hydrophone S3, l'intensité reçue ne change pas au cours du temps suggérant que l'animal se déplace à une distance quasiment constante de cet hydrophone. Dans cette première analyse, il apparaît que l'animal vient du nord-est du réseau (S1) et va en direction sud-ouest (S2) en étant parallèle à l'axe des hydrophones S1S2. Le passage des enregistrements dans nos critères de localisation a conservé 6 séquences, soit 45 cris. La visualisation du tracé des hyperboles a été faite sur ces 45 cris et l'intersection entre les deux ou trois hyperboles a été relevée quand cela était possible, soit sur 23 cris. Ces intersections ont été replacées sur une carte géographique contenant le réseau (Figure 3.28 [A]) et, pour chaque position relevée, la distance R entre la baleine et chacun des trois hydrophones du réseau a été mesurée. Ce travail a permis de calculer la vitesse de déplacement de l'animal entre chaque position (Figure 3.28 [B]). Néanmoins la vitesse calculée avec ces positions semblant peu compatible avec la vitesse de nage connue, en particulier à la fin

de la séquence où la vitesse augmente considérablement (vers l'intersection 17), nous avons recalculer la vitesse en enlevant certaines positions jugées aberrantes.

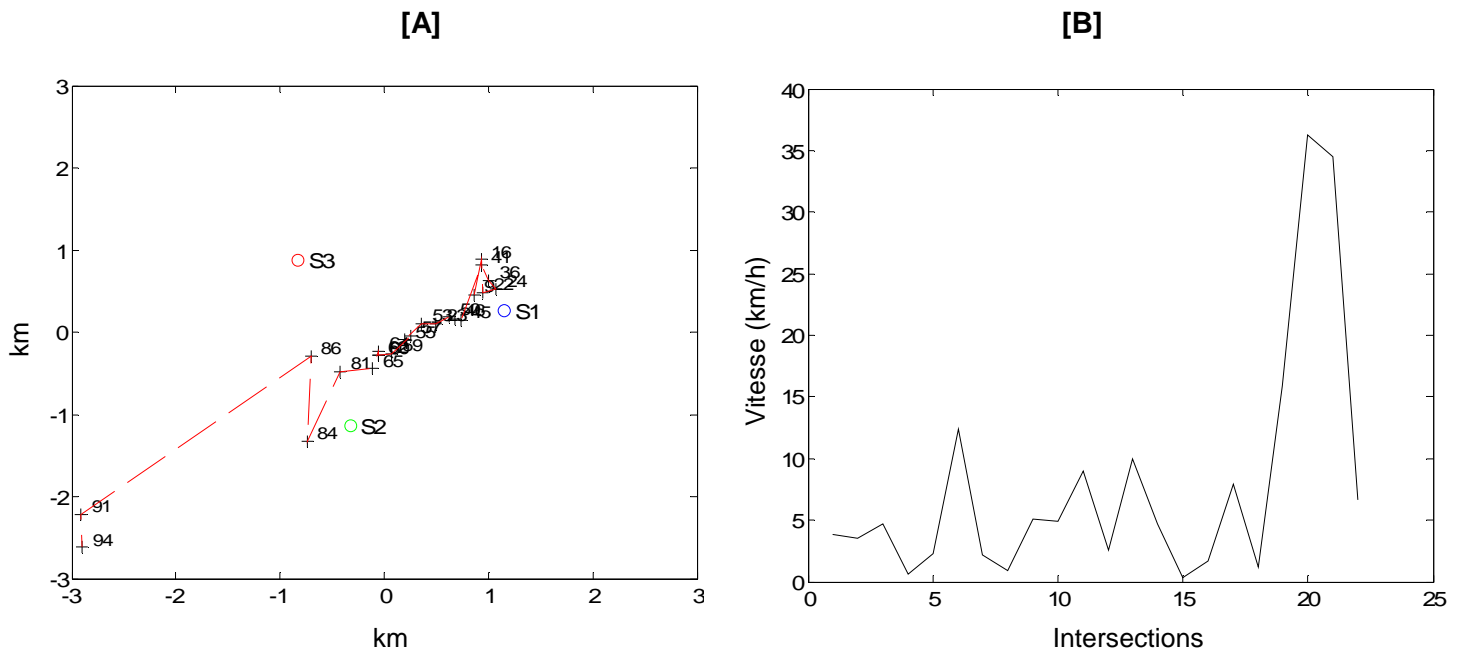


Figure 3.28 : [A] Tracé de la trajectoire de la baleine bleue pygmée obtenu après mesures des intersections (chaque point représente une position et l'indice associée est le temps en minute à laquelle cette position a été mesurée dans l'enregistrement) et [B] vitesse associée pour chaque position.

Au final, la vitesse de nage calculée est de 5 ± 3 km/h. Pour chaque hydrophone, la distribution des intensités reçues IR de chaque cri utilisé pour estimer la position a été tracée en fonction de la distance R entre la baleine et l'hydrophone (Figure 3.29 [A]). La pente de la droite de régression passant par ces points est égale à -21 ce qui est très proche du coefficient d'atténuation estimée par le modèle sphérique (Figure 3.29 [B]). L'intensité du cri à la source a été calculée en utilisant cette valeur d'atténuation pour les 3 hydrophones et est de 174 ± 1 dB re $1 \mu\text{Pa}$ à 1m.

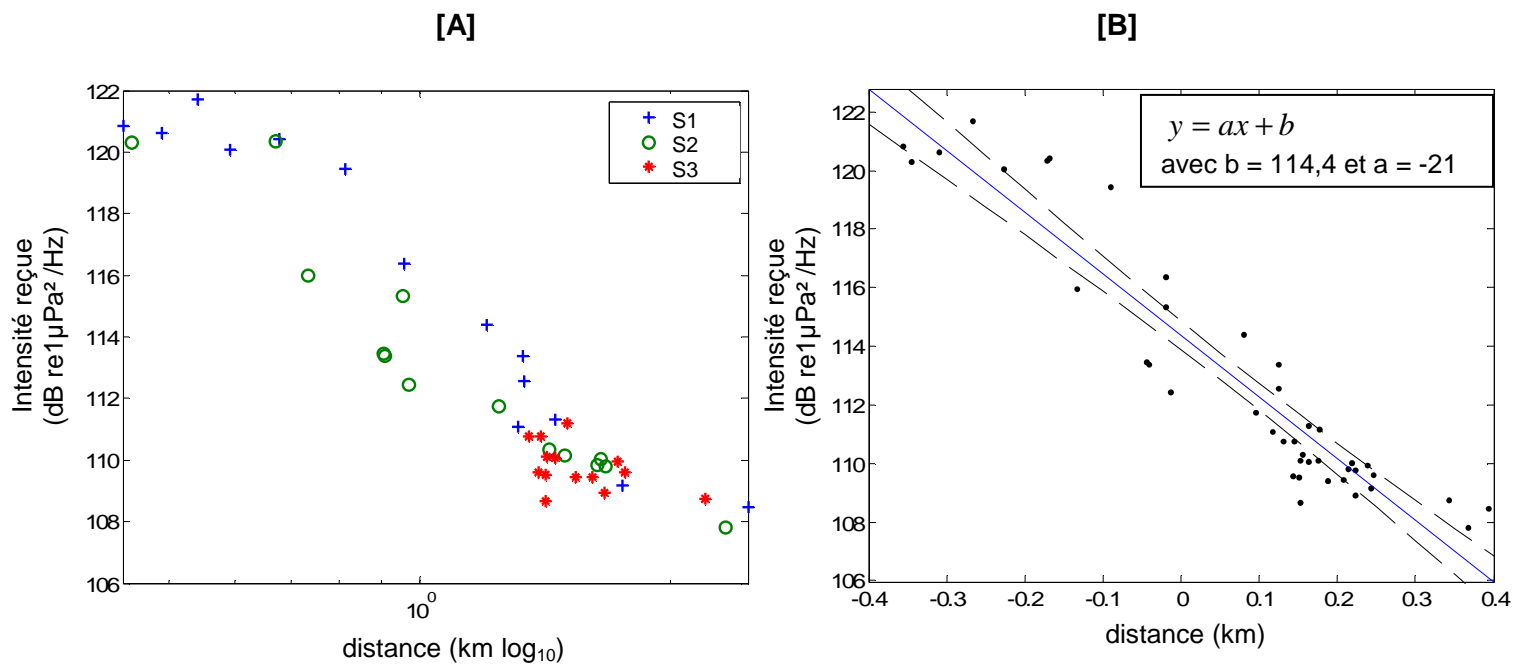


Figure 3.29 : [A] Intensités reçues en fonction des distances mesurées sur les 3 hydrophones du réseau sud et [B] droite de régression et intervalle de confiance à 95%.

En conclusion, ces deux suivis de trajectoire ont permis de donner une estimation de la puissance acoustique à la source pour les 2 espèces, à savoir 179 ± 5 dB re 1 μPa à 1 m pour la baleine bleue Antarctique et 174 ± 1 dB re 1 μPa à 1 m pour la baleine bleue pygmée.

3.1.2. Modélisation de la distance

3.1.2.1. Effet spatial

La modélisation de l'atténuation des signaux acoustiques de baleine bleue Antarctique et pygmée à l'aide du modèle de propagation du son RAM spécifiquement configuré à la station HA4 a permis d'améliorer nos connaissances sur la capacité de la station à détecter ces signaux spécifiques.

Nous avons choisi de simuler l'atténuation du signal et son effet sur les distances estimés à partir des cris détectés (i.e. les distances de détections) en utilisant le modèle de propagation RAM, notamment parce qu'il tenait compte des variations de la bathymétrie sur la distance. Par ces simulations de l'atténuation d'un signal de fréquence et d'intensité reçue fixe mesurée, tout

autour des deux réseaux, nous avons pu remarquer qu'il existait des secteurs azimutaux autour de chaque réseau où le signal est très rapidement atténué puisque les distances de détections déduites sont systématiquement réduites et ce quelque soit la saison. Sur le réseau nord, cette zone de masquage des signaux hydroacoustiques considérés se situe surtout à l'ouest et au sud du réseau (de 110° à 340°). Pour le réseau sud, cette zone se situe surtout au nord et au nord-ouest du réseau (de 270° à 40°). En combinant les deux réseaux, nous pouvons constater que la zone de détection de la station HA4 est large mais les signaux acoustiques à 25 et 28 Hz provenant d'une source localisée dans le secteur ouest nord-ouest de la station ne seront pas détectables (Figure 3.30). La bathymétrie, par la présence du plateau de Crozet, explique cette zone limite de détection. De la même manière, cette étude a permis de mettre en évidence les zones de détection communes entre les deux réseaux favorables pour localiser une source sonore en utilisant les deux réseaux de la station HA4.

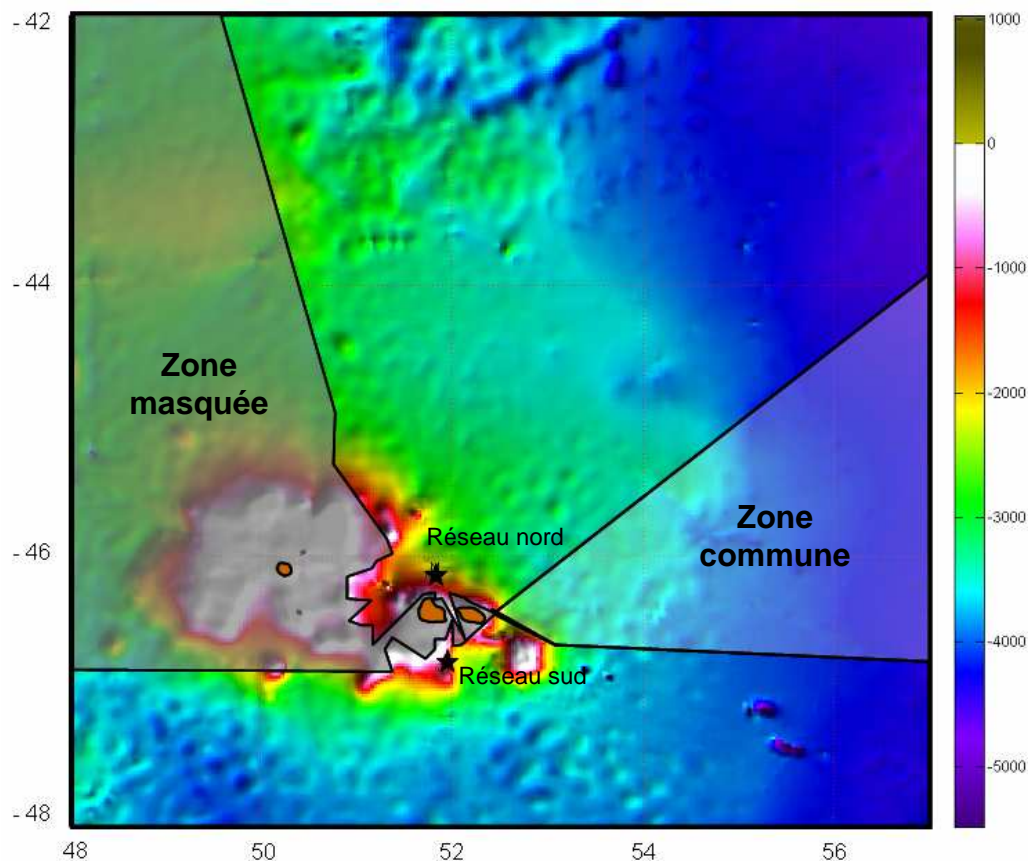


Figure 3.30 : Carte de bathymétrie de Crozet avec les zones de masques (en gris) et de recouvrements (en blanc) pour la détection de signaux à 25 et 28 Hz à la station HA4.

3.1.2.2. Distances estimés à partir des cris des deux sous-espèces de baleines bleues la station HA4

Les valeurs mensuelles des intensités reçues des cris de baleines bleues détectés à la station HA4 nous permettent, par le biais du modèle, d'estimer les distances où sont localisées les baleines bleues Antarctique et pygmées dans le secteur de détection possible de la station HA4. Dans les secteurs azimutaux non-masqués du nord et du sud nous avons constatés qu'il n'y avait pas de variation dans les estimations des distances selon l'angle considéré. Nous avons donc effectué ce travail dans le secteur de 10° pour le réseau nord et 180° pour le réseau sud afin de nous intéresser essentiellement aux mouvements des animaux selon un axe latitudinal.

A. Baleine bleue Antarctique

Pour la baleine bleue Antarctique, les distances estimées à partir des cris détectés ont été simulées en utilisant la valeur de l'intensité à la source estimée dans cette étude et qui est proche de celles reportées dans la littérature pour la baleine bleue en général (180 dB dBre1 μ Pa à 1m ; Thode et al 2000). Nous avons également simulé les distances en utilisant l'unique valeur d'intensité à la source estimée pour la baleine bleue Antarctique (Širović et al 2007). Puisque cette valeur est de 10 dB supérieure aux valeurs majoritairement reportées dans la littérature, il était intéressant d'observer comment ce paramètre peut influencer les distances modélisées.

- réseau nord

Les figures 3.31 [A] et [B] permettent tout d'abord de mettre en évidence l'effet du niveau sonore à la source choisi qui modifiera les distances de détection, dans ce cas, d'un facteur de 1,89 (179 dB dBre1 μ Pa à 1m vs 189 dB dBre1 μ Pa à 1m). La variation des distances de détection simulées à partir d'un signal d'une valeur constante à l'année (ligne noire en pointillée) montre que le modèle de propagation prend en compte l'effet de la saison sur la propagation du son. En effet on constate que les distances de détections diminuent de la fin de l'automne (mai) jusqu'à la fin de l'hiver (août) puis diminue de nouveau jusqu'au début de l'été avant d'augmenter à nouveau pendant la deuxième moitié de l'été et l'automne. On constate par ailleurs que les distances obtenues avec les valeurs minimums du bruit ambiant mesurées (ligne grise) varient également avec la saison. Puisque notre détecteur bORie est robuste jusqu'à un rapport signal-sur-bruit de -15 dB, c'est-à-dire que les cris détectés peuvent avoir une intensité

reçue jusqu'à -15 dB en dessous de celle du bruit ambiant, il est important de prendre en compte cette variation saisonnière du bruit ambiant pour interpréter les distances estimées des baleines.

[A]

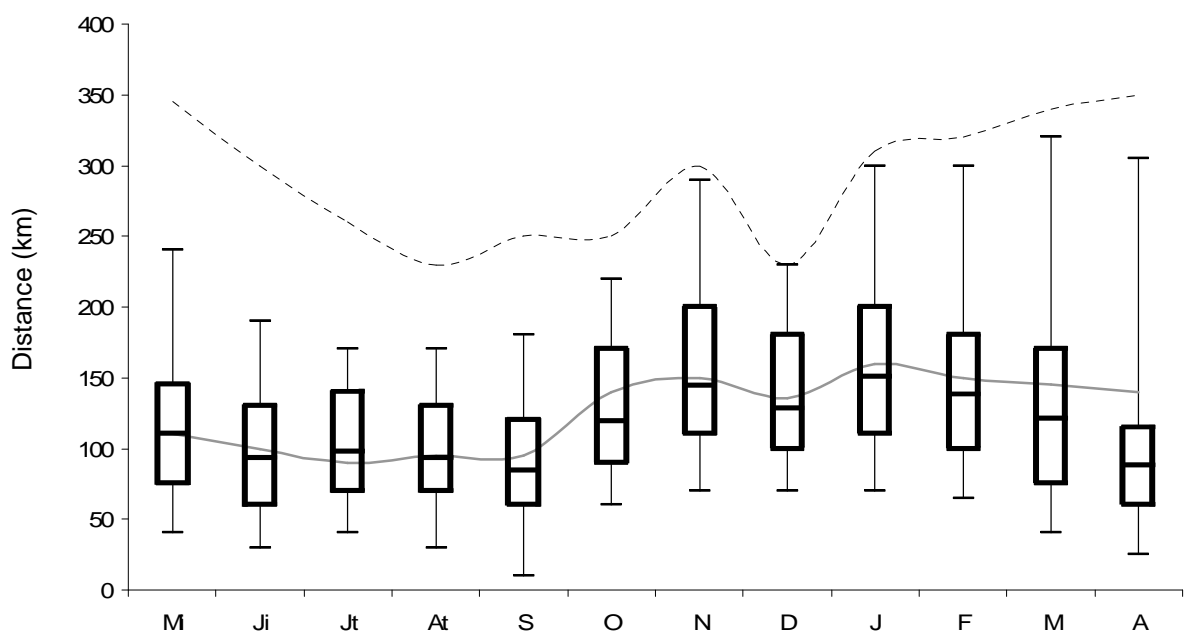
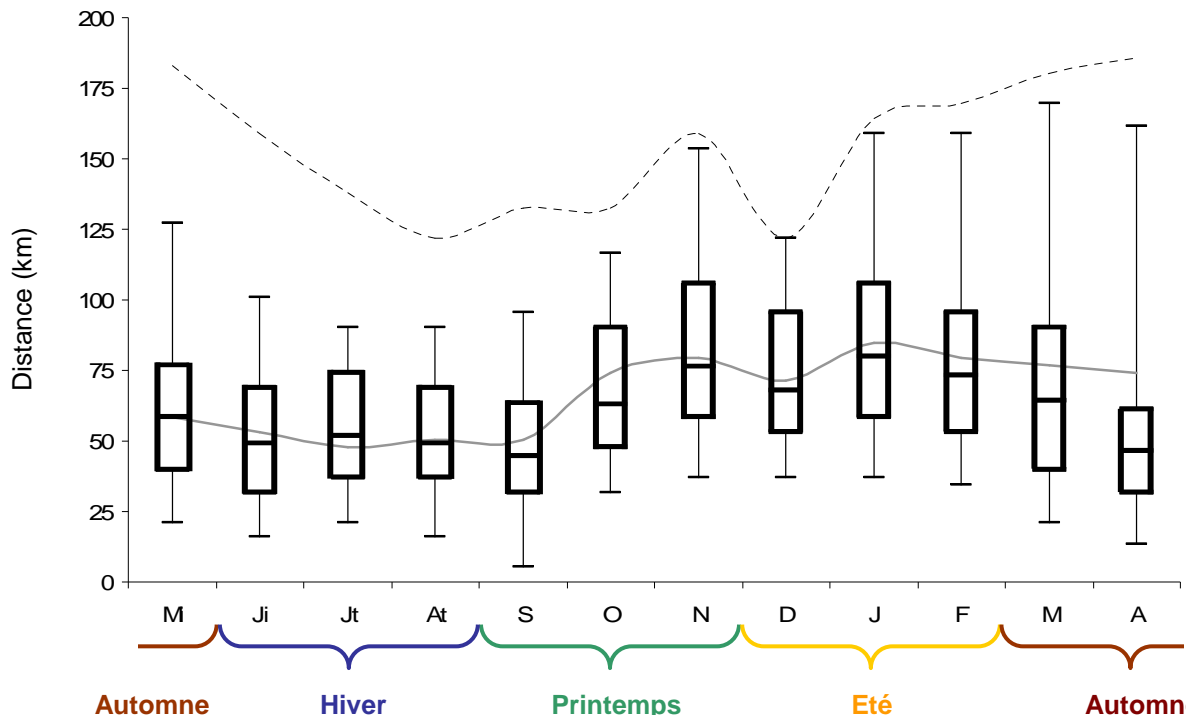


Figure 3.31 : Boîtes à moustaches mensuelles des distances de détections des baleines bleues Antarctique modélisées par RAM d’après leurs signaux acoustiques dans le secteur de détection de 10° au nord de la station HA4 avec une valeur d’intensité à la source de [A] 179 dBre1μPa à 1m et [B] 189 dBre1μPa à 1m. La ligne grise représente la distance estimée pour un signal ayant la valeur mensuelle minimum du bruit ambiant mesurée. La ligne noire en pointillée représente la distance estimée pour un signal ayant une intensité reçue fixe de 70 dB.

De manière relative, on détecte des signaux de baleines bleues Antarctique à proximité du réseau nord de mai à septembre (soit de la fin de l'automne au début du printemps). Ensuite, la majorité des signaux détectés donne des estimations de distances plus éloignées. Certains signaux détectés indiquent même des positions très éloignées par rapport au réseau, en novembre, janvier, février, mars et avril. Les signaux émis les plus proches du réseau sont détectés en avril et en septembre.

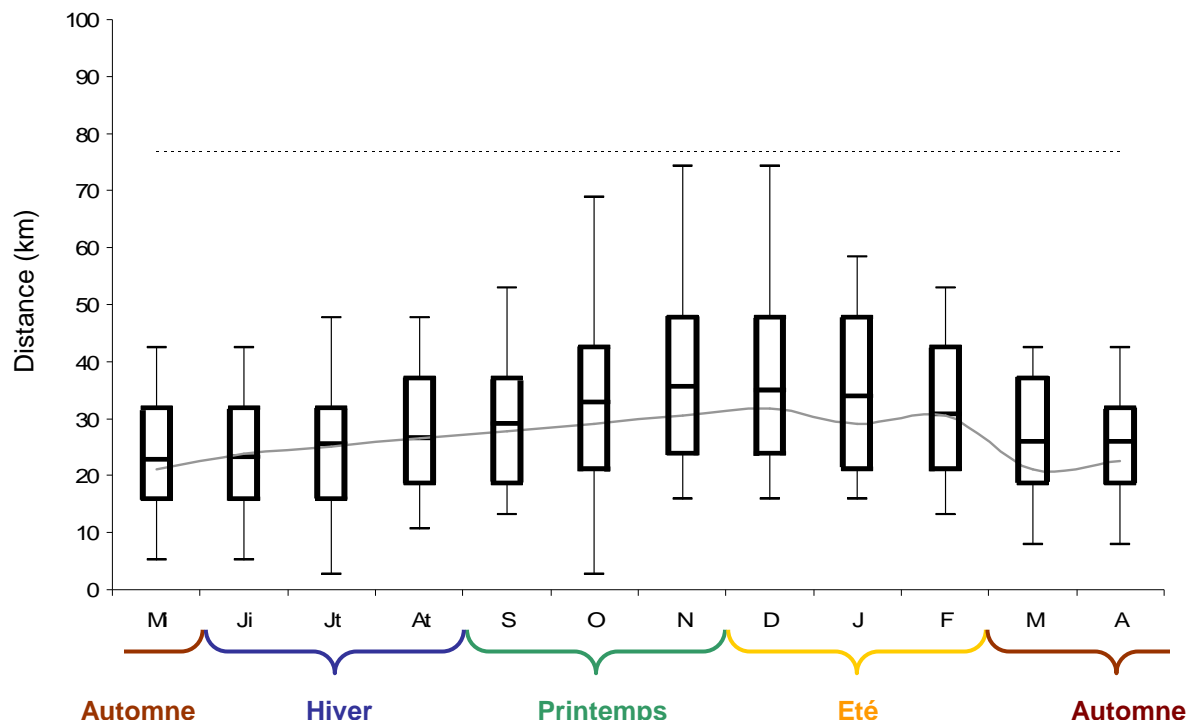
- réseau sud

Les figures 3.32 [A] et [B] mettent en évidence, comme pour le réseau nord, l'effet du niveau sonore à la source choisi qui modifie également les distances de détections d'un facteur de 1,89 (179 dB re 1 μ Pa à 1m vs 189 dB dB re 1 μ Pa à 1m). La variation des distances de détection simulées à partir d'un signal d'une valeur constante à l'année (ligne noire en pointillée) montre qu'aux distances maximales de détection des signaux de baleines, l'effet de la saison sur la propagation du son est faible. Les distances déduites des valeurs minimums du bruit ambiant mesurées (ligne grise) varient d'ailleurs peu avec la saison (légère variation uniquement en mars et avril).

De manière relative, on détecte des signaux de baleines bleues Antarctique à proximité du réseau sud durant l'automne et l'hiver (de mars à août). Ensuite, les signaux détectés donnent des estimations de distances plus largement distribuées et, globalement, plus éloignées du réseau jusqu'à la fin du printemps et le début de l'été (novembre-décembre). En janvier et février les distances diminuent légèrement. En octobre, les signaux détectés indiquent des estimations de distances très largement distribuées, les plus proches mais aussi les plus éloignées du réseau.

Entre les deux réseaux, on constate nettement l'influence du bruit ambiant sur notre capacité à détecter des signaux de baleines bleues. Le réseau sud étant bien plus bruité que le réseau nord, on estime, globalement, les positions des baleines plus proches du réseau lorsqu'on étudie les enregistrements du réseau sud que lorsque l'on étudie ceux du réseau nord.

[A]



[B]

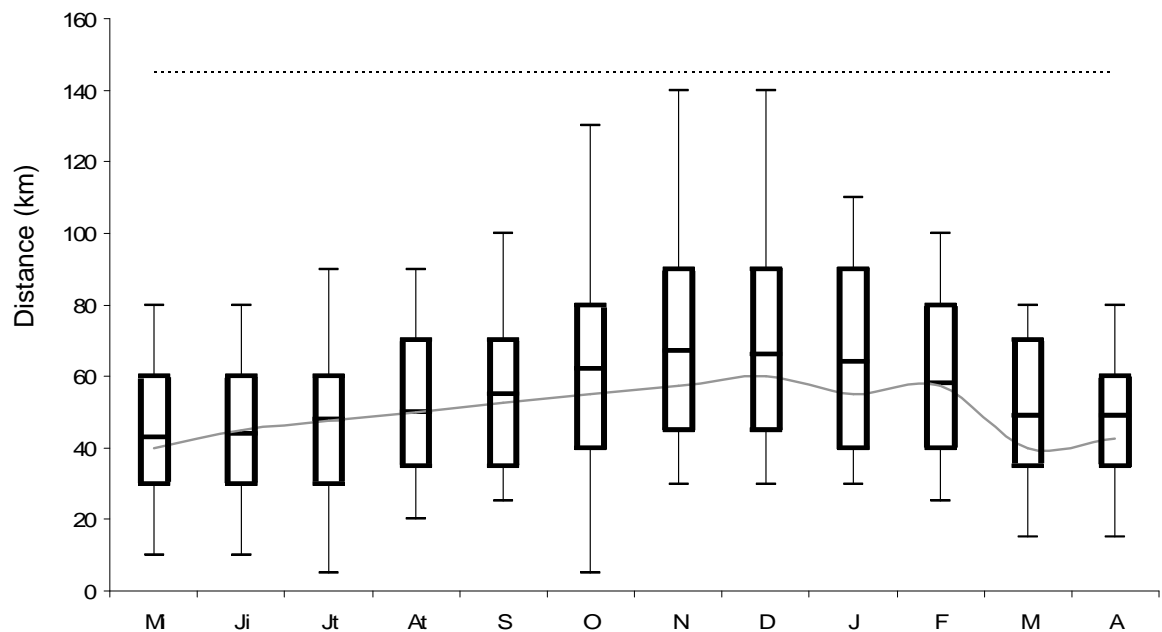


Figure 3.32 : Boîtes à moustaches mensuelles des distances de détections des baleines bleues Antarctique modélisées par RAM d'après leurs signaux acoustiques dans le secteur de détection de 180° au sud de la station HA4 avec une valeur d'intensité à la source de [A] 179 dBre 1μ Pa à 1m et [B] 189 dBre 1μ Pa à 1m. La ligne grise représente la distance estimée pour un signal ayant la valeur mensuelle minimum du bruit ambiant mesurée. La ligne noire en pointillée représente la distance estimée pour un signal ayant une intensité reçue fixe de 70 dB.

B. Baleine bleue pygmée

Pour la baleine bleue pygmée de type Madagascar, les distances ont été simulées avec l'unique valeur d'intensité à la source reportée jusqu'à présent, soit celle estimée dans la présente étude (174 dBre1 μ Pa à 1m). Cette valeur étant plus faible que celles reportées dans la littérature pour la baleine bleue en général (180 dBre1 μ Pa à 1m ; Thode et al 2000) ; nous avons toutefois souhaité simuler les distances en utilisant ce niveau sonore moyen.

- réseau nord

Les figures 3.33 [A] et [B] permettent encore une fois de mettre en évidence l'effet du niveau sonore à la source choisi qui modifiera les distances de détections. Ici, le facteur est variable de 1,7 à 4 selon la distance. On constate par ailleurs que les distances obtenues avec les valeurs minimums du bruit ambiant mesurées (ligne grise) varient du simple au double avec la saison. La distance estimée est à son maximum du milieu du printemps (octobre) jusqu'à la fin de l'été (février).

- réseau sud

Les figures 3.34 [A] et [B] mettent en évidence que l'effet du niveau sonore à la source modifie les distances de détections d'un facteur variable, comme pour le réseau nord. On constate ici, en étudiant les distances obtenues avec un signal d'intensité de valeur équivalant au minimum du bruit ambiant mesuré mensuellement (ligne grise), que pour certains mois, dans le premier cas (i.e. 174 dBre1 μ Pa à 1m, figure 3.33 [A]), on est à moins de 1km du réseau. De façon générale, les mois où l'on détecte des signaux de baleines bleues pygmées, sur le réseau sud, les estimations de distances sont très largement distribuées même si la majorité des signaux détectés indiquent des positions relativement proches du réseau en particulier en mars, avril et mai.

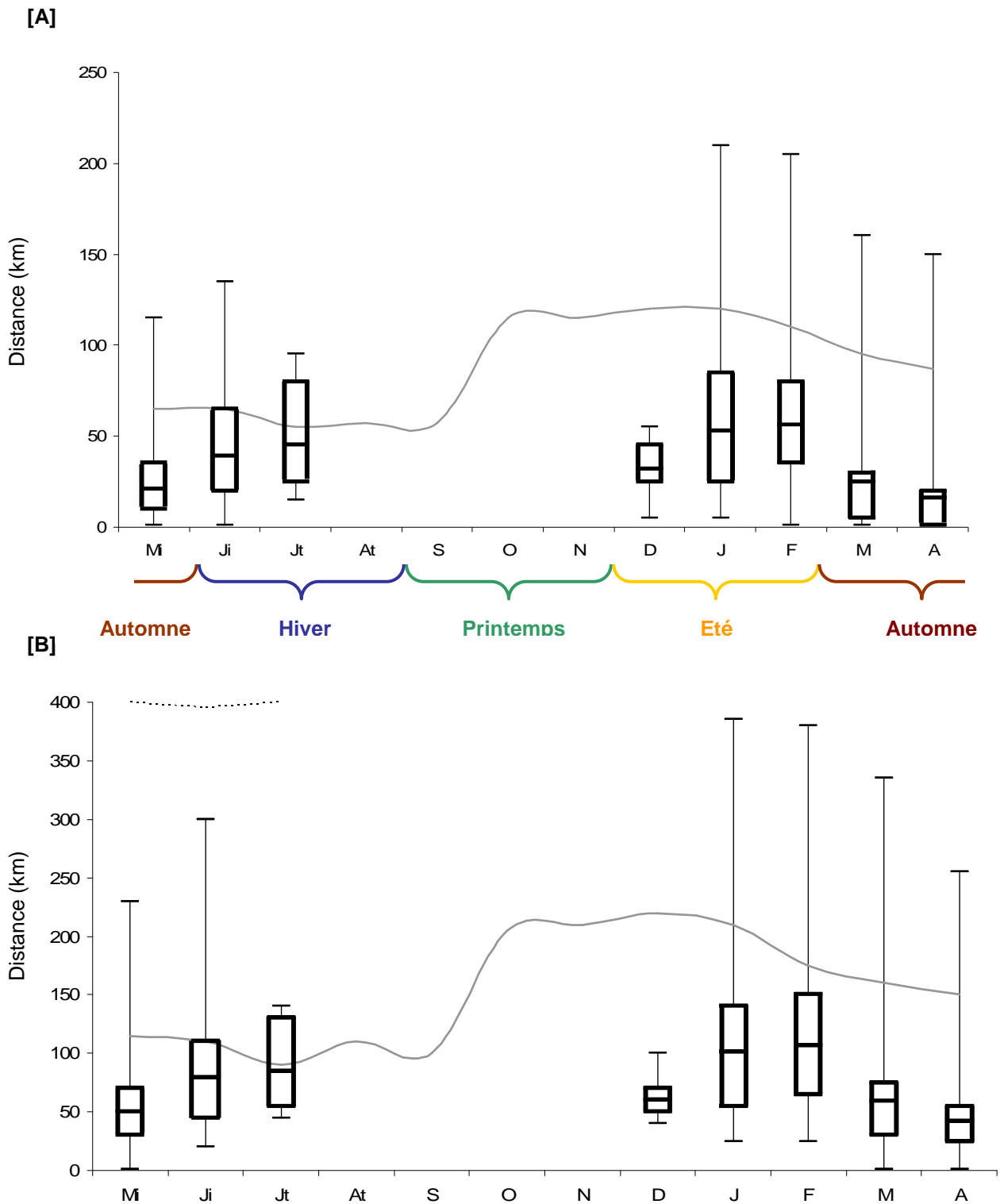


Figure 3.33 : Boîtes à moustaches mensuelles des distances de détections des baleines bleues pygmées modélisées par RAM d'après leurs signaux acoustiques dans le secteur de détection de 10° au nord de la station HA4 avec une valeur d'intensité à la source de [A] 174 dBre $1\mu\text{Pa}$ à 1m et [B] 180 dBre $1\mu\text{Pa}$ à 1m. La ligne grise représente la distance estimée pour un signal ayant la valeur mensuelle minimum du bruit ambiant mesurée. La ligne noire en pointillée représente la distance estimée pour un signal ayant une intensité reçue fixe de 70 dB.

[A]

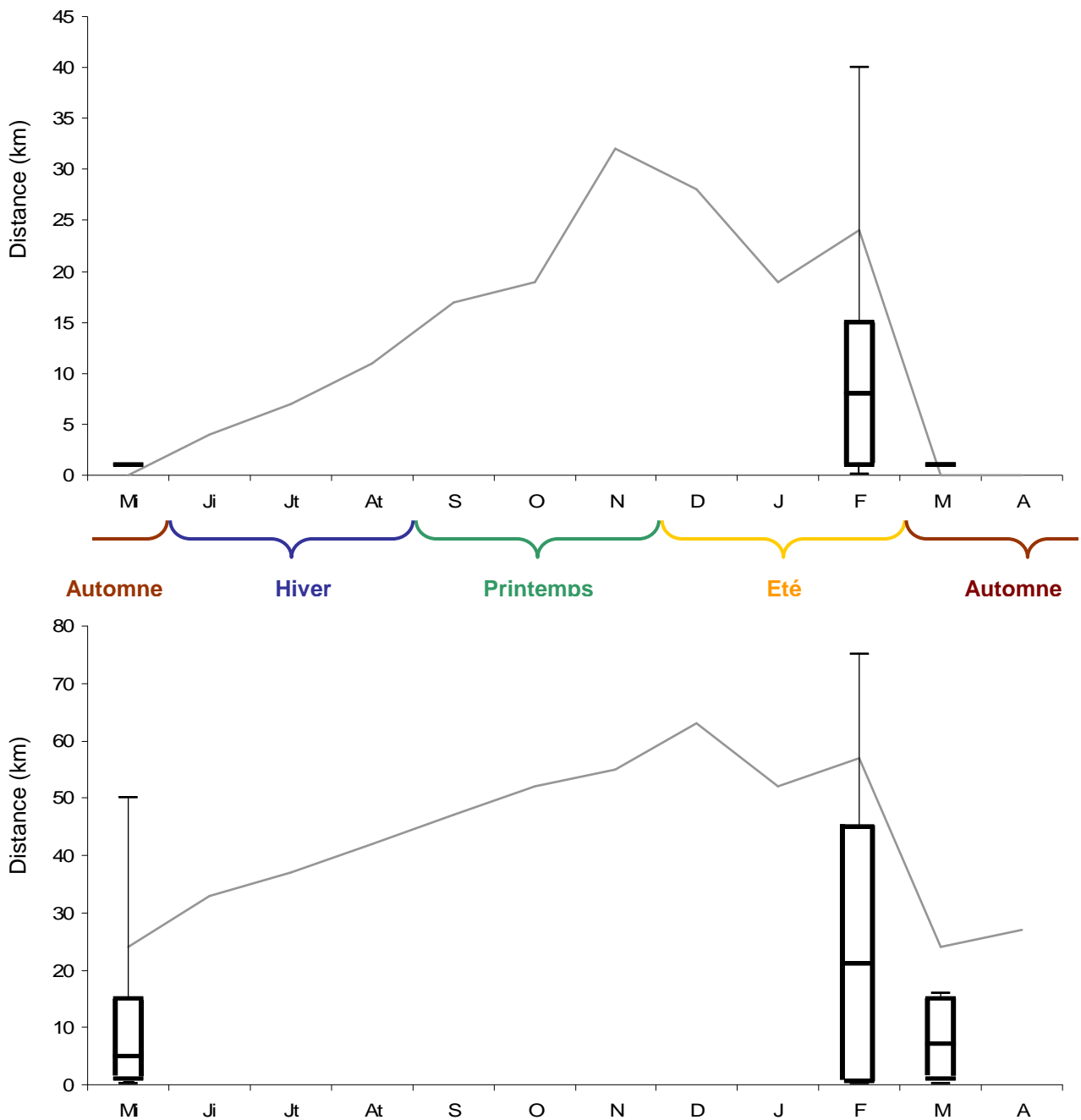


Figure 3.34 : Boîtes à moustaches mensuelles des distances de détections des baleines bleues pygmées modélisées par RAM d’après leurs signaux acoustiques dans le secteur de détection de 180° au sud de la station HA4 avec une valeur d’intensité à la source de [A] 174 dBre1µPa à 1m et [B] 180 dBre1µPa à 1m. La ligne grise représente la distance estimée pour un signal ayant la valeur mensuelle minimum du bruit ambiant mesurée.

3.2. Discussion

Intensité à la source

Tout d'abord, ce travail de localisation a permis d'apporter quelques éléments nouveaux sur les signatures vocales des baleines bleues Antarctique et pygmées notamment sur leur intensité sonore à la source. Dans la littérature, quelques estimations de l'intensité à la source des baleines bleues sont disponibles. Cummings & Thompson (1971) ont reporté une valeur moyenne de $188 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ à 1m; D'spain et al (1995) ont estimé une valeur bien plus faible de $169 \pm 2 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ à 1m ; Thode et al (2000) ont estimé une valeur de $180 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ à 1m du même ordre de grandeur que McCauley et al (2004) pour les baleines bleues pygmées d'Australie ($183 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ à 1m) et légèrement plus faible que McDonald et al (2001) pour les baleines bleues à l'est du Pacifique ($186 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ à 1m). Enfin, Širović et al (2006) ont estimé la valeur la plus forte reportée dans la littérature de $189 \pm 3 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ à 1m pour les baleines bleues Antarctique. Cette rapide comparaison met en évidence que les estimations de l'intensité à la source des baleines bleues sont variables, cependant les méthodes utilisées, les bandes fréquentielles de calcul, les sous-populations ou sous-espèces étudiées sont différentes d'une étude à l'autre. Par exemple, McDonald et al (2001) ont utilisé, à partir de l'intensité reçue sur une large bande de fréquence [10-110 Hz], un modèle de dispersion sphérique pour recalculer le niveau sonore à la source. Širović et al (2006) ont utilisé, à partir de l'intensité reçue sur une petite bande de fréquence [25-29 Hz], un coefficient d'atténuation calculé empiriquement et vérifié théoriquement avec le modèle de propagation BELLHOP pour estimer le niveau sonore à la source des baleines bleues Antarctique. Thode et al (2000) ont utilisé une méthode de déconvolution multicanaux (Migneray & Finette 1992) pour estimer le niveau à la source de la baleine. Dans notre étude, par une méthode combinant les temps d'arrivée des signaux, les intensités reçues et un modèle de dispersion sphérique, nous avons mesuré, pour la baleine bleue Antarctique une valeur d'intensité à la source 10 dB plus faible que l'unique valeur reportée à ce jour pour cette sous-espèce ; et dans le même ordre de grandeur que celles reportées pour les baleines bleues en général. Pour la baleine bleue pygmée, nous avons mesuré une valeur d'intensité à la source légèrement plus faible que pour la baleine bleue Antarctique ($174 \pm 1 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ à 1m) et environ 10 dB plus faible que pour la baleine bleue pygmée d'Australie (McCauley et al 2004). Dans cette étude, les contraintes de la station nous ont autorisés à estimer

ces valeurs pour deux uniques cas, par conséquent il est délicat de généraliser. Par ailleurs, actuellement, nous ignorons toujours si le niveau sonore des signaux émis par les baleines est constant au cours du temps, ou s'il varie d'un cri à l'autre, d'une série à l'autre et surtout d'un individu à l'autre (selon possiblement la taille, le sexe ou le statut reproducteur). Cependant, et de façon générale, l'intensité à la source des signatures acoustiques des baleines bleues est élevée par rapport aux autres espèces de cétacés (Richardson et al 1998) et cette particularité est, très certainement, à mettre en relation avec les capacités qu'ont ces animaux, par l'utilisation de ces signaux de basses fréquences et de fortes intensités, de communiquer sur de grandes distances, bien que l'on ignore toujours les capacités auditives des grandes baleines et le rôle de ces sons.

Le modèle de propagation: importance des paramètres

La modélisation de la distance à laquelle les signatures acoustiques des baleines bleues détectées ont été émises par rapport à la station d'écoute se fait selon des paramètres fixes déduits le plus souvent d'hypothèses fortes. Par exemple, le choix de la fréquence principale du signal modélisé illustre bien l'importance d'un paramètre sur les résultats des distances modélisées. En comparant simplement les distances modélisées par la simulation de deux signaux à 25 Hz et à 28 Hz avec une même intensité reçue (et égale au bruit ambiant), on constate alors que plus la fréquence du signal est basse, plus on est capable de le détecter sur des grandes distances. Dans notre étude, nous avons pris soin de modéliser l'atténuation d'un signal en utilisant la valeur de fréquence la plus représentative des signaux de baleines bleues Antarctique et pygmées en ce basant sur le maximum d'énergie et la durée du signal. Nous avons également accordé une attention particulière à utiliser, pour cette simulation, les valeurs d'intensité des signaux acoustiques mesurées à la réception et la valeur du bruit ambiant mesurée à la station. Dans ce genre d'étude, de nombreux auteurs font le choix d'utiliser une valeur de bruit ambiant théorique extraite de la littérature (Širović et al 2007) ou une valeur globale mesurée dans la zone d'étude (Stafford et al 2007). Cependant dans les deux cas, la bande fréquentielle de la mesure du bruit ambiant correspond rarement à celle des signaux de baleines. Or, nous avons vu dans cette étude que, pour des bandes fréquentielles proches mais néanmoins différentes (la bande courte [17-30 Hz] et la bande large [17-50 Hz]), une différence dans la valeur du bruit ambiant peut être mesurée, la bande large présentant un bruit ambiant plus fort. De plus, la plupart de ces auteurs ne prennent pas en compte la variation saisonnière du bruit ambiant dans leur zone d'étude ; or, dans la zone subantarctique, nous avons vu que ces

variations étaient significatives, quelles dépendaient fortement des variations de la vitesse du son, donc des variations saisonnières de la température dans le milieu et quelles influençaient par conséquent les capacités de détection. Finalement, dans notre cas, c'est le choix de l'intensité à la source qui pose le plus d'interrogations, non pas sur la validité du modèle en terme de distance relative, mais sur la valeur des distances modélisées à partir des cris détectés. Pour les deux types de signaux étudiés, pour deux valeurs d'intensités à la source différentes, nous avons pu constater l'influence de ce facteur sur les distances estimées modélisées. A 28 Hz par exemple, une différence de 10 dB fait varier les distances de détections du simple au double. En choisissant un niveau sonore à la source élevé on détecte plus loin et ceci est accentué pour un cri à 25 Hz. En appliquant la méthode de triangulation avec les 5 hydrophones disponibles, nous avons localisé une baleine bleue Antarctique à environ 150-200 km des deux réseaux. Pour les valeurs d'intensités reçues de ces signaux, une telle distance ferait que, d'après le modèle, la baleine émettrait alors des signaux avec une intensité à la source de 205-210 dB re 1 μ Pa à 1m. Aucune valeur d'intensité à la source aussi forte n'a été mesurée auparavant et on se place alors dans les ordres de grandeurs mesurées par Širović et al (2006) sur la baleine bleue Antarctique. Dans ce cas, et pour la baleine bleue Antarctique, les baleines que nous détectons évolueraient entre 10 et 300 km du réseau nord (en moyenne vers 100km l'hiver et 150km l'été) et entre 5 et 145 km du réseau sud. Ces résultats sont comparables avec les études similaires récentes suivantes : dans la péninsule Antarctique, la distance maximum de détection des baleines bleues a été estimée à environ 200 km (Širović et al 2007) et dans le Golfe d'Alaska de 10 à 190 km selon la valeur du bruit ambiant choisi (Stafford et al 2007). Par contre, ces valeurs sont nettement plus faibles que celles estimées auparavant ; certains auteurs évoquant même des distances maximales de 500 à 1500 km (Stafford et al 1998, Clark 1995). Pour une même série de cris, la différence des distances estimées entre la méthode de localisation par triangulation et le modèle de propagation du son, peut également soulever la question du choix, de la validité et du bon paramétrage du modèle de propagation. Malgré toutes les précautions prises et en adaptant au mieux le modèle de propagation RAM aux données utilisées dans cette étude, nous constatons que, tenter de modéliser, le plus justement possible, les atténuations de signaux sonores biologiques dans un environnement sonore sous-marin variable, est un exercice difficile ; principalement en raison des nombreuses interrogations qui demeurent quant à la production et la fonction des signaux biologiques tout particulièrement chez les grandes baleines. Par exemple, l'interprétation des déplacements des individus acoustiquement actifs (i.e. des groupes ou des populations) en utilisant les variations de l'intensité des signaux acoustiques mesurés aux hydrophones implique que, à la source, cette intensité ne varie pas ou peu durant

l'année, selon les individus ou les activités. Même si de nombreux auteurs suggèrent fortement cela (Cato et al 1998, Širović et al 2004, Stafford et al 2006), cette hypothèse reste difficile à confirmer.

Les capacités de détection : bORie et le bruit ambiant

Finale­ment et de manière relative, c'est-à-dire indépen­damment du niveau sonore à la source de la baleine choisi, la capacité de détection d'une station d'écoute est unique­ment dépendante des paramètres du détec­teur de cris utilisé. Dans cette étude, la modélisation des distances à laquelle les signatures acoustiques des baleines bleues détec­tees ont été émises par rapport à la station d'écoute a été faite pour tous les signaux détec­tes par le détec­teur automatique bORie. Nous avons configu­ré ce détec­teur pour détec­ter, dans les enregistrements, des signaux de baleines bleues pygmée et Antarctique avec une intensité reçue aux hydrophones jusqu'à -15 dB inférieure à celle du bruit ambiant mesuré. Or, nous avons vu, au début de cette étude, que le bruit ambiant mesuré à la station HA4 était différent d'un réseau à l'autre (environ 10 dB de plus sur le réseau sud) et qu'il variait de façon saisonnière. Dans la partie précédente sur l'analyse du nombre de cris détec­tes et de l'intensité des cris reçus aux hydrophones, nous avons également remarqué qu'à l'exception du mois d'avril pour les signaux de baleines bleues Antarctique et des mois de mai, décembre, mars et avril pour les signaux de baleines bleues pygmées sur le réseau nord, l'intensité reçue des signaux détec­tes était, en moyenne, égale ou inférieure au bruit ambiant mesuré dans les bandes de fréquences des signaux de baleines bleues. Pour les signaux enregistrés sur le réseau sud, aucun cri de baleines bleues Antarctique ou pygmées n'a été détec­te avec une intensité supérieure au bruit ambiant. Par consé­quent, il est très important de prendre en compte le bruit ambiant et ces variations dans l'analyse des distances de détec­tes des signaux de baleines enregistrés. Autrement dit, si les signaux détec­tes avaient une intensité reçue moyenne mensuelle largement supérieure au bruit ambiant toute l'année ou si le bruit ambiant ne variait pas et était particulière­ment bas par rapport aux cris de baleines, alors les variations mensuelles du nombre de cris et des valeurs moyennes d'intensités reçues seraient le reflet de la présence/absence des animaux et de leurs distances par rapport à la station d'écoute. Si, au contraire, les valeurs des intensités reçues étaient très largement inférieures au bruit ambiant ou si le bruit ambiant était fort toute l'année à la limite des valeurs de détec­tes autorisées par bORie, alors le nombre de cris détec­tes serait particulière­ment faible toute l'année. On rappellera que, comme nous l'avons précisé dans la discussion de la partie précédente, ce

n'est pas parce que nous ne détectons pas de signaux que les baleines ne sont pas présentes. Les baleines sont peut être présentes mais l'intensité reçue des signaux émis est trop faible par rapport à celle du bruit ambiant pour qu'ils soient détectés par le détecteur automatique dans la configuration choisie.

Variation saisonnière de la localisation des baleines bleues Antarctique

Pour les baleines bleues Antarctique, sur le réseau nord, la variation du nombre de cris détectés au cours de l'année laisse suspecter un déplacement saisonnier des animaux probablement liés aux schémas migratoires des grandes baleines connus actuellement. Or, si les baleines détectées à la station d'écoute ne se déplaçaient pas au cours du temps, les résultats de la modélisation des distances mettraient en évidence une valeur de distance estimée minimale constante et une valeur de distance estimée maximale variable en fonction des variations du bruit ambiant. Ici, nous voyons nettement que les distances minimales estimées à partir des cris détectés ne sont pas constantes au fil des saisons. De la fin de l'automne (mai) au début du printemps (septembre), les baleines bleues détectées sont localisées plus proches du réseau par rapport au reste de l'année. De la même manière, de février à avril, même si les distances déduites des cris détectés sont largement distribuées, la majorité des positions estimées sont proches du réseau. Par conséquent, ces variations de distances semblent être la signature d'un déplacement des populations de baleines bleues Antarctique dans la partie Indienne de l'Océan Austral.

Globalement, du début de l'automne (mars), pendant tout l'hiver et jusqu'au début du printemps (septembre), les baleines se rapprochent de la zone d'écoute, puis s'éloignent dès le mois d'octobre, et pendant tout l'été. Outre l'effet causé par la variation du bruit ambiant et des capacités du détecteur automatique, les baleines semblent plus dispersées en novembre, décembre et janvier. Maintenant, si nous replaçons ces distances estimées avec le nombre de cris détectés, nous pouvons alors constater qu'à la fin de l'automne (mai) et au début de l'hiver (juin), le nombre de cris détectés est important et les baleines détectées sont estimées être plus proches du réseau. Durant l'hiver, le nombre de détections diminue et les baleines sont localisées dans une gamme de distance plus réduite par rapport au début du printemps (septembre). De septembre à octobre, la variation dans les distances de détection est forte. Le nombre de cris

augmente légèrement et la proportion d'heures avec des cris aussi. Ce changement peut alors confirmer le passage des baleines à proximité du réseau, sur de courtes périodes de temps, correspondant au flux migratoire des grandes baleines vers les hautes latitudes et les zones d'alimentations estivales. Durant la fin du printemps et le début de l'été, le nombre de détection diminue fortement alors que le bruit ambiant est faible ; les baleines détectées sont, par conséquent, éloignées du réseau et on se heurte, certainement aux limites de détection imposées par le détecteur automatique. Les faibles valeurs d'intensités reçues durant cette période témoignent de la présence de baleines bleues Antarctique durant l'été, mais dans un secteur éloigné du réseau. A la fin de l'été (février), le nombre de détections augmente mais la localisation reste la même ; ceci témoigne alors d'un retour important des baleines dans notre zone de détection ; cependant il est délicat de confirmer que cette augmentation correspond au flux migratoire des baleines vers les basses latitudes et les zones de reproductions hivernales. En effet, les baleines détectées étaient peut être présentes mais, en dehors de nos capacités de détection. Au début de l'automne, les baleines détectées sont dispersées mais on observe une importante concentration des distances estimées à proximité du réseau. Ceci correspond certainement plus au flux migratoire du sud vers le nord des baleines qui hiverneraient en zone subantarctique et qui passeraient à proximité de la zone de détection à l'automne.

Sur le réseau sud, l'importance du bruit ambiant et la très légère variation saisonnière influencent largement nos distances de détections. Globalement et comme pour le réseau nord, les baleines sont plus proches du réseau en automne et en hiver. A la fin de l'hiver, le nombre de détections diminue fortement, les baleines semblent être à la limite des capacités de détection du détecteur automatique. En octobre, les détections augmentent et les baleines sont bien plus dispersées que les autres mois de l'année. Ce pic de détection a lieu un mois après celui du réseau nord. Ceci est certainement la signature du flux de baleines migrantes vers le sud détectée plus tôt sur le réseau nord et détectée à présent sur le réseau sud. De novembre à janvier, le nombre de détections diminue et les localisations sont globalement les mêmes. Les baleines semblent néanmoins éloignées du réseau c'est-à-dire à la limite des capacités de détection du détecteur automatique. Comme pour le réseau nord, on observe une forte augmentation du nombre d'heures d'enregistrements contenant des cris et une légère augmentation du nombre de cris au même endroit à la fin de l'été (janvier et février) témoignant d'une concentration des baleines vers la zone d'écoute à la fin de l'été. Au début de l'automne, le nombre de cris augmente et on observe une concentration des distances estimées à partir des cris détectés à

proximité du réseau, possiblement causée par le retour des baleines migrantes vers les moyennes latitudes.

D'après la méthode de triangulation, les baleines bleues Antarctique détectées sur le réseau sud sont principalement localisées au sud du réseau au mois de juin et aux mois d'octobre et novembre. Entre ces deux périodes elles semblent plus largement dispersées autour du réseau. Ce résultat est concordant avec le patron de migration de l'espèce que nous venons d'établir ci-dessus. Les baleines bleues Antarctique arriveraient par le sud du réseau en février-mars après s'être alimentées durant l'été en Antarctique. Jusqu'en septembre, elles seraient largement dispersées autour du réseau avant de repartir vers leur zone d'alimentation au sud en octobre-novembre. Malheureusement, l'arrêt d'un des trois hydrophones du sud durant l'été et le printemps ne nous a pas permis de localiser les baleines bleues Antarctique non-migrantes détectées l'été.

En résumé, cette étude sur les baleines bleues Antarctique confirme les mouvements migratoires suspectés par le nombre de cris avec des brusques changements au début du printemps et à l'automne. Cependant, les baleines bleues Antarctique restent détectables donc présentes toute l'année dans cette zone subantarctique.

Variation saisonnière de la localisation des baleines bleues pygmées

La variation du nombre de cris de baleines bleues pygmées détectés à la station HA4 avait déjà clairement mis en évidence l'activité vocale saisonnière de cette sous-espèce reflétant certainement une présence saisonnière dans notre zone d'écoute. D'après les résultats du modèle, la très nette variation du bruit ambiant entre l'automne-hiver et le printemps-été indique que le bruit ambiant influe très certainement sur les capacités de détection des cris de baleines bleues pygmées par le détecteur automatique bOrié à cette fréquence (25 Hz). Par conséquent, la variation saisonnière du nombre de cris n'est peut être pas le reflet d'une cessation de l'activité vocale ou d'un déplacement de la sous-espèce mais tout simplement une variation des capacités de détection du système utilisé. En effet, peu de cris ont été détectés les mois où le bruit ambiant est fort (de mai à septembre). Cependant, les mois où le bruit ambiant est au plus faible (octobre, novembre) aucun cri n'a été détecté à la station. A cela s'ajoute que, comme pour la baleine

bleue Antarctique, en fonction du bruit ambiant présent dans la zone, si cette sous-espèce était au même endroit toute l'année, les distances estimées à partir des cris possédant une intensité reçue élevée ne varieraient pas au cours de l'année. Or, ici, outre le fait que ces signaux ne sont pas détectés toute l'année, les distances minimales et surtout la majorité des distances estimées varient beaucoup au cours de l'année. Plus particulièrement en février et en mars. Par conséquent, les résultats de la modélisation des distances estimées à partir des cris confirment, le déplacement de cette sous-espèce dans la zone d'écoute et l'absence de cri à la fin de l'hiver et durant tout le printemps, ne peut pas être expliqué par une limite des capacités de détection du détecteur utilisé.

Au début de l'été (décembre), lorsque l'on commence à détecter des signaux de baleines bleues pygmées, les animaux sont déjà proches du réseau nord d'après les distances estimées à partir des cris détectés. L'absence de cris avant cette période, alors que le bruit ambiant est favorable pour les détecter sur des distances relativement éloignés du réseau avec le détecteur automatique, laisse supposer que les baleines bleues pygmées sont déjà présentes dans la zone mais qu'elles n'exerceraient pas une activité vocale. Les mois suivant (janvier et février), le nombre de cris détectés augmente et l'estimation de la distance des animaux vocalisant indique qu'ils sont présents sur une large zone de détection possible. Les baleines semblent venir de relativement loin et se concentrer à proximité du réseau. En mars, le nombre de cris reste le même et la distance de détection estimée maximale diminue légèrement, possiblement en raison de l'augmentation du bruit ambiant. En revanche, on observe une nette concentration de la majorité des distances estimées sur une étroite zone très proche du réseau. En avril, le nombre de cri est maximal et la grande majorité des distances estimées est concentrée sur quelques dizaines de kilomètres d'après le modèle. De mai à juillet la situation semble changer. Le nombre de cri diminue, les distances maximales également, mais le bruit ambiant augmente ; par conséquent notre capacité à détecter des cris diminue. En revanche, la majorité des cris n'est plus concentrée dans une petite zone comme les mois précédents mais est beaucoup plus dispersée. Ceci laisse alors supposer que les animaux acoustiquement actifs s'éloignent rapidement de la zone de détection au cours de l'hiver.

Sur le réseau sud, très peu de cris de baleines bleues pygmées ont été détectés. Le bruit ambiant sur ce réseau est important et l'influence qu'il présente à cette fréquence (25 Hz) semble réduire, d'après le modèle, la capacité de détection des cris avec bOrie, comme nous venons de le voir sur le réseau nord. Par conséquent, ceci laisse supposer que les distances estimées à partir

des cris de baleines bleues pygmées sur le réseau sud seront relativement faibles et que, à proximité du réseau, les distances limites sont très rapidement atteintes. Par conséquent le peu de cris détectés serait uniquement causé par les capacités du détecteur automatique. En diminuant le seuil de détection, il serait alors possible de détecter plus de cris. Cependant, quand nous regardons l'évolution du bruit ambiant et son influence sur les distances de détections, nous voyons que, les mois où les distances sont maximales (octobre, novembre et décembre), aucun cri n'est détecté. Comme pour le réseau nord, les baleines bleues pygmées ne semblent pas évoluer à proximité du réseau sud en hiver et au printemps. En revanche, nous détectons des cris durant de courtes périodes dans les mois où des cris sont détectés au nord. Ainsi, de façon générale, les baleines bleues pygmées sont possiblement présentes au sud en même temps que nous les détectons au nord mais les capacités du détecteur et le bruit ambiant font qu'il n'est possible de les détecter uniquement lorsqu'elles sont proches du réseau sud ; or, contrairement au réseau nord, elles le sont rarement.

Conclusion

Comme nous avons pu le remarquer tout au long du développement des méthodes de localisation adaptées à la station d'écoute et aux signaux acoustiques étudiés, la station du SSI à Crozet n'est pas conçue de façon optimale pour localiser les baleines avec une très grande précision. Les hydrophones, au sein d'un même réseau, ne sont pas suffisamment nombreux et sont trop proches les uns des autres pour permettre une localisation par triangulation et un suivi précis des animaux sur une distance supérieure à quelques kilomètres autour du réseau. La configuration des deux réseaux nord et sud ne permet généralement pas de profiter des 5 hydrophones en même temps, sauf lorsque la baleine est présente dans une zone précise particulièrement étroite. De même que la proximité des plateaux insulaires autour de la zone d'écoute masque significativement la détection des signaux dans le secteur ouest nord-ouest. Enfin le bruit ambiant, en particulier sur le réseau sud, ne permet pas d'avoir des signaux de suffisamment bonne qualité pour être exploitables dans une étude sur la localisation des baleines par estimation des délais d'arrivée des signaux sur plusieurs instruments. Par conséquent, dans cette étude, de nombreuses contraintes jouent sur la capacité à localiser les baleines avec la méthode de triangulation.

Néanmoins, les différentes méthodes de localisation utilisées dans ce travail et en particulier la modélisation de la propagation du son pour le calcul des distances de détection apportent des éléments de réponse à la troisième question de ce travail de thèse « **OU LES DEUX SOUS-ESPECES DE BALEINES BLEUES ANTARCTIQUE ET PYGMEES SONT-ELLES LOCALISEES DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL ?** ».

Les baleines bleues Antarctique sont présentes toute l'année dans la partie Indienne de l'Océan Austral, cependant elles évoluent dans un secteur plus proche de Crozet (nord et sud) de la fin de l'été et jusqu'à la fin de l'hiver. Les mois de septembre et octobre semblent être la période où elles effectuent leurs migrations estivales du nord vers le sud. Les baleines bleues pygmées sont détectées durant une partie de l'année (de la fin du printemps au début de l'hiver) et à proximité du réseau nord. L'absence de cri en hiver et au printemps peut être attribuée soit à un déplacement des baleines au-delà de notre zone de détection soit à une cessation de leur activité vocale.

Antiques Françaises
1877

CHAPITRE IV

DISCUSSION GENERALE

POSTE AERIENNE 1900

DISCUSSION GENERALE

La chasse baleinière menée au cours du XX^{ème} siècle a décimé la quasi-totalité des populations de grandes baleines dans l'hémisphère sud. Près de 99,95% de la population de l'emblématique baleine bleue a été chassée durant cette période (Branch et al 2004) et ce jusqu'à sa protection totale au début des années 70 avec la création, par la Commission Baleinière Internationale, de sanctuaires pour les cétacés dans les Océans Indien et Austral. Trois décennies après l'arrêt de la chasse à la baleine, la présence et la répartition des grandes baleines dans le secteur Indien de l'Océan Austral restent méconnues et les rares observations visuelles de grandes baleines n'apportent que trop peu d'informations et soulignent les difficultés de cette approche classique pour l'étude de ces animaux. Il est actuellement extrêmement difficile de connaître l'état des stocks, la distribution et l'abondance des espèces en vue d'évaluer le rétablissement des populations. Dans ce travail de thèse, l'utilisation d'une approche innovante et puissante, la bioacoustique, a permis d'apporter des éléments nouveaux sur la présence et la répartition de certaines espèces de grandes baleines dans le sud-ouest de l'Océan Indien.

Dans le secteur Indien de l'Océan Austral, la présence de quatre espèces ou sous-espèces de grandes baleines (le rorqual commun, la sous-espèce de baleine bleue Antarctique et la sous-espèce de baleine bleue pygmée de Madagascar et d'Australie) a été confirmée via la détection de leurs signatures acoustiques caractéristiques. On suppose que le rorqual boréal est également présent, mais la grande similarité de sa signature acoustique avec les signaux hautes fréquences de baleines bleues n'a pas encore permis de confirmer cette hypothèse. L'analyse d'une année d'enregistrements a permis de mettre en évidence les variations saisonnières de présence de ces différentes espèces. Ces variations acoustiques sont probablement reliées à l'écologie des animaux, en particulier leur cycle de vie (période d'alimentation et de reproduction) et leurs mouvements migratoires saisonniers associés.

D'après les enregistrements occasionnels de sa signature acoustique typique, le rorqual commun est présent au sud-ouest de l'Océan Indien au début de l'automne, durant l'hiver et le début du printemps. En péninsule Antarctique, les signatures acoustiques de rorquals communs ne sont plus détectées dès le mois de juin et jusqu'au début du mois de mars suggérant que, durant l'automne, ces grandes baleines quittent cette zone d'alimentation privilégiée pour migrer et passer l'hiver vers des eaux plus tempérées (Širović et al 2004).

IV. DISCUSSION GENERALE

Dans notre étude, la détection de ces signaux acoustiques, au début de l'automne, suggère que cette espèce est présente dans les moyennes latitudes c'est-à-dire des eaux subantarctiques, et peut-être même au-delà, durant l'hiver, après avoir probablement quitté les aires d'alimentation des hautes latitudes. La limite de détection maximum des rorquals communs a été estimée à 56km en péninsule Antarctique (Širović et al 2007) et 100km dans le Golfe de l'Alaska (Stafford et al 2007), selon le système de détection utilisé et le bruit ambiant présent dans ces différentes régions. Si ces distances de détections sont les mêmes pour notre système d'écoute, la présence occasionnelle de signatures acoustiques typiques des rorquals communs dans nos enregistrements suggère alors que très peu de ces grandes baleines privilégient la zone proche de Crozet durant la saison hivernale de reproduction.

Contrairement au rorqual commun, la présence quasi continue de signatures acoustiques typiques des baleines bleues Antarctique dans nos enregistrements suggère que cette espèce est régulièrement présente, et durant toute l'année, dans le secteur Indien de l'Océan Austral. Les variations saisonnières dans le nombre de cris et dans l'intensité reçue permettent d'établir alors plusieurs hypothèses sur la distribution de cette sous-espèce au cours d'une année.

Premièrement, la variation saisonnière du nombre de cris détectés et de l'intensité reçue met en évidence le déplacement des populations de baleine bleue Antarctique suivant le schéma classique de migration des grandes baleines (Mackintosh 1965). En effet, cette espèce est connue pour effectuer de grandes migrations entre les eaux froides et productives des hautes latitudes pendant l'été et les eaux plus tempérées chaudes des moyennes latitudes pendant l'hiver (Mackintosh 1966). Dans notre étude, globalement, la diminution du nombre de cris à la fin de l'hiver et la diminution de l'intensité reçue au mois de septembre (début du printemps) suggèrent qu'une partie de la population quitterait le secteur Indien de l'Océan Austral pour s'alimenter durant tout l'été au-delà de notre zone d'écoute, soit possiblement dans les hautes latitudes autour du continent Antarctique. En effet, les distances des baleines déduites des cris détectés suggèrent que, durant cette période, les baleines bleues Antarctique sont éloignées de notre station d'écoute et que, par conséquent, la diminution du nombre de cris est le reflet d'un déplacement des baleines au-delà de notre zone de détection. L'augmentation progressive du nombre de cris et de l'intensité reçue durant l'automne (en particulier en avril-mai) suggère un retour d'une partie de la population vers les moyennes latitudes pour passer l'hiver dans les eaux subantarctiques.

IV. DISCUSSION GENERALE

Cependant, dans notre étude, nous avons également détecté des signatures acoustiques de baleines bleues Antarctique durant tout l'été, en particulier au mois de février. Il est alors possible qu'une partie de la population de baleines bleues Antarctique n'effectue pas de migration estivale vers l'Antarctique mais qu'elle resterait, à l'année, dans les eaux subantarctiques à proximité de Crozet. Or, durant la période estivale, une autre espèce de grandes baleines est largement détectée à proximité de la zone d'écoute, la baleine bleue pygmée de type Madagascar. La saisonnalité de la détection des cris de cette sous-espèce, exclusivement durant l'été et l'automne, suggère fortement que la baleine bleue pygmée de type Madagascar est présente dans les eaux subantarctiques pour s'alimenter. Durant l'été, les enregistrements simultanés de signaux acoustiques hautes fréquences, associés à un comportement d'alimentation, avec des signaux acoustiques des deux sous-espèces de baleine bleue, confirment l'activité d'alimentation de ces grandes baleines. Par conséquent, cette zone constituerait une aire d'alimentation estivale dans laquelle une importante biomasse zooplanctonique doit alors être disponible durant l'été austral.

Le secteur Indien de l'Océan Austral présente une forte production primaire estivale (Moore et al 2000, Figure 4.1) à laquelle est associée de forte biomasse zooplanctonique et de petits poissons pélagiques (les myctophydés) (Pakhomov et al 1994).

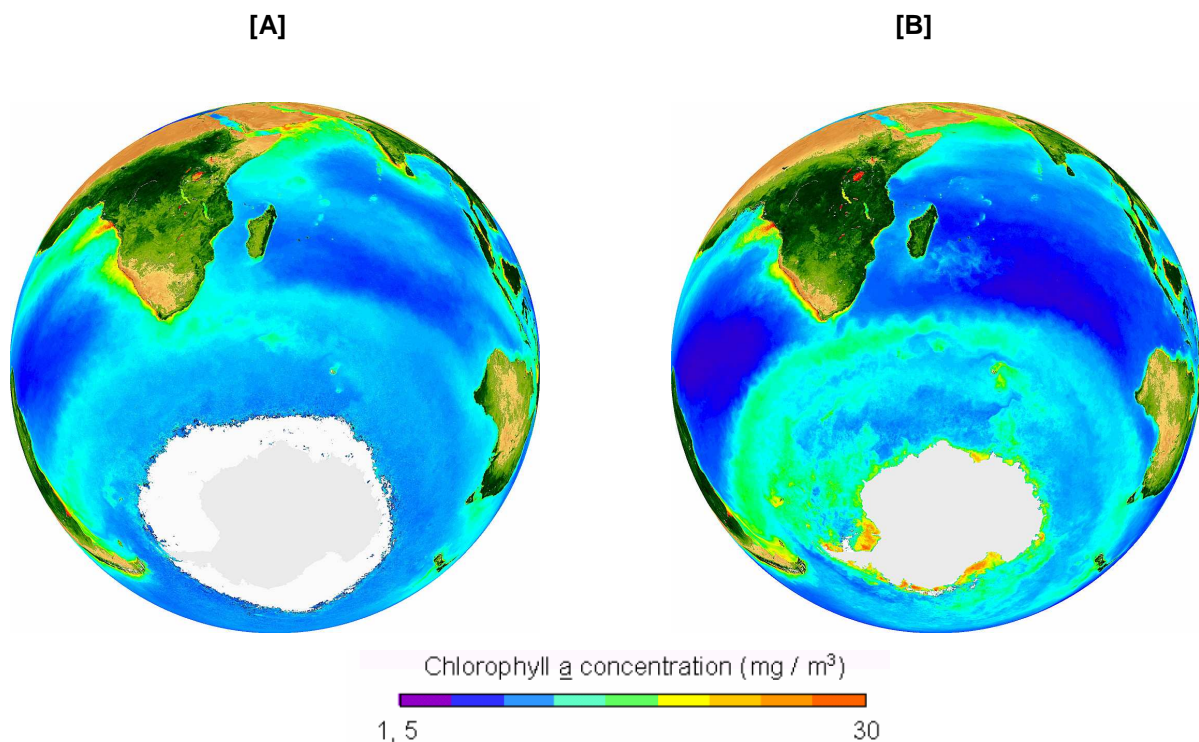


Figure 4.1 : Productivité de surface durant l'hiver [A] et l'été [B] austral (concentration en chlorophylle *a* ; source : SEAWIFS).

Les régions les plus productives se trouvent sur une large bande s'étendant de la Convergence Subtropicale au sud du Front Subantarctique (Stahl et al 1996). Des niveaux localement élevés de production biologique sont observés à proximité des îles subantarctiques bénéficiant d'un plateau péri-insulaire notable (e.g. Crozet et Kerguelen). La dynamique de circulation du plateau de Crozet et les interactions physiques et biologiques contrôlent d'ailleurs le bloom phytoplanctonique annuelle dans le bassin de Crozet (Pollard et al 2007). Dans ce secteur, les instabilités de la circulation et des zones frontales favorisent également la formation de tourbillons qui vont structurer la production marine (Read et al 2007) et influencer les stratégies des prédateurs (Cotté et al 2007).

D'après les données de captures estivales faites dans ce secteur, les baleines bleues (Figure 4.2 [A]) étaient distribuées à l'ouest de Crozet et jusqu'à l'île Marion. Dépendamment de l'effort de chasse, ces captures ont surtout eu lieu de février à avril. Or, durant cette période, dans notre étude, on observe une augmentation brutale des détections de cris de baleines bleues Antarctique (février) et pygmées (avril) sur le réseau nord de la station d'écoute de Crozet. Cette comparaison met alors en évidence une coïncidence dans les périodes de présences passées et actuelles des baleines bleues, en zone subantarctique, à la fin de l'été et au début de l'automne. Cependant, aucune distinction dans les captures des deux sous-espèces de baleines bleues présentes n'a été faite ; nous ne sommes donc pas en mesure de confirmer de quelles sous-espèces il s'agit. De plus, ces données de distribution passées des baleines bleues sont très certainement sous-estimées ; la majorité des captures de baleines bleues en zone subantarctique ayant eut lieu durant les périodes de chasses illégales entre 1950 et 1970 (Zemsky et al 1995, Yablokov et al 1998, Branch et al 2008). Ces données de chasses illégales ne sont pas reportées dans la figure 4.2 ; par conséquent, la distribution des données de captures présentées ici ne correspond pas entièrement à la distribution passée des baleines bleues.

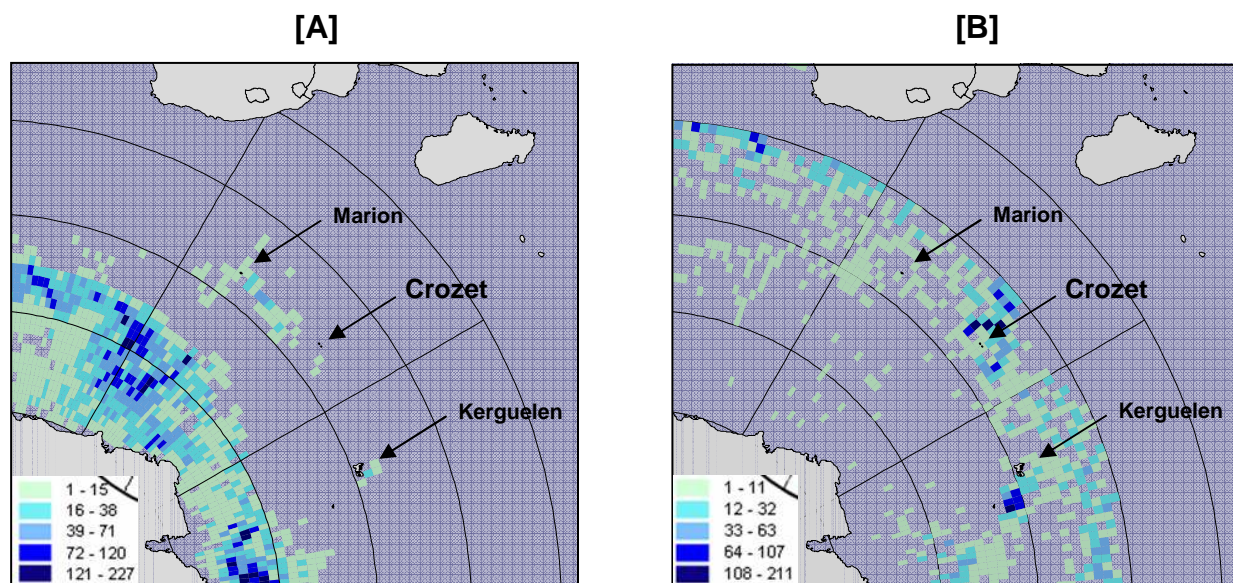


Figure 4.2 : Distributions des captures de baleines bleues [A] de rorquals boréals [B] dans le secteur ouest-Indien de l’Océan Austral regroupées par surface de 1° x 1° (sans les corrections des déclarations erronées des Russes ; donnée CBI).

Les données de captures indiquent néanmoins que cette zone semble être également une aire favorable à la présence de rorquals boréals durant l’été. Cette zone a d’ailleurs été référencée comme une aire d’alimentation des rorquals boréals (Kawamura 1978, Budylenko 1994). Les nombreux contenus stomacaux issus des captures disponibles sur cette espèce renseignent alors sur les proies ciblées dans ces eaux par ces grandes baleines (Figure 4.3). Le rorqual boréal ne semble pas effectuer de migrations jusque dans les hautes latitudes car peu d’*Euphausia superba* a été reporté. En revanche, et pour des captures proches de Crozet, ces grandes baleines se nourriraient d’avantage de copépodes, d’amphipodes et d’euphausiacés en particulier *Euphausia Vallentini*. Cette espèce avait déjà été reportée comme une proie principale de la baleine bleue pygmée (Kawamura 1978).

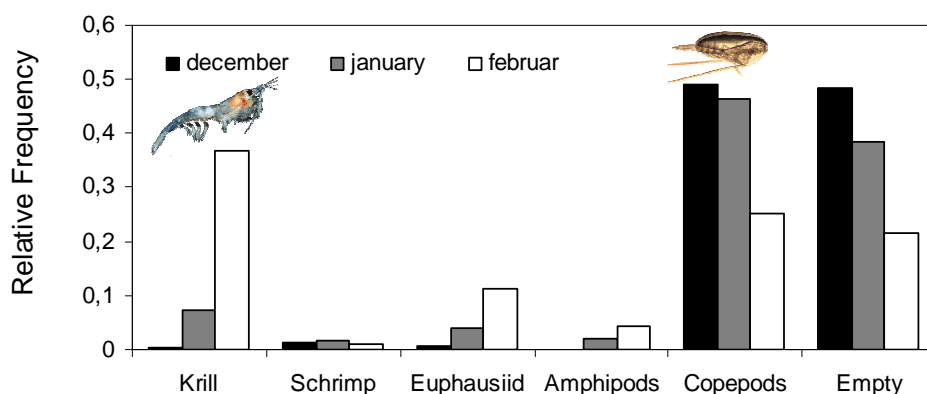


Figure 4.3 : Composition des contenus stomacaux de rorquals boréals capturés dans le secteur ouest-Indien de l’Océan Austral (donnée CBI ; C. Cotté).

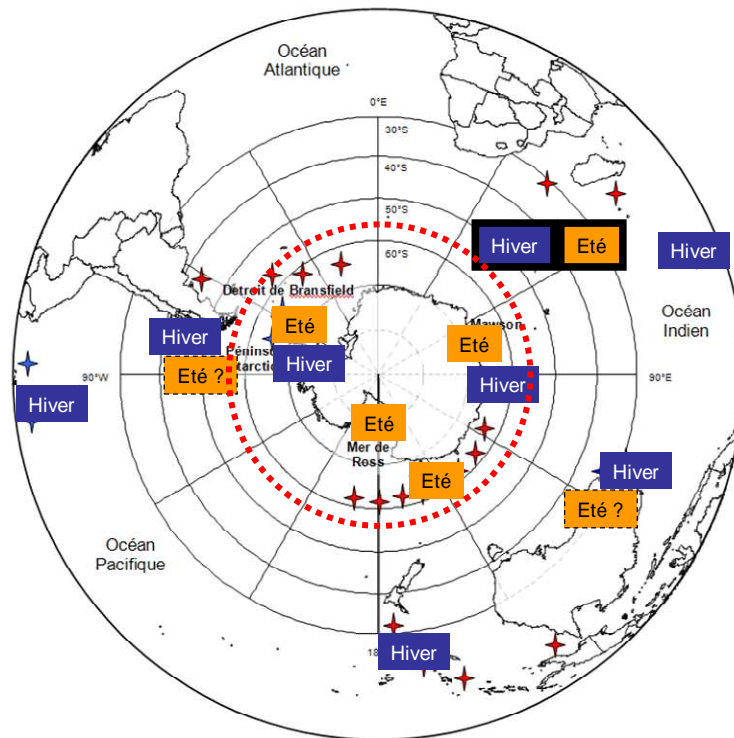
Par conséquent, nous pouvons en déduire que, d'après les résultats de ce travail de thèse et les données historiques issues des captures, le secteur Indien de l'Océan Austral, à proximité des îles subantarctiques est une aire d'alimentation privilégiée des baleines bleues Antarctique et pygmées de type Madagascar durant l'été et l'automne. Dans ce secteur très productif, les quantités de zooplancton sont possiblement suffisantes pour que ces deux sous-espèces se partagent la même aire d'alimentation. Le caractère prévisible des grandes zones frontales associées à cette ressource alimentaire a très certainement conduit une partie des populations de baleine bleue Antarctique à adopter un cycle de vie différent en n'effectuant pas de migration vers les hautes latitudes. L'âge, le sexe, le statut reproducteur ou la condition individuelle pourraient alors expliquer pourquoi certains individus ne migrent pas vers les eaux antarctiques.

De récentes études acoustiques avaient auparavant démontré que le schéma classique de migration des grandes baleines n'était pas systématique chez la baleine bleue Antarctique. En effet, des détections acoustiques annuelles ont montré qu'une partie de la population n'effectuerait pas de migration et resterait à l'année dans les hautes latitudes (Širović et al 2004, McKay et al 2005, Mellinger et al 2007). La présente étude démontre, à l'inverse, qu'une partie de la population resterait à l'année dans les moyennes latitudes et n'effectuerait pas de migration pour se nourrir l'été dans les hautes latitudes. La présence de baleine bleue aux basses et moyennes latitudes durant l'été a déjà été observée auparavant dans l'hémisphère sud. En effet, la forte productivité des eaux au large du sud du Chili et du sud de l'Australie, font de ces zones sont des aires d'alimentation privilégiées des baleines bleues durant l'été (Gill 2002, Hucke-Gaete et al 2004). Cela suggère que, pour se nourrir, certaines populations de baleines bleues n'effectuent pas de migrations classiques vers les hautes latitudes l'été mais sélectionnent et exploitent des zones de productivités globales fortes avec des densités de proies prévisibles situées dans les basses et moyennes latitudes. Dans les autres secteurs de l'Océan Indien (nord et sud-est), l'absence de détections annuelles de signatures acoustiques de baleines bleues Antarctique (McCauley 2004, Stafford et al 2004) met en évidence que cette espèce privilégie nettement les zones très productives du sud-ouest de l'Océan Indien, en particulier l'été. Dans nos enregistrements, quelques signaux acoustiques d'une autre sous-population de baleines bleues pygmées présente dans l'Océan Indien (le type Australie) ont été détectés l'été. Cette sous-population est connue pour s'alimenter, pendant la période estivale, principalement à l'ouest de l'Australie. Nos résultats suggèrent alors quelques migrations longitudinales de ces animaux de l'Australie vers le sud-ouest de l'Océan Indien et témoignent, par conséquent, que

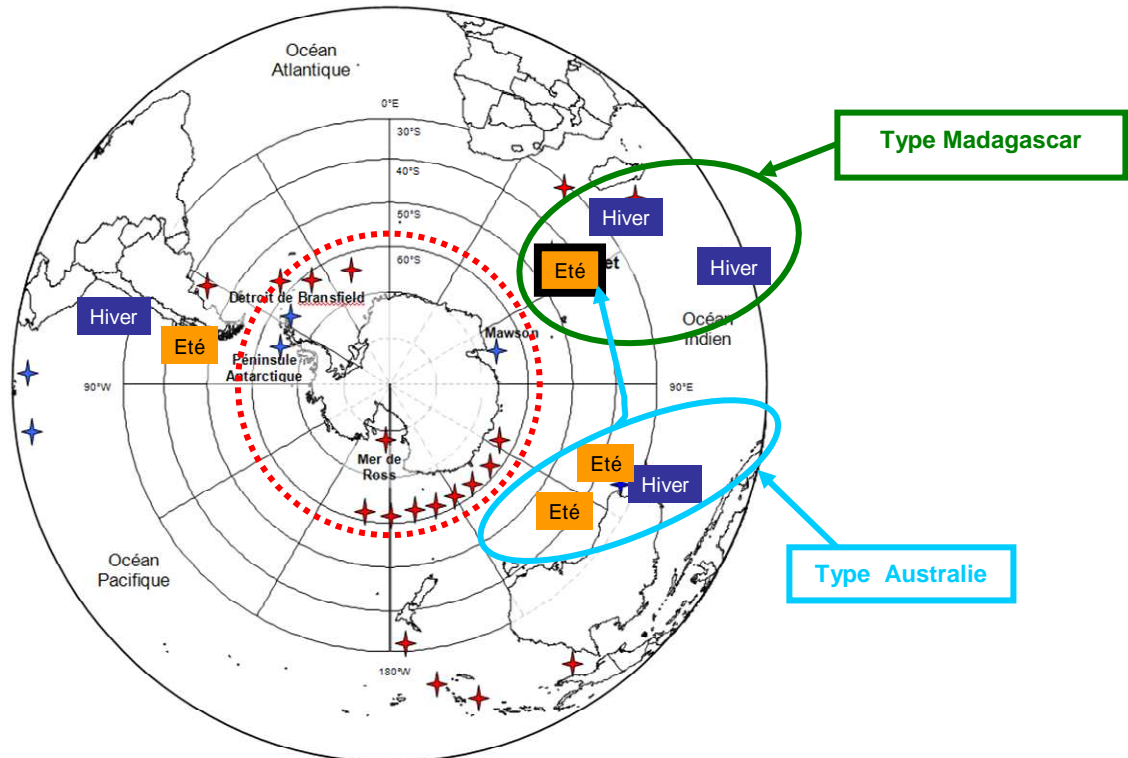
IV. DISCUSSION GENERALE

l'aire d'alimentation reportée actuellement est possiblement plus large que celle établie jusqu'à présent.

[A]



[B]



.....
« Frontière » entre les deux sous-
espèces de baleines bleues
Antarctique et pygmées

Figure 4.4 : Saisonnalité des détections des signatures vocales de baleines bleues Antarctique [A] et pygmées [B] par les stations d'écoute de l'hémisphère sud (les symboles bleus représentent les stations fixes longues durées, et les symboles rouges les stations mobiles courte durée).

Cette sympatrie entre les sous-espèces ou sous-populations de baleines bleues a rarement été rapportée. L'étude des données de captures avait déterminé la zone latitudinale entre 52-56°S comme la frontière de répartition des deux sous-espèces de baleines bleues : la baleine bleue Antarctique au sud et la baleine bleue pygmée au nord. Par conséquent et du fait que ces deux sous-espèces soient très difficiles à distinguer sur le terrain ; les aires d'alimentations des moyennes latitudes du sud du Chili et de l'Australie décrites précédemment et définies par des observations visuelles uniquement (Gill 2002, Huccke-Gaete et al 2004) ont été attribuées à la baleine bleue pygmée. L'approche acoustique utilisée dans la présente étude a permis de différencier les deux sous-espèces de baleines bleues et démontre que les frontières latitudinales entre les espèces ne sont pas encore parfaitement connues et qu'il est fort possible que les aires d'alimentation estivales des moyennes latitudes soient exploitées aussi bien par les baleines bleues pygmées que par les baleines bleues Antarctique. La figure 4.4 résume alors ce que cette étude acoustique a révélé sur la répartition estivale et hivernale des deux sous-espèces et complète les différentes études acoustiques conduites dans l'hémisphère sud.

CHAPITRE V

CONCLUSION & PERSPECTIVES

CONCLUSION & PERSPECTIVES

L'utilisation d'une technologie récente et efficace (i.e. l'approche acoustique) couplée au développement de méthodes adaptées en traitement du signal a contribué à une meilleure compréhension de la présence, la saisonnalité et la répartition de plusieurs espèces de grandes baleines dans le secteur Indien de l'Océan Austral. Trois espèces ou sous-espèces de grandes baleines sont régulièrement présentes dans le secteur Indien de l'Océan Austral à différentes périodes de l'année et selon leur cycle de vie. La baleine bleue Antarctique est présente à l'année alors que la baleine bleue pygmée de Madagascar et d'Australie ainsi que le rorqual commun sont présents à certaines périodes de l'année (respectivement l'été-automne et l'hiver). La présence estivale, en sympatrie, de deux sous-espèces de baleines bleues, témoigne de l'importance de cette zone pour l'activité alimentaire des baleines. Dans un but de conservation des espèces, il apparaît alors très important de continuer à maintenir et à protéger ces zones géographiques pour le rétablissement des populations de grandes baleines.

L'exploitation de la plus grande base de données acoustique disponible en zone subantarctique et les résultats obtenus témoignent de l'efficacité de l'approche acoustique pour ce genre de problématique. Les stations hydroacoustiques du Système de Surveillance Internationale sont très utiles pour effectuer un inventaire et établir la saisonnalité des espèces présentes, mais elles ne sont pas tout à fait adaptées à la localisation et aux suivis des animaux. Cependant, il serait extrêmement intéressant d'exploiter, de la même manière, les deux autres stations au nord et à l'ouest de l'Océan Indien pour confirmer les mouvements longitudinales et latitudinales observés dans cette étude.

Actuellement, nous ne sommes pas en mesure de pouvoir déterminer si les résultats obtenus dans ce travail sont observés tous les ans et quelle est la tendance, à long terme, dans la présence et la répartition des grandes baleines dans le sud-ouest de l'Océan Indien. Pour confirmer, sur le long terme, les nombreuses hypothèses émises dans ce travail de thèse, nous avons établi un projet de collaboration avec le Laboratoire Domaines Océaniques de l'Université de Bretagne Occidentale pour la création d'un Observatoire HydroAcoustique de la SISmicité et de la BIODiversité (OHA-SIS-BIO) dans le secteur des Terres Australes et Antarctiques Françaises.

V. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Une année d'enregistrements issus de 3 hydrophones autonomes localisés sur un large réseau dans le secteur Indien de l'Océan Austral (Figure 5.1) est déjà disponible et nous prévoyons, fin 2009, d'installer un nouveau système d'écoute composé d'un petit réseau spécifiquement adapté à la localisation des baleines, entre Crozet et Kerguelen.

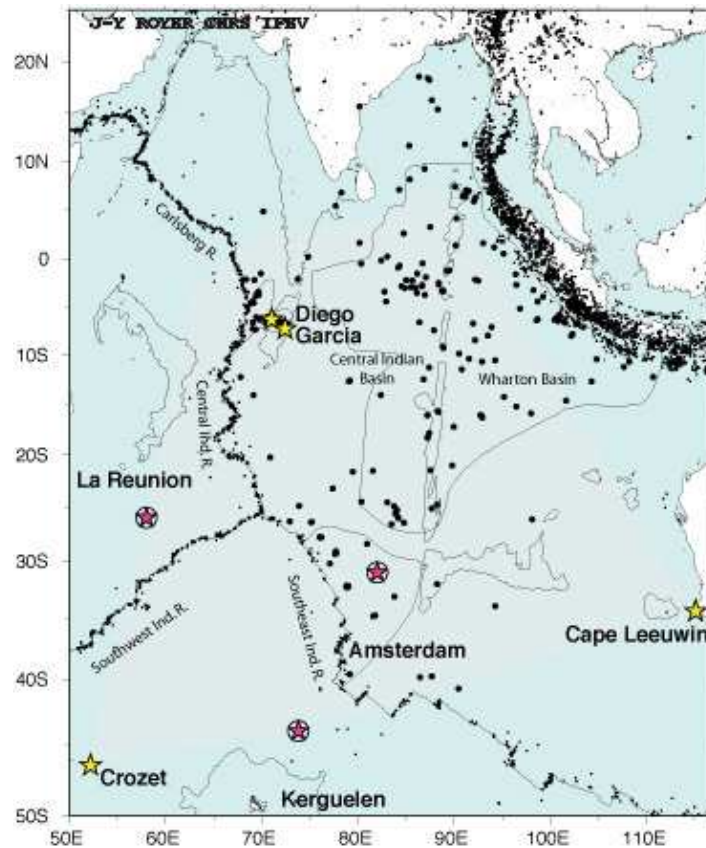


Figure 5.1 : Lieux de déploiement des hydrophones (étoiles rouges) mis en place en 2007-2008 par le Laboratoire Domaines Océaniques de l'Université de Bretagne Occidentale.

Idéalement, sur le plus long terme, il serait très intéressant de pérenniser ce dispositif en maintenant en permanence un hydrophone sur la zone et en installant tous les quatre ans un réseau dense de plusieurs hydrophones permettant de localiser les différentes espèces de cétacés présents. Le taux de détection de cris par unité de temps, pour chaque espèce présente, constituerait alors un indice dans l'évolution de l'abondance des espèces et permettrait, par conséquent, de déterminer si les effectifs sont stables, diminuent ou augmentent. De la même manière, ce dispositif permettrait de préciser les variations interannuelles de présence des baleines en fonction des conditions océanographiques observées à partir de satellites comme la température, la productivité phytoplanktonique ou encore les variations de l'activité méso-échelle (fronts et tourbillons).

Dans cette étude, l'impossibilité d'enregistrer des signaux de plus hautes fréquences a considérablement réduit le nombre d'espèces étudiées. En couvrant une bande de fréquences plus large, il aurait certainement été possible d'étudier la présence et la saisonnalité de la baleine à bosse, du petit rorqual, de la baleine franche australe, mais aussi des autres espèces de baleines à dents connues pour fréquenter largement les eaux subantarctiques autour de Crozet (i.e. orques, cachalots). Pour les projets futurs il serait extrêmement intéressant d'élargir la bande passante de l'écoute acoustique.

L'approche acoustique pour l'étude des baleines utilise les signaux détectés comme des indicateurs de la présence des espèces dans une zone. Il ne révèle pas le nombre ou l'abondance des baleines présentes car actuellement il n'existe aucun proxy entre le nombre de cris détectés et le nombre de baleines (Mellinger et al 2007). Cependant, un groupe de recherche (DECAF, dirigé par Len Thomas, Université d'Aberdeen, Ecosse) travaille depuis quelques mois sur l'estimation de l'abondance des baleines par l'approche acoustique en adaptant des méthodes statistiques d'estimations d'abondance à partir d'observations visuelles (i.e. la méthode du *distance sampling*) sur des observations acoustiques. Pour ceci, connaître les capacités de détection du système d'écoute est primordial. Or, dans notre étude, par la méthode de détection automatique développée spécifiquement et par l'utilisation du modèle de propagation du son adapté à l'aire d'écoute, nous connaissons particulièrement bien les capacités du système. La présente étude fait alors partie de cet ambitieux projet de recherche et les résultats attendus pourront alors largement venir compléter ce travail de thèse et apporterons des éléments nouveaux sur l'état des stocks de grandes baleines à l'ouest de l'Océan Indien.

Nous avons souligné dans ce travail de thèse, la grande similarité existante entre les signaux acoustiques émis par les baleines bleues, que ce soit pour les baleines bleues Antarctique ou les baleines bleues pygmées. Les mesures effectuées sur les différentes parties qui composent ces signaux laissent toutefois supposer une très légère variabilité. Dans ce contexte, un travail de recherche sur la reconnaissance individuelle par des méthodes de traitements statistiques est actuellement mis en place en collaboration avec le CEA (Michaël Aupetit et Thomas Musikas). Nous espérons que les résultats permettront de distinguer les signatures vocales des différentes baleines présentes.

BIBLIOGRAPHIE

A

- ALLEN K.R. 1972. Further notes on the assessment of Antarctic fin whale stocks. Report of the International Whaling Commission 22, 43-53.
- ALLING A., DORSEY E.M. & GORDON J.C.D. 1991. Blue whales (*Balaenoptera musculus*) off the Northeast coast of Sri Lanka: distribution, feeding and individual identification. UNEP Marine Mammal Technical Report 3, 247–258.
- ANDERSON J. 1878. Anatomical and zoological researches: comprising an account of the zoological results of the two expeditions to Western Yunnan in 1868 and 1875; and a monograph of the two cetacean genera, *Platanista* and *Orcella*. Bernard Quaritch, London, 2, 551–564 + plate XLIV.
- AU W.W.L. 1993. The Sonar of Dolphins. Springer-Verlag (eds), New York, 277pp.

B

- BAILLEUL F., CHARASSIN J.-B., MONESTIEZ P., ROQUET F., BIUW M. & GUINET C. 2007. Successful foraging of southern elephant seals from Kerguelen islands in relation to oceanographic conditions. *Philosophical Transaction of the Royal Society B* 362, 2169–2181
- BANNISTER J.L. 1993. Whale Protection Act 1980: summary report on activities carried out under Scientific permit P1993/030. Unpublished report to Australian Nature Conservation Agency, Canberra, 13pp.
- BANNISTER J.L. 1994. Continued increase in humpback whales off Western Australia. Report of the International Whaling Commission 44, 309–310.
- BARLOW J. & TAYLOR B.L. 2005. Estimates of sperm whale abundance in the northeastern temperate Pacific from a combined acoustic and visual survey. *Marine Mammal Science* 21, 429–445.
- BASS A.H. & CLARK C.W. 2002. The Physical Acoustics of Underwater Sound Communication. *Acoustic Communication* 16, 15-64.
- BAUMGARTNER M.F., VAN PARIJS S.M., WENZEL F.W., TREMBLAY C.J., ESCH H.C. & WARDE A.M. 2008. Low frequency vocalizations attributed to sei whales (*Balaenoptera borealis*). *Journal of Acoustical Society of America* 124(2), 1339–1349.
- BELKIN I.M. & GORDON A.L. 1996. Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania. *Journal of Geophysical Research* 101(C2), 3675–3696.

- BERCHOK C.L., BRADLEY D.L. & GABRIELSON T.B. 2006. St. Lawrence blue whale vocalizations revisited: Characterization of calls detected from 1998 to 2001. *Journal of Acoustical Society of America* 120(4), 2340–2354.
- BEST P.B., RADEMEYER R.A., BURTON C., LJUNGBLAD D., SEKIGUCHI K., SHIMADA H., THIELE D., REEB D. & BUTTERWORTH D.S. 2003. The abundance of blue whales on the Madagascar Plateau, December 1996. *Journal of Cetacean Research and Management* 5, 253–260.
- BLYTH E. 1859. On the great rorqual of the Indian Ocean, with notices of other cetals, and of the *Syrenia* or marine Pachyderms. *Journal of the Asiatic Society of Bengal* 28, 481–498.
- BONNER W.N. 1980. *Whales*. Blandford Press. Poole 278pp.
- BOSCA L., CLAQUE G., ALCOVERRO B. & RUZIÉ G. 2003. HA04 - U.M.U. Calibration File-Theoretical and laboratory measurements results. CEA/DIF/DASE Version 1.0 index B.
- BRANCH T.A. & BUTTERWORTH D.S. 2001A. Southern Hemisphere minke whales: standardised abundance estimates from the 1978/79–1997/98 IDCR/SOWER surveys. *Journal of Cetacean Research and Management* 3, 143–174.
- BRANCH T.A., MATSUOKA K. & MIYASHITA T. 2004. Evidence for increases in Antarctic blue whales based on Bayesian modelling. *Marine Mammal Science* 20, 726–754.
- BRANCH T.A., STAFFORD K.M., PALACIOS D.M., ALLISON C., BANNISTER J.L., BURTON C.L.K., CABRERA E., CARLSON C.A., GALLETTI VERNAZZANI B., GILL P.C., HUCKE-GAETE R., JENNER K.C.S., JENNER M., MATSUOKA K., MIKHALEV Y., MIYASHITA T., MORRICE M., NISHIWAKI S., STURROCK V.J., TORMOSOV D., ANDERSON R.C., BAKER A.N., BEST P.B., BORSA P., BROWNELL R.L., CHILDERHOUSE S., FINDLAY K., GERRODETTE T., ILANGAKOON A.D., JOERGENSEN M., KAHN D.K., LJUNGBLAD D., MAUGHAN B., MCCAULEY R.D., MCKAY S., NORRIS T.F., OMANWHALE AND DOLPHIN RESEARCH GROUP, RANKIN S., SAMARAN F., THIELE D., VAN WAEREBEEK K. & WARNEKE R.M. 2007a. Past and present distribution, densities and movements of blue whales in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean. *Mammal Review* 37(2), 116-75.
- BRANCH T.A., ABUBAKER E.M.N., MKANGO S. & BUTTERWORTH D.S. 2007B. Separating southern blue whale subspecies based on length frequencies of sexually mature females. *Marine Mammal Science* 23(4), 803-33.
- BRANCH T.A. 2008. Abundance of Antarctic blue whales south of 60°S from three complete circumpolar sets of surveys. *Journal of Cetacean Research and Management* 9(3), 253–262.
- BRANDAO A., BUTTERWORTH D.S. AND BROWN M.R. 2000. Report of the Scientific Committee. Annex G. Report of the Sub-Committee on the Comprehensive Assessment of Other Whale Stocks. Appendix 8. Maximum possible humpback whale increase rates as a function of biological parameter values. *Journal of Cetacean Research and Management (Suppl.)* 2, 192-93.
- BROWN S.G. 1954. Dispersal in blue and fin whales. *Discovery Reports* 26, 355–384.

- BROWN S.G. 1962A. A note on migration of fin whales. *Norsk Hvalfangst-Tidende* 51, 13-16.
- BROWN S.G. 1962B. The movements of fin and blue whales within the Antarctic zone. *Discovery Reports* 33, 1–54.
- BROWN S.G. 1977. Whale marking in the North Atlantic. Report of the International Whaling Commission 27, 451–455.
- BROWN S.G. 1978. Whale marking techniques pp. 71-80. In: Recognition marking of animals in research Stonehouse (eds). Macmillan, London.
- BROWN M.R., CORKERON P.J., HALE P.T., SCHULTZ K.W. & BRYDEN M.M. 1995. Evidence for a sex-segregated migration in the humpback whale (*Megaptera novaeangliae*). *Proceedings of the Royal Society of London B* 259, 229–234.
- BUDYLENKO G.A. 1977. Distribution and composition of sei whale Schools in the southern hemisphere. Paper SC/27/Doc8 presented to IWC Scientific Committee, 3pp. (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).

C

- CANSI Y. 1995. An Automatic Seismic Event Processing for Detection and Location: The P.M.C.C. Method. *Geophysical Research Letter* 22(9), 1021–1024.
- CATO D.H. 1991. Songs of humpback whales: The Australian perspective. *Memoirs of the Queensland Museum* 30, 277–290.
- CATO D.H. 1998. Simple methods of estimating source levels and location of marine animal sounds. *Journal of the Acoustical Society of America* 104, 1667-1678.
- CHAPMAN D.G., ALLEN K.R. & HOLT S.J. 1964. Report of the Committee of Three Scientist on the special scientific investigation of the Antarctic whale stocks. Report of the International Whaling Commission 14, 32-106.
- CLAPHAM P. 1996. The social and reproductive biology of Humpback Whales: An ecological perspective. *Mammal Review* 26, 27-49.
- CLAPHAM P.J. & BAKER C.S. 2001. How many whales were killed in the Southern Hemisphere in the 20th century? Paper SC/53/O14 presented to IWC Scientific Committee, 3pp. (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).
- CLAPHAM P.J. & MATTILA D.K. 1990. Humpback whale songs as indicators of migration routes. *Marine Mammal Science* 6, 155-160.
- CLARK C.W. 1995. Matters arising out of the discussion of blue whales. Report of the International Whaling Commission 45, 210-212.

- CLARK C.W., BORSANI J.F. & NOTARBARTOLO-DI-SCIARA G. 2002. Vocal activity of fin whales, *Balaenoptera physalus*, in the Ligurian Sea. *Marine Mammal Science* 18, 286-295.
- CLARK C.W. & ELLISON W.T. 2004. Potential use of low-frequency sounds by baleen whales for probing the environment: Evidence from models and empirical measurements. In: *Advances in the Study of Echolocation in Bats and Dolphins*, J.A. Thomas & R.A. Kastelein (eds).
- CLARK C.W. & CLAPHAM P.J. 2004. Acoustic monitoring on a humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) feeding ground shows continual singing into late spring. *Proceedings of the Royal Society of London B* 271, 1051-1057.
- COLLINS M.D. 1993. A split-step Padé solution for the parabolic equation method. *Journal of the Acoustical Society of America* 93, 1736–1742.
- COLLINS M.D. 1995. User's guide for RAM versions 1.0 and 1.0p Technical report, Naval Research Laboratory, Washington, D.C.
- COSTA D.P. 1993. The secret life of marine mammals. Novel tools for studying their behaviour and biology at sea. *Oceanography* 6, 120-128.
- COTTÉ C., PARK Y.H., GUINET C. & BOST C.-A. 2007. Movements of foraging king penguins through marine mesoscale eddies, *Proceeding of Royal Society B* 274, 2385-2391.
- CROLL D.A., CLARK C.W., ACEVEDO A., TERSHY B.R., FLORES S., GEDAMKE J. & URBAN J. 2002. Only male fin whales sing loud songs. *Nature* 417, 809.
- CUMMINGS W.C. & THOMPSON P.O. 1971. Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*. *Journal of the Acoustical Society of America* 50, 1193–1198.
- CUMMINGS W.C., THOMPSON P.A. & HA S.J. 1986. Sounds from bryde, *Balaenoptera edeni*, and finback, *B. Physalus*, whales in the Gulf of California. *Fishery Bulletin* 84, 359-370.

D

- DAMY G. 2000. Projet CROHYDRO: Modélisation du comportement des lignes IFREMER/TMSI/RED/HA R01HA00.
- DAMY G. 2005. CROHYDRO Modélisation et analyse du comportement dynamique des lignes d'écoute IFREMER/ TMSI/RED/H0 008.04.
- DARLING J.D. 2002. Song. pp. 1124-6. In: *Encyclopedia of Marine Mammals*. W.F. Perrin, B. Wursig & J.G.M. Thewissen (eds). Academic Press, San Diego.
- DARLING J.D. & BERUBÉ M. 2001. Interactions of singing humpback whales with other males. *Marine Mammal Science* 17(3), 570 – 584.

DARLING J.D. & SOUSA-LIMA R.S. 2005. Notes: songs indicate interaction between humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) populations in the western and eastern South Atlantic Ocean. *Marine Mammal Science* 21(3), 557 – 566.

DAWBIN W.H. 1966. The seasonal migratory cycle of humpback whales. pp. 145-170. In : *Whales, Dolphins, and Porpoises*. Norris, K.S. (ed) University of California Press, Berkeley.

DAWBIN W.H. 1997. Temporal segregation of humpback whales during migration in the southern hemisphere waters. *Memoirs of the Queensland Museum* 42, 105–138.

D'SPAIN G.L., KUPERMAN W.A., HODGKISS W.S. & BERGER L.P. 1995. 3-D localisation of a blue whale. MPL technical Memorandum 447, University of California, SCRIPPS.

E

EDDS-WALTON P.L. 1997. Acoustic communication signals of mysticete whales. *Bioacoustics* 8, 47-60.

ENSOR P., KOMIYA H., BEASLEY I., FUKUTOME K., OLSON P. & TSUDA Y. 2007. 2006-2007 International Whaling Commission-Southern Ocean Whale and Ecosystem Research (IWC-SOWER) Cruise. Paper SC/59/IA1 presented to the IWC Scientific Committee. 63pp. (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).

F

FINDLAY K.P., BEST P.B., PEDDEMORS V.M. & GOVE D. 1994. The distribution and abundance of humpback whales on their southern and central Mozambique winter grounds. Report of the International Whaling Commission 44, 311-320.

FORD J.K.B. 1991. Vocal traditions among resident killer whale (*Orcinus Orca*) in coastal waters of British Columbia. *Canadian Journal of Zoology* 69, 1454-1483.

G

GAMBELL R. 1964. A pygmy blue whale at Durban. *Norsk Hvalfangst-Tidende* 53, 66-68.

GAMBELL R. 1976. World whale stocks. *Mammal Review* 6(1), 41 – 53.

GARNER G.W., AMSTRUP S.C., LOAKE J.L., MANLY B.F.J., MCDONALD L.L. & ROBERTSON D.G. 1998. Marine mammal survey and assessment methods. In: *The symposium on survey, status and trends of marine mammal population*. Seattle, WA, USA, 1998. A.A. Balkema, Rotterdam.

GEDAMKE J., COSTA D.P., DUNSTAN A. 2001 Localization and visual verification of a complex minke whale vocalization. *The Journal of the Acoustical Society of America* 109, 3038-3047.

GILL P.C. 2002. A blue whale (*Balaenoptera musculus*) feeding ground in a southern Australian coastal upwelling zone. *Journal of Cetacean Research and Management* 4, 179–184.

H

HARMER S.F. 1931. Southern Whaling. *Proceeding of Linnean Society of London* 142, 85-163.

HELWEG D.A., CATO D.H., JENKINS P.F., C. GARRIGUE & MCCAULEY R.D. 1998. Geographic variation in South Pacific humpback whale song. *Behaviour* 137, 1-27.

HORWOOD J.S. 1986. The distribution of the southern blue whale in relation to recent estimates of abundance. *Scientific reports of the Whales Research Institute* 37, 155-165.

HUCKE-GAETE R., OSMAN L.P., MORENO C.A., FINDLAY K.P. & LJUNGLBLAD D.K. 2004. Discovery of a blue whale feeding and nursing ground in southern Chile. *Proceeding of Royal Society of London B* 271, 170-173.

I

ICHIHARA T. 1961. Blue whales in the waters around Kerguelen Island. *Norsk Hvalfangst-Tidende* 50, 1– 20.

ICHIHARA T. 1963. Identification of the pigmy blue whale in the Antarctic waters around Kerguelen Island. *Norsk Hvalfangst-Tidende* 52, 128– 130.

ICHIHARA T. 1966. The pygmy blue whale, *Balaenoptera musculus brevicauda*, a new subspecies from the Antarctic. pp. 79–111. In: *Whales, Dolphins, and Porpoises*. K.S. Norris (ed). University of California Press, Berkeley and Los Angeles, CA.

ICHIHARA T. 1975. Review of pygmy blue whale stock in the Antarctic. *Comité consultatif de la recherche sur les ressources de la mer. FAO Marine mammals* 8pp. 37. Food and agriculture Organization of the United Nations.

J

JOHNSTON S.J. & BUTTERWORTH D.S. 2005A. A Bayesian assessment of the west and east Australian breeding populations (stocks D and E) of Southern Hemisphere humpback whales. Paper SC/57/SH15 presented to the IWC Scientific Committee, 25pp. (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).

JOHNSTON S.J., & BUTTERWORTH D.S., 2005B. A Bayesian assessment of breeding stocks B, C and G of Southern Hemisphere humpback whales using a prior for growth rate from analyses for stocks D and E. Paper SC/57/SH16 presented to the IWC Scientific Committee, 14pp. (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).

K

KASAMATSU F. & JOYCE G.G. 1995. Current status of odontocetes in the Antarctic. *Antarctic Science* 7(4), 365-79.

KASAMATSU F., JOYCE G.G., ENSOR P. & MERMOZ J. 1996. Current occurrence of baleen whales in Antarctic waters. *Report of the International Whaling Commission* 47, 293-304.

KASAMATSU F., MATSUOKA K. & HAKAMADA T. 2000. Interspecific relationships in density among the whale community in the Antarctic. *Polar Biology* 23, 466–473.

KATO H., MIYASHITA T. & SHIMADA H. 1995. Segregation of the two sub-species of the blue whale in the Southern Hemisphere. *Report of the International Whaling Commission* 45, 273–283.

KAWAMURA A. 1978. An interim consideration on a possible interspecific relation in southern baleen whale from the viewpoint of their food habit. *Report of the International Whaling Commission* 28, 411-220.

KAWAMURA A. 1980. A review of food of Balaenopterid whales. *Scientific reports of the Whales Research Institute* 32, 155-197.

KAWAMURA A. 1994. A review of baleen whale feeding in the Southern Ocean. *Report of the International Whaling Commission* 44, 261-271.

KELLOGG R. 1929. What is known of the migrations of some of the whalebone whales. *Smithsonian Institution Annual Report* 1928, 467-496.

KNOWLTON A.R., CLARK C.W. & KRAUS S.D. 1991. Sounds recorded in the presence of sei whales, *Balaenoptera borealis*. In: *The Ninth Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals*, Chicago, IL, pp. 40.

L

LAPLANCHE C. 2005. Etude par acoustique passive du comportement de chasse du grand cachalot. Thèse de doctorat. Université Paris 12 Val-de-Marne. Créteil, France.

LAWS R.M. 1959. The foetal growth rates of whales with special reference to the fin whale, *Balaenoptera physalus*, *Discovery Reports* 29, 281-308.

- LAWS R.M. 1961. Reproduction, growth and age of southern fin whales. *Discovery Reports* 31, 327-486.
- LAWS R.M. 1977. The significance of vertebrates in the Antarctic marine ecosystem. pp. 411-438. In: *Adaptations within Antarctic ecosystems*, by G.A. Lano (ed). Smithsonian Institution, Washington, DC.
- LAWS R.M. 1985. THE ecology of the Southern Ocean. *American Scientist* 73, 26-40.
- LEDUC R.G., DIZON A.E., GOTO M., PASTENE L.A., KATO H., NISHIWAKI S. & BROWNELL JR. R.L. 2007. Patterns of genetic variation in Southern Hemisphere blue whales, and the use of assignment test to detect mixing on the feeding grounds. *Journal of Cetacean Research and Management* 97, 3–80.
- LEGAY D., STAHL J. C. & JOUVENTIN P. 1998. Mise en évidence de la rareté des Cétacés dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien. Observations effectuées sur 250 000 km de transect et 10 années de suivi, 30pp. Centre d'Etudes Biologiques de Chizé, Villiers-en-Bois, France.
- LJUNGBLAD D.K., STAFFORD K.M., SHIMADA H. & MATSUOKA K. 1997. Sounds attributed to blue whales recorded off the southwest coast of Australia in December 1995. Report of the International Whaling Commission 47, 435–439.
- LJUNGBLAD D.K. & CLARK C.W. 1998. Unique calls of the pygmy blue whale (*B. musculus breviceuda*) recorded off the coast of Chile in December 1997 and January 1998 during the SOWER 1997/1998 program. Paper SC/50/CAWS29 presented to the IWC Scientific Committee (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).
- LJUNGBLAD D.K., CLARK C.W. & SHIMADA H. 1998. A comparison of sounds attributed to pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus breviceuda*) recorded south of the Madagascar Plateau and those attributed to 'true' blue whales (*Balaenoptera musculus*) recorded off Antarctica. Report of the International Whaling Commission 48, 439–442.
- LJUNGBLAD D.K. & STAFFORD K.M. 2005. Blue Whale (*Balaenoptera musculus*) Acoustics Results from 2003-2004 International Whaling Commission-Southern Ocean Whale and Ecosystem Research Circumpolar Cruise, AreaV. In: *The 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals*, San Diego, CA, pp. 170.
- LOCKYER C. 1976. Body weights of some species of large whales. *ICES Journal of Marine Sciences* 36(3), 259-273.
- LOCKYER C. 1981. Growth and energy budgets of large baleen whales from the southern hemisphere. *Mammals in the Sea. Volume III. General Papers and Large Cetaceans*, FAO Fisheries Series 5 pp. 379-487. Food and agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- LOPATKA M., ADAM O., LAPLANCHE C., ZARZYCKI J., & MOTSCH J.-F. 2005. An attractive alternative for sperm whale click detection using the wavelet transform in comparison to the Fourier spectrogram. *Aquatic Mammals* 31, 463–467

M

- MACKINTOSH N.A. 1942. The southern stocks of whalebone whales. *Discovery Reports* 22, 197–300.
- MACKINTOSH N.A. 1946. The Antarctic Convergence and the distribution of surface temperatures in Antarctic waters. *Discovery Report* 23, 179-212.
- MACKINTOSH N.A. 1965. *The Stocks of Whales*. Fishing News, Ltd, London. 232pp.
- MACKINTOSH N.A. 1966. Distribution of southern blue and fin whales. pp. 125–144. In: *Whales, Dolphins, and Porpoises*. K.S. Norris (ed). University of California Press, Berkeley, CA.
- MACKINTOSH N.A. & WHEELER J.F.G. 1929. Southern blue and fin whales. *Discovery Reports* 1, 257–540.
- MATSUOKA K., MURASE H., NISHIWAKI S., FUKUCHI T. & SHIMADA H. 2000. Development of a retrievable sonobuoy system for whale sounds recording in polar region. Paper SC/52/O7 presented to the IWC Scientific Committee. 7pp. (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).
- MATSUOKA K., ENSOR P., HAKAMADA T., SHIMADA H., NISHIWAKI S., KASAMATSU F. & KATO H. 2003. Overview of minke whale sightings surveys conducted on IWC/IDCR and SOWER Antarctic cruises from 1978/79 to 2000/01. *Journal of Cetacean Research and Management* 5, 173–201.
- MATSUOKA K., HAKAMADA T., KIWADA H., MURASE H. & NISHIWAKI S. 2006. Distribution and abundance estimates of blue whales in the Antarctic Areas III, IV, V and VIW (35°E–145°W) based on JARPA data. Paper SC/58/SH7 presented to the IWC Scientific Committee (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).
- MATE B.R., LAGERQUIST B.A. & CALAMBOKIDIS J. 1999. Movements of North Pacific blue whales during the feeding season off southern California and their southern fall migration. *Marine Mammal Science* 15, 1246–1257.
- MATTHEWS J.N., RENDELL L.E., GORDON J.C.D. & MACDONALD D.W. 1999. A review of frequency and time parameters of cetacean tonal calls. *Bioacoustics* 10, 47-71.
- MATTLA D.K., GUINEE L.N. & MAYO C.A. 1987. Humpback whale songs on the North Atlantic feeding grounds. *Journal of Mammalogy* 68, 880-883.
- MCCAULEY R.D., JENNER C., BANNISTER J.L., BURTON C.L.K., CATO D.H. & DUNCAN A. 2001. Blue Whale Calling in the Rottnest Trench – 2000, Western Australia. Report CMST 2001 6 / CMST 241.
- MCCAULEY R., BANNISTER J., BURTON, C. JENNER, C. RENNIE & KENT C.S. 2004. Western Australian Exercise Area Blue Whale Project. Final summary report. Milestone 6. For Australian Defence. CMST Report R2004-29, Project – 350.

- MCDONALD M.A. 2006. An acoustic survey of baleen whales off Great Barrier Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 40, 519–529.
- MCDONALD M.A. & FOX C.G. 1999. Passive acoustic methods applied to fin whale population density estimation. *Journal of the Acoustical Society of America* 105, 2643-2651.
- MCDONALD M.A., CALAMBOKIDIS J., TERANISHI A.M. & HILDEBRAND J.A. 2001. The acoustic calls of blue whales off California with gender data. *Journal of the Acoustical Society of America* 109, 1728-1735.
- MCDONALD M.A. & MOORE S.E. 2002. Calls recorded from North Pacific right whales *Eubalaena japonica* in the eastern Bering Sea. *Journal of Cetacean Research and Management* 4, 261–266.
- MCDONALD M.A., HILDEBRAND J.A., WIGGINS S.M., THIELE D., GLASGOW D. & MOORE S.E. 2005. Sei whale sounds recorded in the Antarctic. *Journal of the Acoustical Society of America* 118, 3934-3940.
- MCDONALD M.A., HILDEBRAND J.A. & MESNICK S.L. 2006. Biogeographic characterization of blue whale song worldwide: using song to identify populations. *Journal of Cetacean Research and Management* 8, 55–65.
- MCKAY S., ŠIROVIĆ A. & THIELE D. 2005. Preliminary results of blue whale (*Balaenoptera musculus*) call detections in Eastern Antarctica. Paper SC/57/SH4 presented to the IWC Scientific Committee (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK, secretariat@iwcoffice.org).
- MELLINGER D.K. 2001. Ishmael 1.0 User's guide. NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-120. (available from: NOAA/PMEL, 7600 Sand Point Way NE, Seattle, WA 98115-6349).
- MELLINGER D.K. & CLARK C.W. 2000. Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation. *Journal of the Acoustical Society of America* 107, 3518-3529.
- MELLINGER D.K. & CLARK C.W. 2003. Blue whale (*Balaenoptera musculus*) sounds from the North Atlantic. *Journal of the Acoustical Society of America* 114, 1108-1119.
- MELLINGER D.K., NIEUKIRK S.L., MATSUMOTO H., HEIMLICH S.L., DZIAK R.P., HAXEL J., FOWLER M., MEINIG C. & MILLER H.V. 2007. Seasonal occurrence of north atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) vocalizations at two sites on the scotian shelf. *Marine Mammal Science* 23(4), 856–867.
- MIGNEREY P. C. & FINETTE S. 1992. Multichannel deconvolution of an acoustic transient in an oceanic waveguide. *Journal of the Acoustical Society of America* 92, 351–364.
- MIZROCH S.A., RICE D.W. & BREIWICK J.M. 1984. The blue whale, *Balaenoptera musculus*. *Marine Fisheries Review* 46, 15–19.
- MIYASHITA T., SHIGEMUNE H. & KATO H. 1994 Outline of the sighting strategy of scouting vessels attached to Japanese whaling fleets. Report of the International Whaling Commission 44, 273–275.

- MIYASHITA T., KATO H. & KASUYA T. 1995. Worldwide Map of Cetacean Distribution Based on Japanese Sighting Data, Vol. 1. National Research Institute of Far Seas Fisheries, Shimizu, Japan.
- MOORE S.E., STAFFORD K.M., DAHLHEIM M.E., FOX C.G., BRAHAM H.W., POLOVINA J.J. & BAIN D.E. 1998. Seasonal variation in reception of fin whale calls at five geographic areas in the North Pacific. *Marine Mammal Science* 14 (3), 617 - 627.
- MOORE J.K. & ABBOTT M.R. 2000. Phytoplankton chlorophyll distribution and primary production in the Southern Ocean. *Journal of Physical Research* 105 (C12), 28709:28722.
- MORI M., BUTTERWORTH D.S., BRANDÃO A., RADEMEYER R.A., OKAMURA H. & MATSUDA H. 2003. Observer experience and Antarctic minke whale sighting ability in IWC/IDCR-SOWER surveys. *Journal of Cetacean Research and Management* 5(1), 1–11.

N

- NEMOTO T. 1964. School of baleen whales in the feeding areas. *Scientific reports of the Whales Research Institute* 18, 89 – 110.
- NEMOTO T. 1970. Feeding pattern of baleen whales in the ocean. pp. 241–252. In: *Marine Food Chains*. J.H. Steele (ed). University of California Press, Berkeley, CA.
- NEMOTO T. & KASUYA T. 1965. Foods of baleen whales in the Gulf of Alaska and the North Pacific. *Scientific reports of the Whales Research Institute* 19, 45–51.
- NIEUKIRK S.L., STAFFORD K.M., MELLINGER D.K. & FOX C.G. 2004. Low-frequency whale sounds recorded from the mid-Atlantic Ocean. *Journal of the Acoustical Society of America* 115(4), 1832–1843.
- NOAD M.J., CATO D.H., BRYDEN M.M., JENNER M.N. & JENNER K.C.S. 2000. Cultural revolution in whale songs. *Nature* 408, 537.
- NORRIS T.F., McDONALD M. & BARLOW J. 1999. Acoustic detections of singing humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in the eastern North Pacific during their northbound migration. *Journal of the Acoustical Society of America* 106, 506-514.
- NORTHROP J., CUMMINGS W.C. & MORRISON M.F. 1971. Underwater 20-Hz signals recorded near Midway Island. *Journal of the Acoustical Society of America* 49, 1909 – 1910.

O

- OLESON E.M., WIGGINS S.M. & HILDEBRAND J.A. 2007a. Temporal separation of blue whale call types on a southern California feeding ground. *Animal behaviour* 74, 881–894.
- OLESON E.M., CALAMBOKIDIS J., BURGESS W.C., McDONALD M.A., LEDUC C.A., HILDEBRAND J.A. 2007b. Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. *Marine Ecology Progress Series* 330, 269–284.

P

- PAKHOMOV E.A., PERISSINOTTO R. & MCQUAID C.D. 1994 Comparative structure of the macrozooplankton micronekton communities of the subtropical and Antarctic polar fronts. *Marine Ecology Progress. Series* 111, 155–169.
- PARK Y.H., GAMBERONI L., & CHARRIAUD E. 1993. Frontal structure, Water masses and circulation in the Crozet Basin. *Journal of Geophysical Research* 98(C7).
- PARK Y.H. & GAMBÉRONI L. 1997. Cross-frontal exchange of Antarctic Intermediate Water and Antarctic Bottom Water in the Crozet Basin. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography* 44(5) 963-986.
- PARK Y.H., CHARRIAUD E. & FIEUX M. 1998. Thermohaline structure of the Antarctic surface water/winter water in the Indian sector of the Southern Ocean. *Journal of Marine Systems* 17, 5-23.
- PATTERSON B. & HAMILTON G.R. 1964. Repetitive 20 cycles per second biological hydroacoustic signals at Bermuda. pp. 125-145. In: *Marine Bio-acoustics Vol. 1*. Tavolga W.N. (ed) Pergamon Press, Oxford.
- PAYNE R. & PAYNE K. 1971. Underwater sounds of southern right whales. *Zoologica* 58, 159-165.
- PAYNE R. & WEBB D. 1971. Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales. *Annals of the New York Academy of Sciences* 188, 110-141.
- PAYNE R. S. & MCVAY S. 1971. Songs of humpback whales. *Science* 173, 585-597.
- PAYNE R.S. & GUINEE L.N. 1983. Humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) songs as an indicator of stocks. pp. 333–358. In : *Communication and Behavior of Whales*. R.S. Payne (ed).
- PEKERIS C.L. 1948. Theory of propagation of explosive sound in shallow water. *Geological Society of America Mem* 27, 1–117.
- POLLARD R.T., VENABLES H.J., READ J.F. & ALLEN J.T. 2007. Large-scale circulation around the Crozet Plateau controls an annual phytoplankton in the Crozet Basin. *Deep Sea Research Part II* 54, 1915-1929.
- PORTER M.B. & BUCKER H.P. 1987. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *Journal of the Acoustical Society of America* 82(4), 1349 – 1359.

R

- RANKIN S., LJUNGBLAD D., CLARK C. & KATO H. 2005. Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 IWC/SOWER circumpolar cruises, Area V, Antarctica. *Journal of Cetacean Research and Management* 7, 13–20.

- RANKIN S. & BARLOW J. 2007. Vocalizations of the sei whale *Balaenoptera borealis* off the Hawaiian Islands. *Bioacoustics* 16, 137–145.
- RAZAFINDRAKOTO Y., ROSENBAUM H.C. & HELWEG D.A. 2001. First description of humpback whale song from Antongil Bay, Madagascar. *Marine Mammal Science* 17, 180-186.
- READ J.F., POLLARD R.T. & ALLEN J.T. 2007. Sub-mesoscale structure and the development of an eddy in the Subantarctic Front north of the Crozet Islands. *Deep Sea Research Part II* 54, 1930-1948.
- REBULL O.G., CUSÍ J.D., FERNÁNDEZ M.R. & MUSSET J.G. 2006. Tracking fin whale calls offshore the Galicia Margin, North East Atlantic Ocean. *Journal of the Acoustical Society of America* 120, 2077-2085.
- RICE D.W. 1972. The great blue whale. *Pacific Search* 6, 8-10.
- RICE D.W. 1998. *Marine Mammals of the World: Systematics and Distribution*. K.S. Lawrence (ed). Allen Press Inc.
- RICHARDSON W.J., GREENE C.R. JR., MALME C.I. & THOMSON D.H. 1995. *Marine Mammals and Noise*. Academic Press, San Diego 576pp.
- ROUEFF A., PISERCHIA P.-F., PLANTET J.-L., CANSI Y. & RUZIÉ G. 2004. Noise characterization at the international station of Crozet Islands (HO4). *Journal of the Acoustical Society of America* 116, 2649.
- RUZIÉ G. 1998. Station HA4 in Crozet Islands-Site Survey Report – CEA/DRIF/DASE DO 956 12/08/98.

S

- SAMARAN F. 2004. Déteçtabilité des vocalisations de rorquals communs (*Balaenoptera physalus*) à partir d'une station côtière dans la voie maritime de l'estuaire du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec.
- SCHEVILL W.E. 1964. Underwater sounds of cetaceans. pp. 307-316. In: *Marine Bio-acoustics* Vol. 1. W.N. Tavolga (ed). Pergamon Press, Oxford.
- SCHEVILL W.E., WATKINS W.A. & BACKUS R.H. 1964. The 20-cycle signals and *Balaenoptera* (fin whales). pp. 147-152. In: *Marine Bio-Acoustics* Vol. 1. W.N. Tavolga (ed). Pergamon Press, Oxford.
- ŠIROVIC´ A. 2006. Blue and fin whale acoustics and ecology off Antarctic Peninsula. Thèse de doctorat. University of San Diego, San Diego.
- ŠIROVIC´ A., HILDEBRAND J.A., WIGGINS S.M., McDONALD M.A., MOORE S.E. & THIELE D. 2004. Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Research II* 51, 2327–2344.

- ŠIROVIĆ A., HILDEBRAND J.A. & THIELE D. 2006. Baleen whales in the Scotia Sea in January and February 2003. *Journal of Cetacean Research and Management* 8, 161–171.
- ŠIROVIĆ A., HILDEBRAND J. A. & WIGGINS S. M. 2007. Blue and fin whale call source levels and propagation range in the Southern Ocean. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122 1208–1215.
- SPIESBERGER J.L. & FRISTRUP K.M. 1990. Passive localization of calling animals and sensing of their acoustic environment using acoustic tomography. *American Naturalist* 135,107-153.
- STAFFORD K.M., FOX C.G. & CLARK D.S. 1998. Long-range acoustic detection and localization of blue whale calls in the northeast Pacific Ocean. *Journal of the Acoustical Society of America* 104, 3616-3625.
- STAFFORD K.M., NIEUKIRK S.L. & FOX C.G. 1999A. Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical Pacific. *Journal of the Acoustical Society of America* 106, 3687–3698.
- STAFFORD K.M., NIEUKIRK S.L. & FOX C.G. 1999B. An acoustic link between blue whales in the Eastern Tropical Pacific and the Northeast Pacific. *Marine Mammal Science* 15, 1258-1268.
- STAFFORD K.M., NIEUKIRK S. L. & FOX C.G. 2001. Geographic and seasonal variation of blue whale calls in the North Pacific. *Journal of Cetacean Research and Management* 3, 65-76.
- STAFFORD K.M., BOHNENSTIEHL D.R., TOLSTOY M., CHAPP E., MELLINGER D.K. & MOORE S.E. 2004. Antarctic type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans. *Deep-Sea Research I* 51, 1337–1346.
- STAFFORD K.M. & MOORE S.E. 2005. Atypical calling by a blue whale in the Gulf of Alaska. *Journal of the Acoustical Society of America* 117(5), 2724–2727.
- STAFFORD K.M., BOHNENSTIEHL D.R., CHAPP E. & TOLSTOY M. 2005. Location, location, location: acoustic evidence suggests three geographic stocks of ‘pygmy’ blue whales in the Indian Ocean. In: 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, San Diego, California, pp. 266–267.
- STAFFORD K.M., MELLINGER D.K., MOORE S.E. & FOX C.G. 2007. Seasonal variability and detection range modeling of baleen whale calls in the Gulf of Alaska, 1999–2002. *Journal of the Acoustical Society of America* 122(6), 3378–3390.
- STAHL J.C., BARTLE J.A., JOUVENTIN P., ROUX J.P. & WEIMERSKIRCH H. 1996. Atlas of seabird distribution in the south-west Indian ocean, pp. 226.

T

- TALANDIER J., HYVERNAUD O., OKAL E.A. & PISERCHIA P.F. 2002. Long-range detection of hydroacoustic signals from large iceberg in the Ross Sea, Antarctica, Earth Planet. Science Letters 203, 519-534.
- TIEBOT J.B. 2005. Les stratégies de prospection alimentaire chez les oiseaux marins: associations privilégiées avec les mammifères marins dans quatre communautés du sud de l'océan indien. Mémoire de Master. Université La Rochelle, Centre d'Etude biologique de Chizé (CNRS).
- TIEMANN C.O., PORTER M.B. & FRAZER L.N. 2004 Localization of marine mammals near Hawaii using an acoustic propagation model. Journal of the Acoustical Society of America 115(6), 2834–2843.
- THIELE D., CHESTER E.T., MOORE S.E., ŠIROVIC A., HILDEBRAND J.A. & FRIEDLAENDER A. 2004. Seasonal variability in whale encounters in the Western Antarctic Peninsula. Deep-Sea Research II 51, 2311-2325.
- THIELE D. 2005. Report of an opportunistic survey for Irrawaddy dolphins, *Orcaella brevirostris*, off the Kimberley Coast, northwest Australia. Paper SC/57/SM2 presented to the IWC Scientific Committee (Available from IWC, The Red House, 135 Station Road, Impington, Cambridge, CB4 9NP, UK secretariat@iwcoffice.org).
- THIELE D., CHESTER E.T. & GILL P.C. 2000. Cetacean distribution off Eastern Antarctica (80-150°E) during the austral summer of 1995/1996. Deep-Sea Research II 47, 2543-2572.
- THODE A.M., D'SPAIN G.L. & KUPERMAN W.A. 2000. Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations. Journal of the Acoustical Society of America 107, 1286-1300.
- THOMPSON P.O. 1965. Marine biological sound west of San Clemente Island: diurnal distributions and effects on ambient noise level during July 1963. US Navy Electronics Laboratory Report 1290, San Diego, California. 42pp.
- THOMPSON T.J., WINN H.E. & PERKINS P.J. 1979. Mysticete sounds. pp. 403-431. In: Behavior of marine animals Vol. 3. H.E. Winn & B.L. Olla (eds), Plenum Press, NY.
- THOMPSON P.O. & FRIEDL W.A. 1982. A long-term study of low frequency sounds from several species of whales off Oahu, Hawaii. Cetology 45, 1–19.
- THOMPSON P.O., FINDLEY L.T., VIDAL O. & CUMMINGS W.C. 1996. Underwater sounds of blue whales, *Balaenoptera musculus*, in the Gulf of California, Mexico, Marine Mammal Science 12(2), 288-292.
- TOMILIN A.G. 1957. Mammals of the USSR and Adjacent Countries. Vol X: Cetacea. V.G. Heptner (ed). Nauk SSSR, Moscow. 717pp. (Translated in 1967 by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem)

- TOMILIN A.G. 1967. *Balaenoptera musculus* L. Blue Whales. pp. 76-112. In: *Mammals of the USSR and Adjacent Countries*. Vol. 9. Cetacea.
- TYACK P.L. 1981. Interactions Between Singing Hawaiian Humpback Whales and Conspecifics Nearby. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 8, 105-116.
- TYACK P.L. 1983. Differential response of humpback whales, *Megaptera novaeangliae*, to playback of song or social sounds. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 13, 49-55.
- TYACK P.L. 1999. Communication and cognition. pp. 287-323. In: *Biology of Marine Mammals*. J.E. Reynolds III & S.A. Rommel (eds), Smithsonian Institution Press, London.
- TYACK P.L. 2000. Functional aspects of cetacean communication. pp. 270-307. In: *Cetacean Societies: Field studies of dolphins and whales*. J. Mann (ed). University of Chicago Press, Chicago.
- TYACK P.L. & MILLER E.H. 2002. Vocal Anatomy, acoustic communication and echolocation. pp. 142-184. In: *Marine Mammal Biology: an evolutionary approach*. A.R. Hoelzel (ed), Blackwell Science Ltd, Oxford.
- TYNAN C.T. 1998. Ecological importance of the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current. *Nature* 392, 708–710.

W

- WALKER R.A. 1963. Some intense, low-frequency, underwater sounds of wide geographic distribution, apparently of biological origin. *Journal of the Acoustical Society of America* 35, 1816-1824.
- WARTZOK D. & KETTEN D.R. 1999. Marine Mammals sensory systems. pp. 117-175 In: *Biology of marine mammals*. J.E. Reynolds III & S.A. Rommel (eds), Smithsonian Institution Press, Washington.
- WATKINS W.A. 1981. Activities and underwater sounds of fin whales. *Scientific reports of the Whales Research Institute* 33, 83-117.
- WATKINS W.A. & WARTZOK D. 1985. Sensory biophysics marine mammals. *Marine Mammal Science* 1:219–260.
- WATKINS W.A., TYACK P., MOORE K.E. & BIRD J.E. 1987. THE 20-Hz signal of finback whales (*Balaenoptera physalus*). *Journal of the Acoustical Society of America* 82, 1901 -1912.
- WATKINS W.A., DAHER M.A., GEORGE J.E., RODRIGUEZ D. 2004. Twelve years of tracking 52-Hz whale calls from a unique source in the North Pacific. *Deep-Sea Research I* 51, 1889–1901.
- WEINERSKIRCH H., BONADONNA F., BAILLEUL F., MABILLE G., DELLOMO G. & LIPP H.P. 2002. GPS tracking of foraging albatrosses. *Science* 295, 1259.

- WENZ G.M. 1962. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *Journal of the Acoustical Society of America* 34, 1936 - 1956.
- WINN H., E. & PERKINS P. J. 1976. Distribution and sounds of the minke whale, with a review of mysticete sounds. *Cetology* 19, 1-12.
- WINN H.E. & WINN L.K. 1978. The song of humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) in the West Indies. *Marine Biology* 47, 97-114.
- WINN H.E., THOMPSON T.J., CUMMINGS W.C., HAIN J., HUDNALL J., HAYS H.E. & STEINER W.W. 1981. Song of the humpback whale - population comparisons. *Behavior Ecology Sociobiology* 8, 41 - 46.

Y

- YABLOKOV A.V., ZEMSKY V.A., MIKHALEV Y.A., TORMOSOV V.V & BERZIN A.A. 1998. Data on Soviet whaling in the Antarctic in 1947–1972 (population aspects). *Russian Journal of Ecology* 29, 38–42.

Z

- ZEMSKY V.A. & SAZHINOV E.G. 1982. Distribution and current abundance of pygmy blue whales. In: *Marine Mammals*. Translated by Gurevich V.S., Arsenév V.A, Donahue M.A. and Brownell Jr, R.L. (eds) pp. 53–70. All-Union Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography, Moscow. Southwest Fisheries Science Center Administrative Report LJ-94-02.
- ZEMSKY V.A. & SAHZINOZ E.G. 1994. Distribution and current abundance of pygmy blue whales. Translated by Gurevich, V.S., Donahue M.A and Brownell, R.L.Jr. (eds), National Marine Fisheries Service, Southwest Fisheries Science Centre, La Jolla California, LJ-94-02
- ZEMSKY V.A., BERZIN A.A., MIKHALIEV Y.A. & TORMOSOV D.D. 1995. Soviet Antarctic pelagic whaling after WWII: review of actual catch data. *Report of the International Whaling Commission* 45, 131–135.
- ZERBINI A.N., ANDRIOLO A., DA ROCHA J.M., SIMÕES-LOPES,P.C., SICILIANO S., PIZZORNO J.L., WAITE J.M., DEMASTER D.P. & VANBLARICOM G.R. 2004. Winter distribution and abundance of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) off Northeastern Brazil. *Journal of Cetacean Research and Management* 6(1), 101–107.

ANNEXE 1

SAMARANF., ADAM O., MOTSCH J.-F. & GUINET C. 2008.

Definition of the Antarctic and pygmy blue whale call templates.

Application to fast automatic detection.

Canadian Acoustics 36 (1), p. 93-102

DEFINITION OF THE ANTARCTIC AND PYGMY BLUE WHALE CALL TEMPLATES. APPLICATION TO FAST AUTOMATIC DETECTION

Samaran Flore¹, Olivier Adam², Jean-François Motsch², Christophe Guinet¹

¹Centre d'Études Biologiques de Chizé, CNRS, 79360 Villiers en bois, France. samaran@cebc.cnrs.fr

²Laboratoire Images, Signaux et Systèmes Intelligents, groupe Ingénierie des Signaux NeuroSensoriels, Université Paris-Est, France

ABSTRACT

This paper deals with the automatic detection of low-frequency Antarctic (*Balaenoptera musculus intermedia*) and Pygmy (*B. m. brevicauda*) blue whale sounds produced in the Southwestern Indian Ocean. A new detection method based on a matched filter is introduced. Four original match templates are presented and tested against original blue whale subspecies calls. The mathematical formulas of these templates, defined by Gaussian curve models, are provided. The detection threshold is based on the correlation coefficients. The threshold was set to reduce false detections obtained on simulated signals at various signal-to-noise ratios. We focus our work on the true detections of whale calls. Moreover, to obtain a real-time system, we decrease the computational time by decimating the recorded signal ($F_s=250\text{Hz}$). We show that this new method enables us to effectively detect both subspecies in various ambient noises, in the Southern Ocean.

RESUME

Dans ce papier, les sons de basses fréquences émis par les baleines bleues Antarctique (*Balaenoptera musculus intermedia*) et pygmées (*B. m. brevicauda*) dans le secteur sud – ouest de l'Océan Indien ont été détecté automatiquement à partir d'une technique de filtrage adapté. Pour ce faire, des signaux synthétiques ont été créés à partir de signaux originaux en modélisant leurs équations mathématiques à partir de courbes gaussiennes. La détection se fait alors par la corrélation entre le signal entrant et le modèle calculé (template). Le seuil de détection a été choisi au préalable en simulant une série de signaux dans des rapports signal sur bruit différents. Au final, un seuil de détection élevé a été choisi pour minimiser les fausses alarmes au risque d'augmenter les détections manquées. Pour diminuer le temps de calcul, le signal original ($F_s=250\text{Hz}$) a été décimé. Cette méthode originale c'est révélée très efficace pour détecter les sons émis par ces deux sous espèces de baleines bleues dans des niveaux de bruit ambiant très variés comme c'est le cas dans cette partie de l'Océan Indien.

1. INTRODUCTION

Knowledge of marine mammal sounds, and in particular baleen whale sounds, has been largely enhanced thanks to new acoustic data available from a wide variety of instruments that were originally designed to monitor the seismicity of the earth or for defence purposes. Instruments designed to monitor low frequency earthquakes (Watkins, 1981; Nishimura & Colon, 1994; Nieuwark et al., 2004), record seismic-acoustic signals and underwater seismicity (Stafford et al., 2004; Rebull et al., 2006), and listen to Soviet submarines during the cold war via the Navy SOSUS arrays (Costa, 1993; Gagnon & Clark, 1993; Clark & Mellinger, 1994; Mellinger & Clark, 2003) recorded a great variety of calls in the lower frequency range. These calls included Blue (*Balaenoptera musculus*), Fin (*B. physalus*), and Humpback (*Megaptera novaeanglia*) whales over long periods. Recordings of baleen whale calls document the seasonal distributions, the relative abundance, and the acoustic behaviour of particular species. Moreover, they have also been useful in tracking animals in their natural habitat (Mellinger & Clark, 2003; Stafford et al., 2001,

2003, 2004; Širović et al., 2004; McDonald et al., 2006).

The hydroacoustic stations of the International Monitoring System (IMS) were primarily designed to continuously record natural and artificial sounds in the oceans, particularly sounds generated by man-made explosions in support of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) (Roueff et al., 2004). Between May 2003 and April 2004 six IMS stations, provided by the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) were deployed off the coast of Possession Island (Crozet archipelagos in the French Indian Ocean Territory). The low frequency hydrophones (1-100 Hz) have enabled recordings of a large variety of signals: time-variant ambient underwater noise, biological signals including large baleen whales calls, and anthropogenic sounds.

Our aim is to detect the Antarctic blue whale calls (*B. m. intermedia*) and the Pygmy blue whale calls "Madagascar-type" (*B. m. brevicauda*) in the CEA dataset. Using spectrograms, our first analysis identifies the presence of 2 subspecies calls in the approximately 40,000 hour-long dataset. These calls contain some uniform patterns with one or more units, high acoustic intensity (above 180 dB re 1 μPa at

1m), very low frequency range ([28-35 Hz]) and are repetitive (Clark, 1990; Ljungblad et al., 1998; Mellinger & Clark, 2003; Širović et al., 2004, 2007; Stafford et al., 2004; Rankin et al., 2005; McDonald et al., 2006).

Manually detecting each specific blue whale call among a large amount of data would require many hours of effort to scan the spectrograms visually and to listen to the recordings (Stafford et al., 2007). In this context, automatic processes to identify the location, the characteristics, and the abundance of the calls in the dataset are necessary. Moreover, automated detection methods provide objective criteria to detect and count a known sound in a year-long dataset within hours or days. An automated, fast, real-time detection method for blue whale calls was used to analyze the dataset obtained from permanent acoustic stations.

Recently, a variety of methods have been developed and used for automatic recognition of marine mammal sounds. The classical technique is based on the spectrogram matched filter, i.e. the cross-correlation between the spectrograms of the signal of reference (template) and the recorded signal. This cost minimisation matching technique constitutes the basis of the dynamic time-warping (DTW) developed in human speech recognition (Silverman & Morgan, 1990). In this case, the recorded signal could be compressed or dilated before being compared to the template. A variant of this approach, called crosswords reference templates (CWRTs), consists of comparing the recorded signal with a great variety of templates (Abdulla, 2003). Another approach is based on the use of templates defined in the frequency domain. The cross-correlation templates are obtained from the shapes of the known recorded signal spectrograms (Mellinger & Clark, 2000); this method has been used successfully to classifying right whale calls (*Eubalaena japonica*) (Munger et al., 2005). An edge detector has also been tried directly on the spectrogram (Gillepsie, 2004). The choice of referent spectrograms from real recordings determines the performance of the detector. Moreover, the performance may depend on the dataset, in which case it is difficult to generalize the results to other datasets. The referent call contains features of a single individual. If these features are not close to those of other individuals (of the same subspecies) referent spectrograms become non exhaustive. Recently, new methods were proposed including Hidden Markov Modeling (HMM) associated with Artificial Neural Networks (ANN) techniques (Trentin & Gori, 2003), and methods based on time-frequency or time-scale representation such as wavelets. The main disadvantage of these methods is their computational complexity as compared to the matched filter.

The signal conditioner and template definition are key to the successful implementation of the matched filter. To optimize performance detection, we have not chosen to extract one call randomly from the dataset and to use it as the referent signal. It is also important to spend time on the signal pre-treatment, especially the filtering process. This step contributes to improving performance of the detector. In our application, the signal-to-noise ratio varies with each hydrophone for the duration of the dataset. The use of multiple

templates improves detector performance due to variation and distortion among blue whale calls (Munger et al., 2005; Mellinger, 2004).

In this paper, we provide details on the pre-processing of the signal and we describe the mathematical formulas of the different synthetic waveforms used for the detection of both blue whale subspecies calls. Our work is based on the analysis of the CEA dataset and on the knowledge of the blue whale calls (Stafford et al., 2004, 2005; Rankin et al., 2005; Širović et al., 2004, 2007; Mc Donald et al., 2006). The results obtained for different cross-correlation thresholds and different signal-to-noise ratios (SNR) are presented. It should be noted that our work was aimed at minimizing computational complexity. Before concluding, we present results of true and false detections on real signals.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Dataset and blue whale calls

This IMS dataset has been made available for the analysis of South Indian Ocean biological signals. In May 2003, six autonomous stations were moored on the northern (H04N1, H04N2, and H04N3) and southern coasts (H04S1, H04S2, H04S3) of Possession Island (Crozet archipelagos in the French Indian Ocean Territory) in the Indian Ocean between 46°09'S-46°51'S and 51°48'E-51°53'E. Each station consisted of an anchor, a buoy and a hydrophone, called an Underwater Monitoring Unit (UMU).

The optical fiber cable and the converter transmitter constitute the digital communication link, once the analog-to-digital conversion (performed in the UMU) has been carried out. The digital acquisition and storage system perform data format changes without affecting the sampling rate and sample values. The data are dated by a 1ms precision absolute clock synchronized by GPS. Data are transmitted in real time via satellite link to the International Data Center to be analysed at the CEA / DIF / DASE - Bruyères-le-Château FRANCE. These instruments are moored to the seafloor between 1100 and 1500 meter depths. Sensors are suspended near the sound channel axis (SOFAR) at a depth of approximately 300m. They were deployed in a triangular configuration (triad) far from the northern and southern coasts of the island with approximately 2 km spacing between moorings and 60 km between two triads. Acoustic data for H04N2, H04N3, H04S1 and H04S3 were available for the entire recording period; data for H04S2 were available from May 2003 to December 2003; and no data were available for H04N1 due to instrument failures.

The UMU contains the sensor, the analog signal conditioning circuits, and the analog-to-digital converter. These instruments monitored sound continuously, at a sampling rate of 250 Hz, coded by 24 bits (SN: 126.5 dB), and a flat (± 3 dB) frequency response of 1.2-102.5 Hz. Note that the ambient underwater noise is time-variant for the duration of the dataset. For example, during a given month (March 2004), the mean acoustic pressures recording by the hydrophones

are different between the northern network (92.6 ± 2.5 dBrms) and the southern network (109.5 ± 6.4 dBrms) (Table 1). In our preliminary study, we focus on two types of easily recognizable calls: the Antarctic blue whale call (BMi) and the Pygmy blue whale call (BMb) “Madagascar type” (bandwidth [15-35 Hz]).

Antarctic blue whale calls

Spectrograms of the first category of detected calls are similar to those of typical Antarctic blue whale calls (Ljungblad et al., 1998; Širović et al., 2004; Stafford et al., 2004; Rankin et al., 2005). These calls consist of three tonal units repeated in patterned sequences every 40-50 seconds over a period of a few minutes or hours (Figure 1).

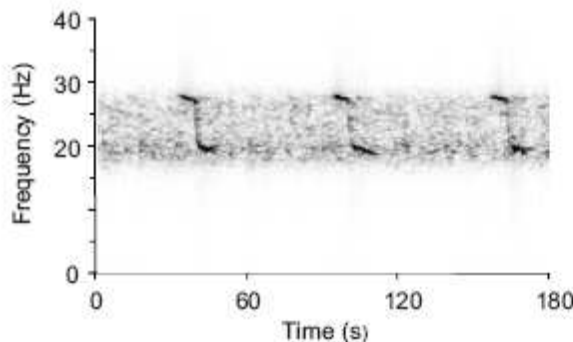


Figure 1: Spectrogram of Antarctic blue whale calls recorded off Crozet Island (Spectrogram parameters: 1024 points FFT length, 90% overlap, 250 Hz sample rate, Hanning, for a filter bandpass between 18 and 28 Hz)

The first component is a constant frequency tone centered at 28 Hz followed by a short frequency-modulated (FM) down-sweep from 28 Hz to 20 Hz ending with the third component, a slightly modulated tone (20-18 Hz). This call lasts approximately 26 seconds but sometimes only the first one or two components are present. This degree of variability in the presence of the three individual components was previously reported (Stafford et al., 2004; Rankin et al., 2005). In the dataset, the calls have variable amplitudes (from 84.3 to 117.8 dB re $1 \mu\text{Pa}$ at 1m) depending on the distance of the whales to the hydrophones and the original amplitude of their sounds (Table 1).

Pygmy blue whale calls

Since the first pygmy blue whale call description established by Ljungblad (1998), information regarding the content of these calls has been scarce. These low frequency calls were often present in the dataset. Like Antarctic blue whale calls, these signals occur in patterned sequences of long tonal calls every 90-100 seconds over the course of a few minutes or hours (Figure 2).

Each sequence is composed of two long units that repeat themselves. The first component is primarily a constant frequency tone at 35 Hz lasting 15-20 seconds. A silence

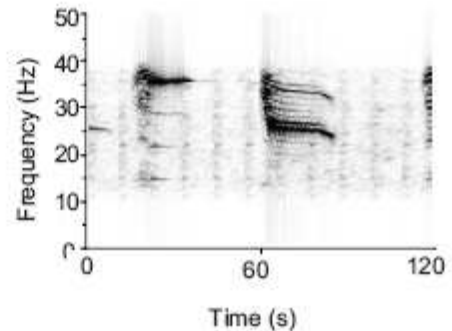


Figure 2: Spectrogram of pygmy blue whale calls “Madagascar type” recorded off Crozet Island (Spectrogram parameters: 1024 points FFT length, 90% overlap, 250 Hz sample rate, Hanning, for a filter bandpass between 12 and 40 Hz).

(approximately 20 sec) separates the two-part phrase. The second component starts with a 1-2 second 15-28 Hz FM down-sweep that ends with a long (20 sec) slightly modulated tone. Each component has strong associated harmonics. In the dataset, the signal-to-noise ratio is time-variant and could have a negative value.

2.2 Automatic detection methods

We present the specific synthetic waveforms, the process for the matched filter and our approach for choosing the detection threshold.

Definition of the templates

In both cases (BMi and BMb), we follow the approach described in Figure 3. The first step is to condition the original signal. As previously mentioned, the sample frequency is 250 Hz. We applied first a high-pass filter then a low-pass filter on the dataset. We used Butterworth filters which present a frequency maximally flat response. Since the frequency bandwidths vary for the 2 subspecies whale calls, different filters for the BMi and the BMb whales are necessary. For the BMi (resp. BMb), the order of the filter is 10 (resp. 12) and the cut-off frequencies are 13 Hz (resp. 17 Hz) and 30 Hz (resp. 50 Hz). The signal is decimated by 2.

The second step allows the extraction of the common features of the parts of the signal with high energy in this bandwidth. This first detection method is based on the energy with non-overlapping sliding windows of 24.6 sec. The noise is reduced when using the average method. Our first choice is to use the recordings with the higher signal-to-noise ratio but we obtain similar results with the complete dataset (Table 2).

The objective of the third step is to synchronize each part of the signal that contains the call. To that effect, we calculate the cross-correlation between the dataset and the averaged signal obtained at the end of Step 2. The averaged signal is used to define the model of the template. Finally both subspecies calls are modelled using Gaussian curves to obtain the equations of the templates. Step 4 will be described in the following section.

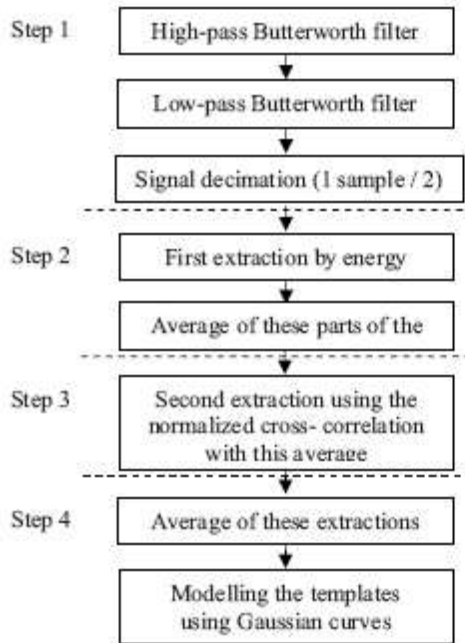


Figure 3: Algorithm for the definition of the call templates. This algorithm is applied first to the BMi calls and after to the BMb calls.

- Step 1: Conditioning the original recorded signal.
- Step 2: Search for common features
- Step 3: Time-synchronization of each part of the original signal
- Step 4: Template obtained with the Gaussian model

Definition of the Antarctic blue whale calls template

For the Antarctic blue whale (BMi) the equation of the synchronized averaged signals is modelled in 2 different parts. For part 1 of the signal, the main frequency is 28 Hz and the spectrum amplitude is modelled using a single Gaussian curve. For the second part, the main frequency is 19 Hz and the spectrum amplitude is modelled using 4 Gaussian curves (Figure 4).

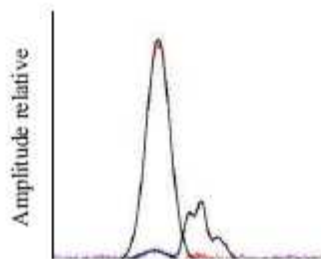


Figure 4: Modelling the spectrum with Gaussian curves

The mathematical formula for the BMi call template is:

$$\begin{aligned}
 tpl_{BMB}[k] = & \underbrace{a_0^{BM1} \times e^{-\left(\frac{k-b_0^{BM1}}{c_0^{BM1}}\right)^2}}_{PART 1} \times \sin(2\pi f_0^{BM1} k) \\
 & + \underbrace{\left(\sum_{j=0}^3 a_j^{BM2} \times e^{-\left(\frac{k-b_j^{BM2}}{c_j^{BM2}}\right)^2} \right)}_{PART 2} \times \sin(2\pi f_0^{BM2} k) \quad (1)
 \end{aligned}$$

with $k=1 \dots 3000$ and

$$f_0^{BM1} = 27.53\text{Hz}, f_0^{BM2} = 19.36\text{Hz}.$$

The parameters are:

Part 1:

$$a_0^{BM1} = 10.9, b_0^{BM1} = 2378, c_0^{BM1} = 372.4$$

Part 2:

$$a_0^{BM2} = 0.4648, b_0^{BM2} = 2288, c_0^{BM2} = 420$$

$$a_1^{BM2} = 2.659, b_1^{BM2} = 3353, c_1^{BM2} = 148.5$$

$$a_2^{BM2} = 2.265, b_2^{BM2} = 3070, c_2^{BM2} = 169.4$$

$$a_3^{BM2} = 1.081, b_3^{BM2} = 3730, c_3^{BM2} = 261.2$$

Equation 1 allows for the reconstructing of the template sample by sample. The time representation of the BMi call template is shown in Figure 5. The duration of this template is 24 seconds. To validate our template, we apply the modelling process on the 1-hour length signal having the highest signal-to-noise ratio and on the complete dataset. We obtain two similar templates. The frequencies of the 2 parts of these templates are presented in Table 2. The correlation coefficients obtained between an unknown signal and these two templates are similar because of the similitude of the two templates.

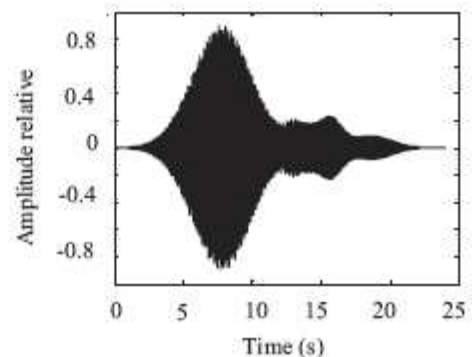


Figure 5: The template of BMi calls

Definition of the Pygmy blue whale calls template

For the Pygmy blue whale (BMB), the equation of the synchronized signals is more complex. We distinguish three

parts. The durations of part 1, part 2 and part 3 are 22.3 seconds, 20 seconds and 26.7 seconds respectively. Note that we consider the second part as a silence between part 1 and part 3. Employing the same approach as described before, we obtain the model of the spectrum using Gaussian curves (Figure 6).

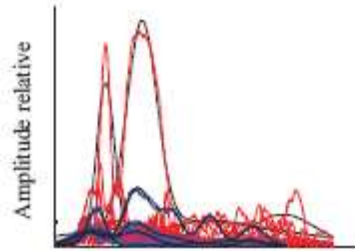


Figure 6: Modelling the spectrum using Gaussian curves

The equations of the 3 parts of the template are:

Part 1:

$$tp_{BMB1}^I[k] = \sum_{i=0}^3 \left(\sum_{j=0}^4 a_{ij}^{BMB1} \times e^{-\left(\frac{k_{i,j}^{BMB1} - f_{i,j}^{BMB1}}{c_{ij}^{BMB1}}\right)^2} \right) \sin(2\pi f_i^{BMB1} k) \quad (2)$$

With $k=1 \dots 2790$ and the frequencies are

$$f_0^{BMB1} = 35.03 \text{ Hz}, f_1^{BMB1} = 14.13 \text{ Hz}, \\ f_2^{BMB1} = 21.11 \text{ Hz}, f_3^{BMB1} = 22.72 \text{ Hz}.$$

The duration and the parameters of each Gaussian curve are respectively reported in Table 3 and Table 4.

Part 2:

$$tp_{BMB2}^I[k] = 0 \quad (3)$$

With $k = 2791 \dots 5295$;

Part 3:

$$tp_{BMB3}^I[k] = \sum_{i=0}^4 \left(\sum_{j=0}^1 a_{ij}^{BMB3} \times e^{-\left(\frac{k_{i,j}^{BMB3} - f_{i,j}^{BMB3}}{c_{ij}^{BMB3}}\right)^2} \right) \sin(2\pi f_i^{BMB3} k) \quad (4)$$

With $k = 5296 \dots 8639$ and the frequencies are

$$f_0^{BMB3} = 24.96 \text{ Hz}, f_1^{BMB3} = 26.05 \text{ Hz}, \\ f_2^{BMB3} = 23.96 \text{ Hz}, f_3^{BMB3} = 27.15 \text{ Hz}, f_4^{BMB3} = 33.0 \text{ Hz}$$

The parameters of the Gaussian curves are reported in Table 5 and Table 6. The time-representation of the complete template is given in Figure 7.

Presentation of our detector based on the matched filter

Our preliminary analysis of the CEA dataset regularly shows incomplete calls for the 2 subspecies of blue whales. For the Antarctic blue whale, this observation is well documented *Canadian Acoustics / Acoustique canadienne*

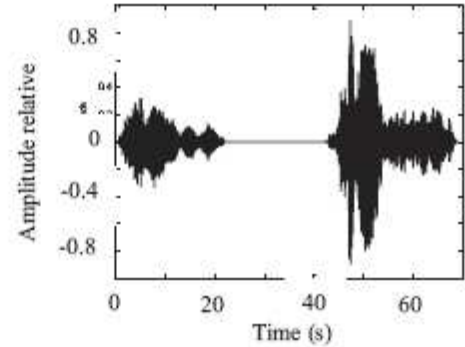


Figure 7: The template of BMB calls

(Stafford et al., 2004; Rankin et al., 2005). However, for the sounds emitted by the Pygmy blue whale, there are few references available. To our knowledge, no study has reported such incomplete calls. We define 2 new templates corresponding to these incomplete calls. These templates are deduced from the previous templates: each new template is composed of the first part of the calls only. We respectively note that BMie and BMbe are the incomplete calls for BMi and BMB.

$$tp_{BMie}^I[k] = tp_{BMi}^I[k] \quad (5)$$

$$tp_{BMbe}^I[k] = tp_{BMB}^I[k] \quad (6)$$

The algorithm is based on the cross-correlation of the dataset and these 4 templates (Figure 8):

$$R_{xy} = \frac{TF^{-1}(X \times Y^*)}{\sqrt{\sum x^2 \times \sum y^2}} \quad (7)$$

where X is the dataset spectrum and Y the template spectrum. Note that spectrums for the 4 templates are calculated before starting the detection process to reduce the computation time. The results list the occurrence of the calls for the 2 blue whale subspecies and some features are saved, like the name of the station, the time of the beginning and the end of the call (year, month, day, hour, minute and second), the signal intensity (Peak and RMS), and the value of the correlation coefficient.

3 RESULTS AND COMMENTS

3.1 Selected threshold for the cross-correlation

The objective of the signal detection method is to validate one of these 2 hypotheses (Harvey, 1992):

$$\begin{cases} H_0 : x = n \\ H_1 : x = s + n \end{cases} \quad (8)$$

with x , s , n respectively the observation, the signal that we have to detect, and the noise.

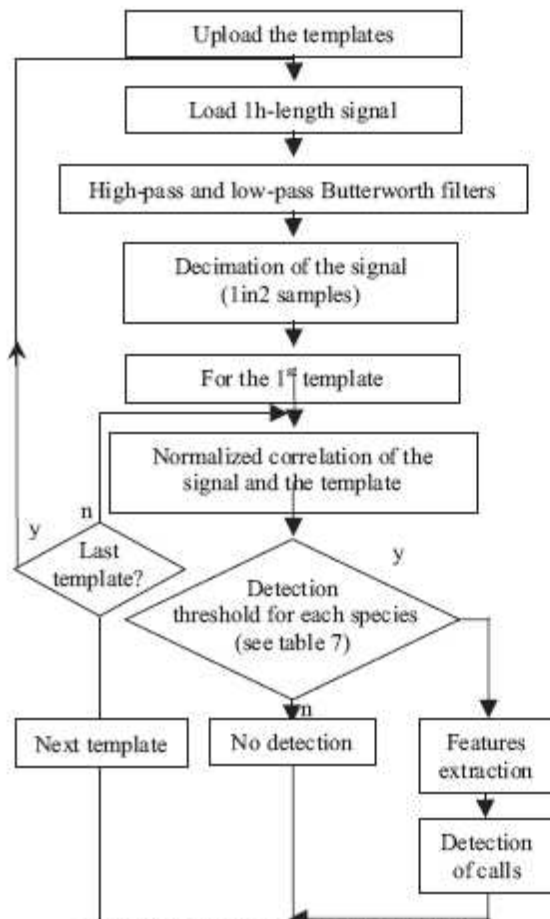


Figure 8: The automatic detection method

Whatever the detector, a threshold can be used to distinguish both hypotheses. The performance of the detector is based on the choice of the threshold. We have selected the value of the threshold from the analysis of simulated signals. These synthetic signals are composed of 100 BMi templates corrupted with a white Gaussian noise. We can assume that the white Gaussian noise properties are close to those of the underwater noise on the specific narrow bandwidth of our application ([20-40Hz]). The distribution of the templates is coherent with a real recorded blue whale signal (same rhythm). We change the signal-to-noise ratio from -30 to 25 dB (range 5 dB). The goal is to assess the value of the threshold for the efficiency of the detection method. Results of the total number of detections, correct detections and false alarms are shown in Table 7. Note that we consider the detection correct when the call is localized at ± 1 sec.

First, the number of the total detections decreases with the SNR and increases when the threshold value decreases. For Gaussian white noise only, no call was detected. Second, the rate of the correct detections is 100% for SNR higher than -15 dB, showing the resistance of this approach to noise. This rate decreases dramatically when the SNR is less than -20 dB.

The number of false alarms increases significantly when the threshold decreases. For example, when the SNR is 25 dB, the false alarm rate varies from 0 to 66 when the threshold value varies from 0.19 to 0.1. On the other hand, the false alarm rate increases proportionally as the SNR decreases and reaches a maximum value for SNR=-30 dB. Table 7 shows that when the threshold is superior to 0.17, the number of total detections and the correct detection are 100%, except when the SNR<-15 dB.

The same method was applied for BMie, BMb, and BMbe in choosing the threshold. The selected thresholds were respectively 0.17 and 0.15 for the complete and incomplete Antarctic blue whale calls. For both pygmy blue whale calls, the threshold is 0.14. Nevertheless, our margin for error allowed for an occasional missed call because the calls are produced very regularly and the main objective in this process is to decipher whether calls are present or not, and not to determine the exact number of calls. Figure 9 is plotted from data of table 7. The ROC curves are calculated with 6 different SNRs from -25 to 25 (range 10 dB). We deduce the threshold for BMi (0.17 in bold in Fig.9). Note that the signal-to-noise ratios are different in the northern and southern acoustic stations involving more false alarms in the south.

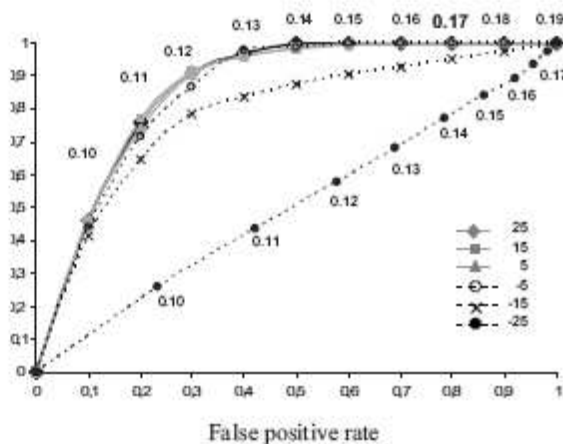


Figure 9: ROC curves from Table 7 value for BMI threshold.

3.2 Performance comparison for matched filter between templates and real referent calls

To validate the templates, we compare the results obtained from the matched filter using our templates and the matched filter using real blue whale calls. We used 4 different calls, 2 by subspecies. For each subspecies, we first extract from the dataset the call with the best shape and with a high signal-to-noise ratio. Second, we choose another call with a low signal-to-noise ratio. The correlation coefficient between the real calls with high (low) SNR and our templates gives 0.58 (0.17) for BMi and 0.35 (0.14) for BMb. For matched filters we use these 4 calls as templates and we apply the same detection thresholds. The results are given in Table 8.

The matched filter using high SNR correctly detects 47% (15%) of BMi (BMB) calls for the northern network dataset. These results decrease dramatically (to reach just less than 1%) for matched filters based on low SNR real calls. The performance is comparable for the southern network. These results show the benefit of using the templates in the matched filter.

The synthetic signals are not representative of a single individual but rather contain features common to calls of other individuals. We note too, a better resistance to the presence of the non-stationary underwater noise.

3.3 Detection of real blue whale calls

The number of calls detected for each blue whale subspecies reflects the appearance of the species, i.e. the vocal activity or the migration pattern of both subspecies (Širović et al., 2004; Stafford et al., 2004; McDonald et al. 2006). The number of blue whale calls detected in a given month (March 2004) is shown in Table 9. We choose March 2004 because the 2 subspecies are present during this month of the year and, secondly, the dataset is almost complete (98% on the 744 hours of the month).

The variation in the number of calls depends on the localization of the calling whales relative to each network and to the signal-to-noise ratio (recording conditions, ambient noise in the recording area). The correlation coefficients are proportional to the quality of the blue whale signals received at the hydrophones. Correlation coefficients vary between 0.17 and 0.72 for BMi calls and between 0.14 and 0.55 for BMB calls (Table 9). Note that the minimum values correspond to our thresholds (see §3.1).

For both whale subspecies, the number of detected calls is higher for the northern network dataset compared to the southern network dataset. This could be justified if the whales were constantly present in the north. This is true for BMB whales. But catches of Antarctic whales show that BMi whales were localized south of Crozet Island (Branch et al., 2007). The reason is that the noise level is higher on the hydrophones in the southern stations (Table 1). As seen in the previous section, our method detects fewer calls when the signal-to-noise ratio is less than -15 dB.

This presupposes that the detected calls are reliable blue whale calls. This result is reinforced by the correlation coefficient means superior to 0.2 for each whale and each network (Table 7).

3.4 Computation time

One of our objectives is to develop a method for real-time application. We attach great importance to computation time. Taking this constraint into account, we do not consider methods based on time-frequency representation. Moreover, we reduce the computation time by decimating the original signal by 2 and implementing the matched filter in the time domain. The algorithm code (Figure 8) is developed with Mathworks Matlab 7.04 and processed on Dell Pentium 4 CPU 2.4 GHz

(1 Go RAM). Note that we take into account the load of the recorded signal and the saved results. For the 2 subspecies and the 4 types of calls, the computation time is 3382.04 seconds for analysis of the entire March 2004 dataset. The ratio is approximately 1/1000.

This result allows us to consider real-time application. Computation time could be decreased by using machine code in place of Matlab. Moreover, most of the time is dedicated to the uploading and the conversion of the dataset. This is a drawback of post-processing analysis. This step is avoided for real-time application.

4 CONCLUSION

In this paper, we investigated the performance of matched filters dedicated to the automatic detection of the calls of 2 blue whale subspecies in long-term acoustic recordings in the Southwestern Indian Ocean. We presented the definition of 4 templates corresponding to the complete and incomplete calls of these whales. We provided the mathematical formulas for Antarctic blue whale and pygmy blue whale call templates. Our automatic detection is based on the cross-correlation method; we optimized the process to be time-efficient in analysing such long recordings.

This automated detection method was useful in detecting blue whale calls in the whole dataset. The limited range of variability in the Antarctic blue whale and pygmy blue whale calls allowed us to create the synthetic waveforms for both calls. Four templates were used for the matched filter. The choice of the detection threshold was based on minimizing the false alarms.

Compared to alternative automated detection methods where the performance can be modified by the length of the dataset, the acoustic characteristics of the call, the behaviour of the calling whale, the properties of the water, and the physical environment of the recording location, the pattern chosen here is efficient in detecting all Antarctic and pygmy blue whale calls present in a given recording. It is also human and dataset independent. Moreover, this automated detection method could evolve by completing the current library with other baleen whale calls.

We intend to test the method on another training set of blue whale calls recorded in the northern and eastern parts of the Indian Ocean. Our first perspective is to use certain specific features, in particular, rhythm of the whale calls, for increasing detection reliability. As an end goal, we will use this detector for extracting the time of arrival of calls on each hydrophone to localize the whales.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the French Ministry of Ecology, the Association DIRAC (France) and the Commissariat à l'Énergie Atomique. The IMS hydrophone data have been available through the CEA under contract (CEA n°169-C-BEFI & CNRS n°781513). The information released in this paper conforms to the conditions set forth in this contract. The

authors wish to thank Y. Cansi and G. Ruzié who provided access to the data used in this manuscript and L. Lieblein, A. Graff and P. Gaillard for the improvements in English usage. The authors also appreciate the valuable comments of anonymous reviewer which helped to improve the manuscript. This work represents a portion of F.S.'s dissertation.

REFERENCES

- Abdulla, W.H., D. Chow and G. Sin. 2003. Cross-words reference template for DTW-based speech recognition systems. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region (TENCON). 4: 1576 – 1579.
- Branch T. A., Stafford K. M., Palacios D. M., Allison C., Bannister J. L., Burton C. L. K., Cabrea E., Carlson C. A., Vernazzani B. G., Gill P. C., Huckle Gaete R., Jenner K. C. S., Jenner M. N. M., Matsuoka K., Mikhalev Y. A., Miyashita T., Morrice M. G., Nishiwaki S., Sturrock V. J., Tormosov D., Anderson R. C., Baker A. N., Best P. B., Borsa P., Brownell R. L., Childerhouse S., Findlay K. P., Gerrodette T., Ilangakoon A. D., Joergensen M., Kahn B., Ljungblad D. K., Maughan B., Mccauley R. D., Mckay S., Norris T. F., Whale O., Rankin S., Samaran F., Thiele D., Van Waerebeek K., Warneke R. M. 2007. Past and present distribution of blue whale in the Southern Hemisphere and Northern Indian Ocean. *Mam. Rev.* 37: 116-175.
- Clark, C.W. 1990. Acoustic behavior of mysticete whales, In: Thomas, J., Kastelein, R. (Eds.), *Sensory Abilities of Cetaceans*. Plenum Press, New York, 571-583.
- Clark, C.W., and D. K. Mellinger, 1994. Application of Navy IUSS for whale research. *J. Acoust. Soc. Am.* 96: 3315 (A).
- Costa, D.P. 1993. The secret life of marine mammals. Novel tools for studying their behaviour and biology at sea. *Oceanography*, 6: 120-128.
- Gagnon, G.J. and C.W. Clark. 1993. The use of U.S. Navy IUSS passive sonar to monitor the movements of blue whales. *Proc. Tenth Biennial Conf. Biol. Mar Mamm.* P.50.
- Gillespie, D. 2004. Detection and classification of right whale calls using an "edge" detector operating on a smoothed spectrogram. *Canad. Acoust.* 32: 39-47.
- Harvey, L.O.Jr. 1992. The critical operating characteristic and the evaluation of expert judgment. *Organizational Behavior & Human Decision Processes*. 53(2): 229-251.
- Ljungblad, D., C.W. Clark and H. Shimada. 1998. A comparison of sounds attributed to pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) recorded south of the Madagascar Plateau and those attributed to 'true' blue whales (*Balaenoptera musculus*) recorded off Antarctica. *Rep. Int. Whal. Commn.* 49: 439-442.
- McDonald, M.A., S.L. Mesnick, and J.A. Hildebrand., 2006. Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: using song to identify populations. *J. Cetacean Res. Manage.* 8(1): 55-65.
- Mellinger, D., and C.W. Clark. 2000. Recognizing transient low frequency whale sounds by spectrogram correlation. *J. Acoust. Soc. Am.* 107: 3518-3529.
- Mellinger, D., and C.W. Clark. 2003. Blue Whale (*Balaenoptera musculus*) sounds from the North Atlantic. *J. Acoust. Soc. Am.* 114(2): 1108-1119.
- Mellinger, D.K. 2004. A comparison of methods for detecting right whale calls. *Canad. Acoust.* 32: 55-65.
- Munger, L., D. Mellinger, S. Wiggins, S. Moore and J. Hildebrand. 2005. Performance of spectrogram cross-correlation in detecting right whale calls in long-term recordings from the bering sea. *Canad. Acoust.* 33(2): 25-34.
- 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. Am.* 115(4):1832-1843.
- Nishimura C.E. and D.M. Conlon. 1994. IUSS Dual Use : Monitoring Whales and Earthquakes Using SOSUS. *Mar. Tech. Sci. J.* 27(4): 13-21.
- Rankin S., D. Ljungblad, C. Clark and H. Kato. 2005. Vocalizations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 IWC/SOWER circumpolar cruises, Area V, Antarctica. *J. Cetacean Res. Manage.* 7(1):13-20.
- Rebull, O.G., J.D. Cusi, M.R. Fernández and J.G. Muset. 2006. Tracking fin whale calls offshore the Galicia Margin, North East Atlantic Ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* 120: 2077-2085.
- Roueff A., P-F. Piserchia, J-L. Plantet, Y. Cansi and G. Ruzié. 2004. Noise characterization at the international station of Crozet Islands (HO4). *J. Acoust. Soc. Am.* 116: 2649.
- Silverman, H.F. and Morgan, D.P. 1990. The application of dynamic programming to connected speech recognition. *IEEE ASSP Magazine*, 7-25
- Širović, A., J.A. Hildebrand, S.M. Wiggins, M.A. McDonald, S.E. Moore and D. Thiele. 2004. Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula. *Deep Sea Res. II* 51 : 2327-2344.
- Širović, A., J.A. Hildebrand and S.M. Wiggins. 2007. Blue and fin whale call source levels and propagation range in the Southern Ocean *J. Acoust. Soc. Am.* 122: 1208-1215.
- Stafford K.M., L.N. Sharon and C.G. Fox. 2001. Geographic and seasonal variation of blue whale calls in the North Pacific. *J. Cetacean Res. Manage.* 3(1): 65-76.
- Stafford K.M. 2003. Two types of blue whale calls recorded in the Gulf of Alaska. *Mar. Mamm. Sci.* 19 (4): 682-693.
- Stafford K.M., D.R. Bohnenstiehl, M. Tolstoy, E. Chapp, D.K. Mellinger and S.E. Moore. 2004. Antarctic-type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans. *Deep Sea Res. I* 51: 1337-1346.
- Stafford, K.M., D.W.R. Bohnenstiehl, E. Chapp. And M.

Tolstoy. 2005. Location, location, location: acoustic evidence suggests three geographic stocks of "Pygmy" Blue Whales in the Indian Ocean. Proceeding of the 16th Conference on the Biology of Marine Mammals. San Diego, December 12-16, 2005.

Stafford K.M., D.K. Mellinger, S.E. Moore and C.G. Fox. 2007. Seasonal variability and detection range modelling of baleen whale calls in the Gulf of Alaska, 1999-2002. J.

Acoust. Soc. Am. 122(6):3378-3390.

Trentin, E. and M. Gori. 2003. Robust combination of neural networks and hidden Markov models for speech recognition. IEEE Transactions on Neural Networks, 14(6): 1519 -1531.

Watkins, W.A. 1981. Activities and underwater sounds of fin whales. Scientific reports of the Whales Research Institute, 33: 83-117.

	Northern network			Southern network		
	Ambient noise level	BMi	BMb	Ambient noise level	BMi	BMb
Min	85.9(97.7)	84.3(94.6)	89.3(101.5)	100.1(113.8)	99.8(111.6)	104.4(116.6)
Max	106.2(121.0)	107.1(132.0)	119.4(133.2)	133.4(145.3)	117.8(137.6)	120.0(139.9)
Mean	92.6(104.5)	91.1(103.9)	97.2(111.3)	109.5(120.7)	103.9(115.4)	109.3(122.9)
SD	2.5(3.2)	3.2(4.2)	3.4(4.0)	6.4(6.6)	1.3(1.9)	3.2(3.9)

Table 1: Acoustic intensities (rms (peak) re 1µPa at 1m) (calculated on 1 month)

	One hour recording	All dataset
1 st frequency (Hz)	27.57	27.53
2 nd frequency (Hz)	19.35	19.36

Table 2: Difference between the templates modelling from 1-hour recordings and from the whole dataset.

	k_{ij}^{BMB1}			
	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
$j=0$	1...679	1...691	1...679	1...2790
$j=1$	68...1572	692...1686	680...1464	0
$j=2$	1573...2035	692...1686	1465...1989	0
$J=3$	1573...2035	1687...2790	1990...2790	0
$j=4$	2036...2790	0	0	0

Table 3: Duration of each Gaussian curve (0 for $k \neq k_{ij}^{BMB1}$) for the part1

	a_{ij}^{BMB1}				b_{ij}^{BMB1}				c_{ij}^{BMB1}			
	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
$j=0$	2.944	3.153	3.309	7.63	385.2	398.8	464.2	484.8	211.6	270.7	198.9	147.8
$j=1$	12.02	4.215	3.001	0	956.8	920.9	946	0	210.5	189.7	268.8	0
$j=2$	7.359	2.08	0.7191	0	1335	1251	1706	0	189.3	324	218.3	0
$j=3$	6.306	1.148	1.262	0	1790	2135	2272	0	203.1	404.6	169	0
$j=4$	3.97	0	0	0	2295	0	0	0	203.1	0	0	0

Table 4: Parameters of the Gaussian curves for the BMB call part 1

	k_{ij}^{BMB3}				
	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
$j=0$	5296...8639	5296...6173	5296...7090	5296...6692	5296...5745
$j=1$	5296...8639	6174...8639	7091...8639	6693...8639	5746...8639

Table 5: Duration of each Gaussian curve (0 for $k \neq k_{ij}^{BMB3}$) for the part 3

	a_{ij}^{BMB}					b_{ij}^{BMB}					c_{ij}^{BMB}				
	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
$j=0$	5.15	33.1	4.2	5.21	5.24	1537	590	940.9	714	338.3	1591	144.7	694.7	527.3	78.5
$j=1$	42.5	5.25	6.54	1.53	1.76	1010	1840	2640	2189	1289	242.8	949	516.2	757.9	917.1

Table 6: Parameters of the Gaussians for the BMB call part 3

	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14
25	166(100,66)	143(100,43)	121(100,21)	110(100,10)	103(100,3)
20	167(100,67)	135(100,35)	121(100,21)	108(100,8)	101(100,1)
15	171(100,71)	148(100,48)	122(100,22)	107(100,7)	104(100,4)
10	169(100,69)	144(100,44)	121(100,21)	110(100,10)	104(100,4)
5	179(100,79)	146(100,46)	128(100,28)	109(100,9)	104(100,4)
0	167(100,67)	137(100,37)	122(100,22)	110(100,10)	105(100,5)
-5	156(100,56)	135(100,35)	119(100,19)	109(100,9)	105(100,5)
-10	175(100,75)	145(100,45)	127(100,27)	109(100,9)	105(100,5)
-15	165(96,69)	135(96,39)	119(96,23)	105(96,9)	102(96,6)
-20	170(87,83)	146(87,59)	128(87,41)	117(87,30)	112(87,25)
-25	157(72,85)	131(72,59)	117(70,47)	102(68,34)	96(65,31)
-30	155(27,133)	119(22,97)	81(18,63)	50(13,37)	30(11,19)

(a)

	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19
25	101(100,1)	101(100,1)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)
20	101(100,1)	101(100,1)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)
15	102(100,2)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)
10	103(100,3)	101(100,1)	101(100,1)	100(100,0)	100(100,0)
5	102(100,2)	101(100,1)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)
0	102(100,2)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)
-5	103(100,3)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)
-10	101(100,1)	101(100,1)	100(100,0)	100(100,0)	100(100,0)
-15	101(96,5)	100(96,4)	100(96,4)	100(96,4)	100(96,4)
-20	105(87,18)	101(87,14)	101(87,14)	100(87,13)	99(86,13)
-25	84(62,22)	67(50,17)	50(35,15)	38(25,13)	25(17,8)
-30	15(9,6)	11(7,4)	5(4,1)	3(3,0)	2(2,0)

(b)

Table 7: Evaluation of the detection threshold value (lines show the threshold values and columns show SNR (dB)).
Number of total detections (correct detections, false alarms)

Matched filter used	Northern network		Southern network	
	BMi	BMb	BMi	BMb
Template	6313	7 495	2856	717
Real call with high SNR	2971	1116	2082	93
Real call with low SNR	148	130	461	28

Table 8: Number of calls detected by using template and real call in various SNR for matched filter (calculated on 1 month)

	Northern network		Southern network	
	BMI	BMB	BMI	BMB
Number of calls detected	6313	7 495	2856	717
Min	0.17	0.14	0.17	0.14
Max	0.72	0.55	0.49	0.45
Mean	0.23	0.23	0.19	0.20
SD	0.07	0.07	0.02	0.06

Table 9: Number of calls detected and correlation coefficient (calculated on 1 month)

Why Purchase from a Single Manufacturer... ...When You Can Have the Best in the Industry From a Single Supplier?

Scantek is the company to call when you want the most comprehensive assortment of acoustical and vibration equipment. As a major distributor of the industry's finest instrumentation, we have the right equipment at the right price, saving you time and money. We are also your source for instrument rental, loaner equipment, product service, technical support, consulting, and precision calibration services.

Scantek delivers more than just equipment. Since 1985, we have been providing solutions to today's complex noise and vibration problems with unlimited technical support by acoustical engineers that understand the complex measurement industry.

Suppliers of Instruments and Software:

- Norsonic
- RION
- CESVA
- DataKustik (Cadna & Bastian)
- KCF Technologies
- BSWA
- Castle Group
- Metra
- RTA Technologies
- G.R.A.S.

Scantek

Sound and Vibration
Instrumentation and Engineering

Applications:

- Building Acoustics & Vibration
- Occupational Noise and Vibration
- Environmental and Community Noise Measurement
- Sound Power Testing
- Calibration
- Acoustical Laboratory Testing
- Loudspeaker Characterization
- Transportation Noise
- Mechanical Systems (HVAC) Acoustics

Scantek, Inc. • 7060 Oakland Mills Road • Suite L • Columbia, MD 21046 • 800-224-3813 • www.scantekinc.com

ANNEXE 2

SAMARAN F., RUZIÉ G., MOTSCH J.-F., ADAM O. & GUINET C. 2007.

**Blue whale calls recorded on autonomous instruments in the Southwestern
Indian Ocean.**

**Présenté au Comité scientifique de la Commission Baleinière International
CBI, Mai 2007, Anchorage, Etats-Unis.**

Blue whale calls recorded on autonomous instruments in the Southwestern Indian Ocean.

FLORE SAMARAN¹, GÉRARD RUZIÉ², JEAN FRANCOIS MOTSCH³, OLIVIER ADAM³
AND CHRISTOPHE GUINET¹,

1. Centre d'Etudes Biologiques de Chizé 79360 Villiers en Bois, France
2. Commissariat à l'Énergie Atomique, centre DAM-Ile de France, Bruyères-Le-Châtel, France
3. LiSSi-iSnS, University Paris 12, France

Contact e-mail : samaran@cebc.cnrs.fr

ABSTRACT

Blue whale calls were detected from data recorded over one year (2003/2004) from six hydrophones from the International Monitoring System (IMS) deployed offshore off Possession Island, Crozet Archipelago in the Indian Ocean. The low frequency (< 100 Hz) sea noise spectrum was dominated by a band of sound at 18-35 Hz corresponding to abundant balenopteridae whale vocalisations which exhibited a variation in intensity over the record period. Among the call detected, the Antarctic blue whale (*Balaenoptera musculus intermedia*) and the Pygmy blue whale "Madagascar-type" (*B. m. brevicauda*) were clearly identified. An automatic call detection method was developed to count both call types to assess the seasonal presence of call production. The variation of call number over one year revealed different patterns of whale occurrence. Antarctic blue whale calls were the most commonly recorded and their year round detection suggests an annual presence of this species in subantarctic-antarctic area. Pygmy blue whale calls exhibited a strong seasonal pattern with no calls during the winter. These results suggest either an interruption in vocal activity or that whales leave sub-Antarctic waters to go north.

INTRODUCTION

During the 20th century, many species of large whale such as the blue (*Balaenoptera musculus*) and the fin whales (*B. physalus*) were severely depleted by commercial harvesting in the Southern Ocean (Clapham and Baker, 2001). From historical records, approximately 99,95 % of blue whales were removed from the Southern Ocean (Branch and Butterworth, 2001a). Their current population numbers and distribution are unknown and we are lacking information on large whale abundance, ecology and seasonal migration in Antarctic waters (Branch *et al.*, 2004, Sirovic *et al.*, 2004, Stafford *et al.*, 2004). Recent research efforts aimed at improving our knowledge on the status of this endangered species in different Antarctic regions (Thiele *et al.*, 2004). Visual surveys were conducted every year in summer along the routes of the vessel *Marion-Dufresne* between La Reunion Island and the French research stations of the Southern Indian Ocean (Amsterdam, St Paul, Crozet and Kerguelen archipelagos). Nevertheless, no study was conducted in the Southwestern Indian Ocean through a whole year cycle mainly because weather and sea conditions do not allow visual surveys during winter months. In this context, the field work in the Southern Ocean represents considerable and expensive logistical constraints and the need for employing alternative methods to study whale populations is obvious.

In this project we are using a non-invasive acoustic approach to assess the current status of blue whales in this area. Large baleen whales, such as the blue, the fin and the humpback whales are known to produce low frequency, species-specific calls. By making continuous

acoustic recordings, it is possible to obtain long-term records of calling animals in an area, and also to provide valuable informations on their seasonality and distribution patterns (McDonald *et al.*, 2007). Here, as part of a collaboration between the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) and the CEBC-CNRS, with the financial support of the French Ministry of the Environment, we analysed the first year-long recording of acoustic signals in the Southwestern Indian Ocean. Through these various low-frequency calls, this method should provide valuable informations as the call characteristics, the annual cycle of occurrence and distribution patterns of the blue whales in the Southwestern Indian Ocean

METHODS

Calls were detected from data recorded between May 2003 and April 2004 by hydrophones of the International Monitoring System (IMS) deployed in support of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) and designed to check the natural and artificial activity in the oceans (Roueff *et al.*, 2004). These IMS data were made available in the framework of a broader South Indian Ocean biological noise identification and characterization project in order to discriminate biological noise of records for the CEA. Data were analysed from two stations consisting of a set of three hydrophones called Underwater Monitoring Unit (UMU). These were deployed in a triangular configuration (triads) with approximately 1.5km spacing between the instruments, which were located in the north (46°09S, 51°48E; here called Crozet north) and the south (46°51S, 51°53 E; here called Crozet south) of Possession Island (Crozet archipelagos in the French Indian Ocean Territory) in the Indian Ocean (Fig. 1). The IMS stations were moored to the seafloor and floated in the sound channel axis (SOFAR) at a depth at approximately 400 m, where the acoustic energy from sound could travel over long distances. Data were transmitted via cable to shore and were available at the CEA/ DIF / DASE - Bruyères-le-Châtel FRANCE. The station recorded continuously with a sample frequency of 250Hz with a dynamic on 24 bits (S/N: 126.5dB), and had a flat (± 3 dB) frequency response from 1.2-102.5Hz. At this sample rate, the instrument is capable of recording the low frequency calls of the blue and the fin whales but is too low to record sounds from the humpback whale, the minke whale and toothed whales such as the sperm or the killer whale.

The determination of the calling whale species was based on literature comparison by simple recognition on spectrograms. Two types of calls were recognized the Antarctic blue whale call (*B. m. intermedia* - *Bmi*) and the Pygmy blue whale call (*B. m. breviceauda* - *Bmb*) "Madagascar-type". An automatic call detection method was developed to locate and to count both blue whale call types in the data set. The detection procedure was based on the matched filter technique. Templates were developed for each call and a detection threshold at which positive detection starts was selected. At the time of writing this document, data were analysed only from one hydrophone in the north triad and further processing is required to limit the number of false detections. Nevertheless, here it has been assumed that the majority of call detections were real. A first monthly proportion of the number of hours with positive detection for both calls was determined by dividing the number of hours during which a call type was detected in a month by the total number of hours of data available for that month. These monthly proportions were plotted, providing preliminary results of the seasonal occurrence of blue whale calls.

RESULTS

In this long-term acoustic recording, the low frequency (< 100 Hz) sea noise spectrum was dominated by a band of sound at 18-35 Hz corresponding to abundant balenopteridae whale vocalisations which exhibited a variation in intensity over the record period. The preliminary

results have provided a clear indication that two sub - species of blue whale occur in the region: the Antarctic blue whale and the Pygmy blue whale.

Description of call types

Antarctic blue whale calls

“Antarctic-type” blue whale calls were the most commonly recorded and detected in our dataset. This call type was similar to vocalisations recorded in the presence of the Antarctic blue whale by Ljungblad *et al.* (1998) and similar to descriptions and spectrograms displayed in other recent studies conducted near the Western Antarctic Peninsula (Sirovic *et al.*, 2004); in Eastern Antarctica (McKay *et al.*, 2005); and around the Antarctic continent during IWC-Southern Ocean Whale Ecosystem Research cruises (in IWC area V, Rankin *et al.*, 2005).

These vocalisations included long-duration 28 Hz tonal calls composed of one, 2 or 3 units lasted approximately 26s and repeated sometimes in patterned sequences every 40-50s during few minutes or hours. When the call occurred with more of one unit, the first component was followed by a short frequency-modulated downsweep from 28Hz to 20Hz ending with or without the third component, a slightly modulated tone (20-18Hz) (Fig 2). This degree of variability in the presence of the three individual components was previously reported (Stafford *et al.*, 2004; Rankin *et al.*, 2005).

Pygmy blue whale calls

Three distinct call types have been previously attributed to the pygmy blue whale in the Indian Ocean from Sri Lanka (Alling *et al.*, 1991), Madagascar (Ljungblad *et al.*, 1998) and Western Australia (Mc Cauley *et al.*, 2001). Here, we recorded the “Madagascar-type”, one of the least known acoustically of the balenopteridae. Like Antarctic blue whale call, these signals occur in patterned sequence of long tonal call every 90-100s during few minutes or hours. Each sequence is composed of a repeated two long distinct components. The first component is primarily a constant frequency tone at 35Hz lasting 15-20s. A silent (approximately 20s) separate the two-part phrase. The second components start with a 1-2s 15-28Hz FM downsweep that ends with a long (20s) slightly modulated tone. Each component has strong associated harmonics (Fig 3).

Occurrence of calls

Approximately 6,486h of data were examined from only one hydrophone in north triad. Antarctic blue whale calls (with 3-units) were detected during 4,928h. These calls were detected over 50% of the time all year round, almost all days during May, June and July and over 70% of the time between May and November with a slightly diminution in September (Fig 4). Occurrence was lower during summer months (December, January and February).

Pygmy blue whale calls were less recorded throughout the year (1,816h with calls), but presented a clear seasonal signature in call receptions. The proportion of calls increased from January to April, decreased to very low levels in July and were almost absent from July to December (Fig 5). These calls were detected over 60% of the time during February to April.

DISCUSSION

Antarctic blue whale calls and pygmy blue whale calls “Madagascar type” were recorded from hydrophones deployed in Southwestern Antarctica. Nevertheless further analysis is required to verify the number of calls detected by the automated detection process. The preliminary results showed that Antarctic-type blue whale calls were the most commonly recorded and their year round detection suggests an annual presence in subantarctic-antarctic area with a peak calling activity during the austral winter, suggesting that Antarctic blue whales remained in high latitudes all year long and likely close to the detection range capabilities of the

system during the southern winter. This whale species is generally encountered along the ice edge during summer feeding on krill swarms. Our results suggest that they may move northward in winter closer to Crozet when the sea-ice extent is at a maximum and move southward toward the Antarctic continent as sea-ice retreats. This calls has also been recorded at tropical latitudes during winter (Stafford *et al.*, 2004) giving a clue of migratory destination and patterns.

The annual pattern of pygmy blue whale calls exhibited a strong seasonality. Calls were mostly detected from January to May and were not heard between July and December. This result suggests either an interruption in the vocal activity of the species or more likely that these animals are leaving sub-Antarctic waters to go northward, beyond the detection range of our system, following the more typical pattern of migration from the higher-latitude areas in the winter to the lower-latitude areas in the summer even if the migration patterns of these blue whale sub-species are currently poorly known (Branch *et al.*, 2007). Few acoustic studies are available for the Pygmy blue whale “Madagascar type”. Previously, these calls were heard two times in December at higher latitude (south of Madagascar, 32°S, Ljungblad *et al.*, 1998) that supports our hypothesis. The lack of sounds attributed to the other types of pygmy blue whales (Sri Lanka and Australia) in our records tends to confirm the recent hypothesis that pygmy blue whale may have separate population in Indian Ocean (Stafford *et al.*, 2005; McDonald *et al.*, 2006 and Branch *et al.*, 2007).

The potential annual movements of the blue whales in the Southwestern Ocean are currently investigated by using acoustic triangulation techniques to assess localization of calling individuals of both subspecies. For each north and south triad, we used the arrival-time-delay of calls to determine the bearing of the sound source. To estimate the range between our system and the vocalising animal we intend to complete this method by using the received intensity of the call combined to a complex model for transmission loss adapted to the Indian Ocean. But for the moment, our work presents the evidence that we can use the characteristics of vocalizations to determine the seasonal presence or movement of the blue whale and use differences in blue whale song to identify and distinguish population or species otherwise extremely difficult to discern in the field (McDonald *et al.*, 2006).

REFERENCES

- Alling, A., Dorsey, E.M. and Gordon, J.C.D. (1991) Blue whale *Balaenoptera musculus* off the northeast coast of Sri Lanka: Distribution, feeding and individual identification. *UNEP Mar Mammal Tech Rep* **3** : 247 – 258.
- Branch, T.A. and Butterworth D.S. (2001a) Estimates of abundance south of 60°S for cetacean species sighted frequently on the 1978/1979 to 1997/1998 IWC/IRDC-SOWER sighting surveys. *Journal of Cetacean Research and Management* **3** : 251-270.
- Branch, T.A. , Matsuoka, K. and Miyashita, T. (2004) Evidence for increases in Antarctic blue whales based on Bayesian modelling. *Mar Mam Sci* **20**: 726-754.
- Branch, T.A., Stafford, K.M., Palacios, D.M et al. (2007) Past and present distribution of blue whale in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean. *Mammal review* (accepted).
- Clapham, P.J. and Baker, S.C. (2001) How many whales were killed in the Southern Hemisphere in the 20th century? *IWC Paper*, SC/53/O14.
- Ljungblad, D., Clark, C.W. and Shimada, H. (1998) A comparison of sounds attributed to pigmy blue whales recorded south of the Madagascar plateau and those attributed to “true” blue whale recorded off Antarctica. *Report of the IWC*. **48**: 439 - 442.
- McCauley, R. D., K. Jenner, J.L. Bannister, C.L.K. Burton, D.H. Cato and Duncan, A. (2001) Blue whale calling in the Rottneest trench – 2000, Western Australia Report CMST R2001 – 6, project – WA Museum/CMST 241. 56pp.
- McKay, S., Širović, A., and Thiele, D. (2005) Preliminary results of blue whale (*Balaenoptera musculus*) call detection in Eastern Antarctica. *IWC paper*, SC/57/SH4.

- McDonald, M.A., Mesnick, S.L. and Hildebrand, J.A. (2006) Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: using song to identify populations. *Journal of Cetacean Research and Management* **8(1)**: 55-65.
- Rankin, S., Ljungblad, D., Clark, C. and Kato, H. (2005) Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 IWC/SOWER circumpolar cruises, Area V, Antarctica. *Journal of Cetacean Research and Management* **7 (1)**: 13-20.
- Roueff, A., Piserchia, P.-F., Plantet, J.-L., Cansi, Y. and Ruzié, G. (2004) Noise characterization at the international station of Crozet Islands (HO4). *Journal of Acoustical Society of America* **116** : 2649.
- Širović, A., Hildebrand, J.A., Wiggins, S.M., McDonald, M.A., Moore, S.E. and Thiele, D. (2004) Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research II* **51 (17-19)** : 2327-2344.
- Stafford, K.M., Bohnenstiehl D.W.R., Tolstoy, M., Chapp, E., Mellinger, D.K. and Moore, S.E. (2004) Antarctic-type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans. *Deep Sea Research I* **51 (10)** :1337-1346.
- Stafford, K.M., Bohnenstiehl D.W.R., Chapp, E., and Tolstoy, M. (2005) Location, location, location: acoustic evidence suggests three geographic stocks of “Pygmy” Blue Whales in the Indian Ocean. Proceeding of the 16th Conference on the Biology of Marine Mammals. San Diego, December 12-16, 2005.
- Thiele, D., Asmus, K., Dolman, S., Falkenberg, C.D., Glasgow, D., Hodda, P., McDonald, M., McKay, D., Oleson, E., Širović, Soutter, A., Moore, S. and Hildebrand, J. (2004) International Whaling Commission – Southern Ocean collaboration cruise report 2003-2004. *IWC Paper*, SC/56/E24.

Fig 1. The two hydroacoustics stations of hydrophones of the International Monitoring System (IMS) location.

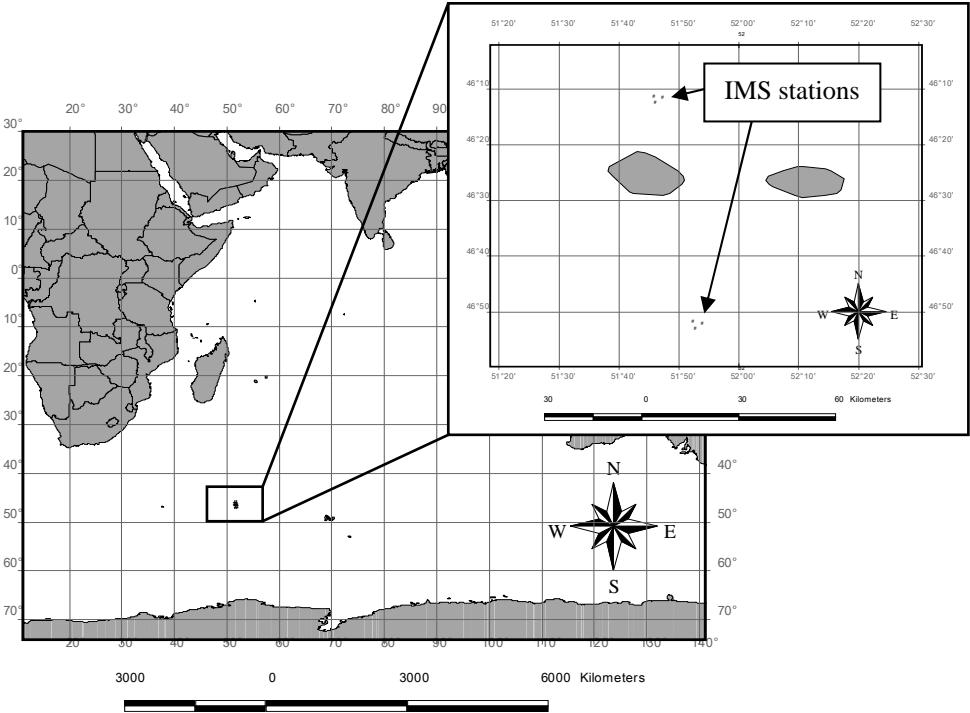


Fig 2. Spectrogram of Antarctic blue whale calls detected on one hydrophone at Crozet north. (Spectrogram parameters: 1024 points FFT length, 90% overlap, 250 Hz sample rate, Hanning, for a filter bandpass between 18 and 28 Hz)

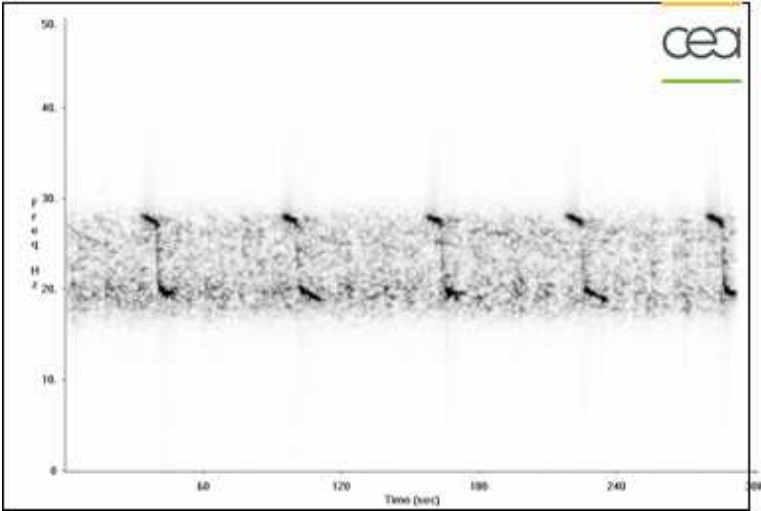


Fig 3. Spectrogram of pygmy blue whale calls “Madagascar type” detected one hydrophone at Crozet north. (Spectrogram parameters: 1024 points FFT length, 90% overlap, 250 Hz sample rate, Hanning, for a filter bandpass between 12 and 40 Hz)

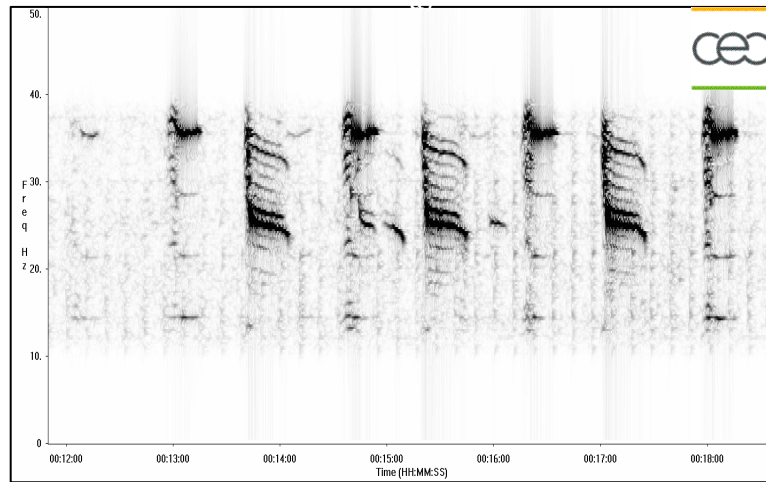


Fig 4. Proportions of hours available by month during which Antarctic blue whale calls with 3-units were detected.

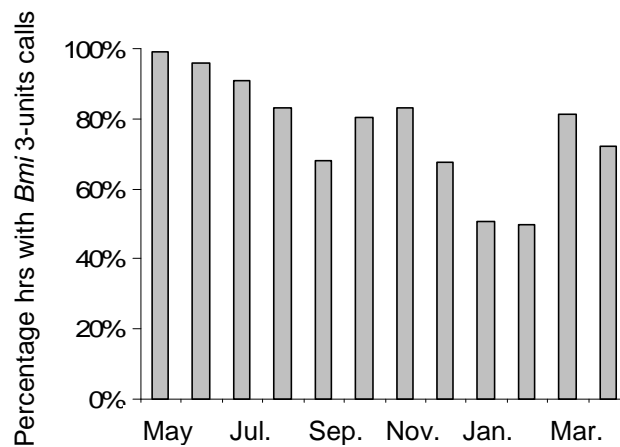
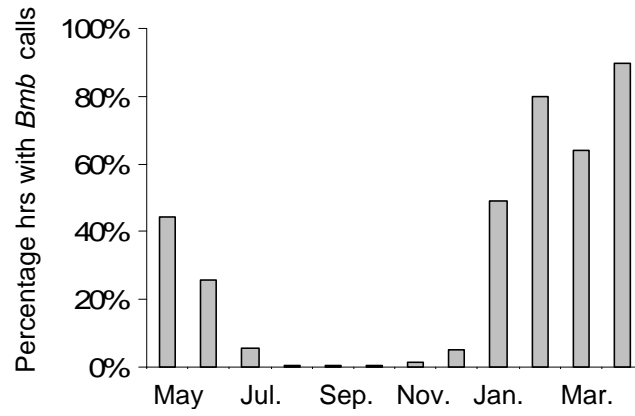


Fig 5. Proportions of hours available by month during which Pygmy blue whale calls Madagascar type were detected.



ANNEXE 3

SAMARAN F., CANSI Y., RUZIÉ G. & GUINET C. 2006

**Preliminary results of large whale calls recorded at low latitudes in the
southwestern Indian Ocean.**

**Commission Baleinière Internationale SC/58/O2 présenté au Comité
scientifique de la CBI, Mai 2006, St. Kitts and Nevis, West Indies.**

Preliminary results of large whale calls recorded at low latitudes in the southwestern Indian Ocean

FLORE SAMARAN¹, YVES CANSI², GÉRARD RUZIÉ² AND CHRISTOPHE GUINET¹

1. Centre d'Études Biologiques de Chizé, CNRS, Villiers-en-Bois, France
2. Commissariat à l'Énergie Atomique, centre DAM-Ile de France, Bruyères-Le-Châtel.

ABSTRACT

Large whale calls were detected from data recorded over one year (2003/2004) on a hydrophone of the International Monitoring System (IMS) deployed offshore off Possession Island, Crozet Archipelago in the Indian Ocean. The low frequency (< 100 Hz) sea noise spectrum was dominated by a band of sound at 18-35 Hz which intensity varies over one year. This band mainly contained abundant calls assimilated to baleen whale calls. Among the call detected, Antarctic blue whale (*Balaenoptera musculus intermedia*), Pygmy blue whale (*B. m. brevicauda*) and Fin whale (*B. physalus*) were positively identified and were the most frequently recorded.

INTRODUCTION

During the 20th century, many species of large whale such as blue (*Balaenoptera musculus*) and fin whales (*B. physalus*) were severely depleted by commercial harvest in the Southern Ocean (Clapham and Baker, 2001). Given the historical records, approximately 99% at 95% of respectively blue and fin whales were removed from the Southern Ocean (Clapham and Baker, 2001) and current research underscore the lack of information on large whale abundance, ecology and seasonal migrations in Antarctic waters (Sirovic *et al.*, 2004, Stafford *et al.*, 2004).

Research efforts to document the status of this endangered species in different Antarctic regions have been recently conducted (Thiele *et al.*, 2004). Visual surveys were conducted every year in summer along the routes of the vessel *Marion-Dufresne* between La Reunion Island and the French research stations of the Southern Indian Ocean (Amsterdam, St Paul, Crozet and Kerguelen archipelagos). Nevertheless, no study was conducted in southwestern Indian Ocean thorough a whole year mainly because weather and sea conditions do not allow visual surveys during winter months. In this context, the field work in the Southern Ocean represents considerable and expensive logistical constraints and the need for employing alternative methods to study whale populations is obvious.

Passive acoustic survey is an important tool in surveying remote areas of the sea that are difficult to investigate by more traditional techniques (Nieukirk *et al.*, 2004). Once the correspondence between the whale species and its call is established, acoustics monitoring is a powerful means of identifying the species present (Stafford *et al.*, 1999) and determining patterns of seasonal distribution and relative abundance (Stafford *et al.*, 1999, 2001).

The aim of this work was the use of a low frequency hydrophone arrays deployed at Crozet Archipelago to provide the first long term recording of acoustic signals in the southwestern Indian Ocean. The status of large whales in the Indian Ocean is unclear and knowledge about seasonal migration is limited (Stafford *et al.*, 2004). This method should provide valuable information as the calls characteristics of whales in the southwestern Indian Ocean and the seasonal distribution pattern of several whales species through these various low-frequency calls over one year.

METHODS

The data set (May 2003 – April 2004) was recorded by hydrophone of the International Monitoring System (IMS) deployed in support of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) and designed to check the natural and artificial activity in the oceans (Roueff *et al.*, 2004). The IMS data used in this study were made available in support of a broader project of South Indian Ocean biological noise identification and characterization in order to discriminate biological noise of records, under contract from the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA). In southwestern Indian Ocean, IMS Station consisted of a set of three hydrophones called Underwater Monitoring Unit (UMU) deployed in a triangular configuration (triads) with approximately 1.5km spacing between instruments in north and south of Crozet archipelagos (French Indian Ocean Territory) (Fig. 1). Data were analysed from only one UMU in north triad (46, 16436°S, 51, 80246°E) here called Crozet North. This instrument was moored to the seafloor, floated at a depth near the sound channel axis. Data were transmitted via cable to shore and were available at the Commissariat à l'Énergie Atomique DIF / DASE - Bruyères-le-Châtel FRANCE. The Crozet North station recorded continuously with a sample frequency of 250Hz, with a dynamic on 24 bits (S/N: 126.5dB), and had a flat (± 3 dB) frequency response from 1.2-102.5Hz. At this sample rate, the instrument is capable to record the low frequency calls of blue and fin whale but is not sufficient to record sounds from humpback and minke whale, toothed whales such sperm or killer whale.

At the time of writing this document only a preliminary analysis of the data had been completed. Large whale calls were simply recognized while using spectrogram visualisation and the determination of the species calling whale was based on literature comparison. Through further analysis is required to verify these observations by using automatic detection with spectrogram correlation.

SUMMARY OF PRELIMINARY RESULTS

The preliminary results have provided a clear indication that three species of large whales occur in the region.

Antarctic blue whale calls

One common signal detected were long, patterned sequences of low frequency sounds in the 28-18Hz band. This call type is similar to spectrograms displayed by Ljungblad *et al.* (1998) from Antarctic blue whale calls recorded off Antarctica in 1997. This call consists of three components repeated in patterned sequences every 40-50s during few minutes or hours. The first component is a constant frequency tone centred at 28Hz followed by a short frequency-modulated (FM) downsweep from 28Hz to 20Hz ending with the third component, a slightly modulated tone (20-18Hz). This call lasts approximately 26s but sometimes only the first two components or only the first component was present. This degree of variability in the presence of the three individual components was previously reported (Stafford *et al.*, 2004; Rankin *et al.*, 2005).

Pygmy blue whale calls

Based on literature comparison with the first pygmy blue whale call description established by Ljungblad (1998), the pygmy blue whale low frequency call were often present in the data set. Like Antarctic blue whale call, these signals occur in patterned sequence of long tonal call every 90-100s during few minutes or hours. Each sequence is composed of a repeated two long distinct components. The first component is primarily a constant frequency tone at 35Hz lasting 15-20s. A silent (approximately 20s) separate the two-part phrase. The second components start with a 1-

2s 15-28Hz FM downsweep that ends with a long (20s) slightly modulated tone. Each component has strong associated harmonics.

Fin whale calls

A third call type commonly observed in our data set was a short (1s) pulsed call occurred with regular interpulse spacing (10s) in bouts of several hours. The call sweep down from 30Hz to 15Hz but main intensity was around 20Hz. Previous workers have attributed calls similar to these as being produced by fin whales (Watkins *et al.*, 1987).

These three different calls were visually detected year round with probably various peaks calling in season for each species. After preliminary analysis, others signals were visually detected but the species of vocalising whale have yet to be identified. While the data exploration is in its early stages, its promise is demonstrated by the great quantity, quality variety of biological signal recorded during almost one complete year. Furthermore using this data base we intend to address in the near future the question of the spatial distribution and the relative abundance of these 3 whales species off Crozet Archipelago.

REFERENCES

- Clapham, P.J. and Baker, S.C. (2001) How many whales were killed in the Southern Hemisphere in the 20th century? Paper SC/53/O14 presented to the IWC Scientific Committee, July 2001, London, United Kingdom
- Ljungblad, D., Clark, C.W. and Shimada, H. (1998) A comparison of sounds attributed to pigmy blue whales recorded south of the Madagascar plateau and those attributed to “true” blue whale recorded off Antarctica. *Report of the IWC*. **48**: 439 - 442.
- [Nieukirk](#), S.L., [Stafford](#), K.M., Mellinger, D.K., Dziak, R.P. and Fox, C.G. (2004) Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. *Journal of Acoustical Society of America* **115** (4) : 1832-1843
- Rankin, S., Ljungblad, D., Clark, C. and Kato, H. (2005) Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 IWC/SOWER circumpolar cruises, Area V, Antarctica. *Journal of Cetacean Research and Management* **7** (1): 13-20
- Roueff, A., Piserchia, P.-F., Plantet, J.-L., Cansi, Y. and Ruzié, G. (2004) Noise characterization at the international station of Crozet Islands (HO4). *Journal of Acoustical Society of America* **116** : 2649
- Širović, A., Hildebrand, J.A., Wiggins, S.M., McDonald, M.A., Moore, S.E. and Thiele, D. (2004) Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research II* **51** (17-19) : 2327-2344
- Stafford, K.M., Bohnenstiehl D.W.R., Tolstoy, M., Chapp, E., Mellinger, D.K. and Moore, S.E. (2004) Antarctic-type blue whale calls recorded at low latitudes in the Indian and eastern Pacific Oceans. *Deep Sea Research I* **51** (10) :1337-1346
- Stafford, K.M., Nieukirk, S. L. and Fox, C.G. (2001) Geographic and seasonal variation of blue whale calls in the North Pacific *Journal of Cetacean Research and Management* **3** (1) : 65-76.
- Stafford, K.M., Nieukirk, S. L. and Fox, C.G. (1999a) Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical Pacific. *Journal of Acoustical Society of America* **106** (6) : 3687-3698.
- Thiele, D., Asmus, K., Dolman, S., Falkenberg, C.D., Glasgow, D., Hodda, P., McDonald, M., McKay, D., Oleson, E., Širović, Soutter, A., Moore, S. and Hildebrand, J. (2004) International Whaling Commission – Southern Ocean collaboration cruise report 2003-2004. Paper SC/56/E24 presented to the IWC Scientific Committee, July 2004, Sorrento, Italy.
- Watkins, W.A., Tyack, P., Moore, K.E., and Bird, J.E. (1987) The 20-Hz signals of finback whales (*Balaenoptera physalus*). . *Journal of Acoustical Society of America* **82**(6) : 1901-1912

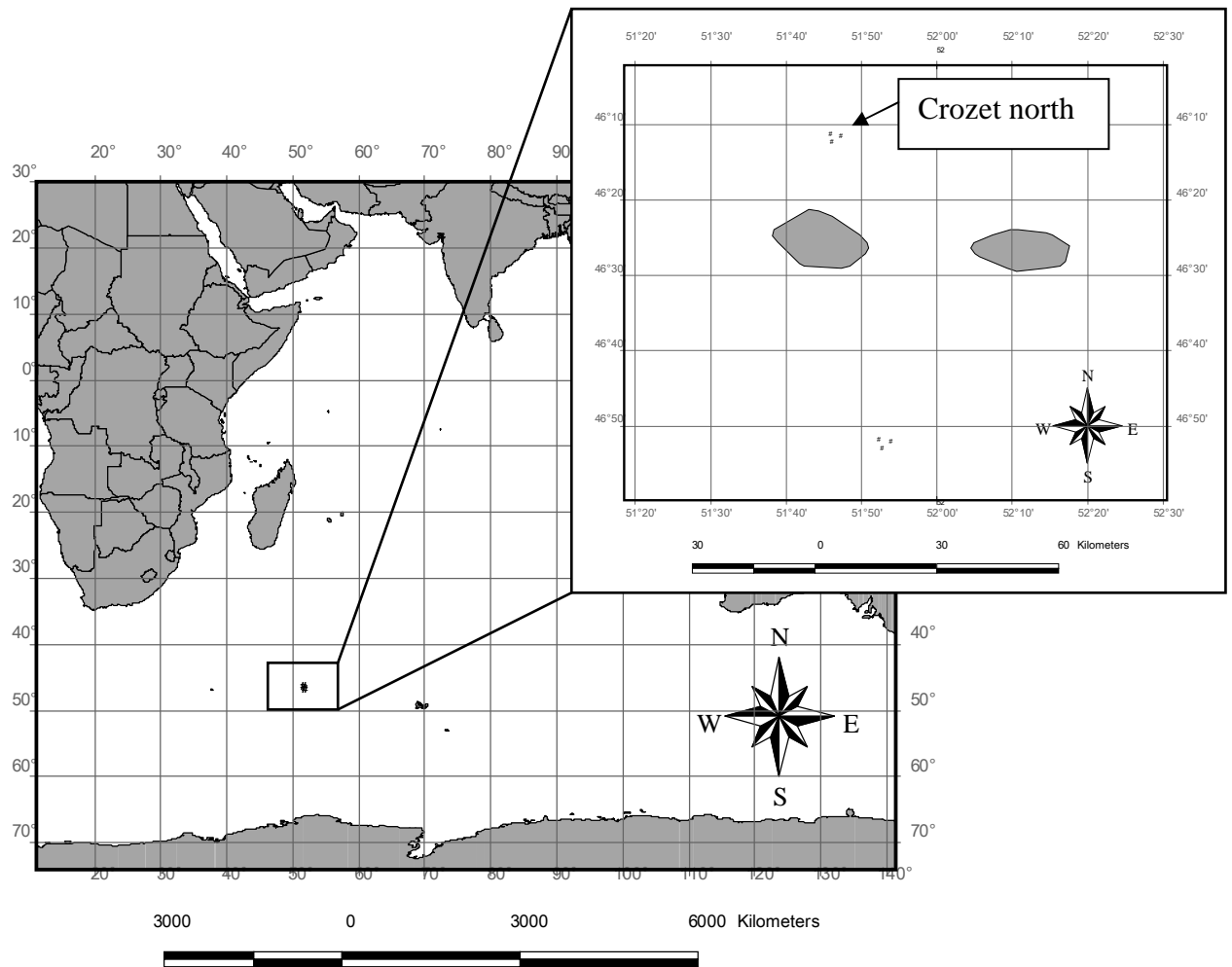


Fig. 1. Crozet North location

ANNEXE 4

Participation à des conférences scientifiques

SAMARAN F., ADAM O., MOTSCH J.-F., CANCI Y., RUZIÉ G. AND GUINET C. 2008. Acoustic localization of two distinct blue whale (*Balaenoptera musculus*) subspecies in the South-West Indian Ocean. Communication orale présentée à Acoustics'2008 (ASA), Palais des Congres, Paris, France, Juillet 2008.

SAMARAN F., CHARRIER I., AUBIN T., ADAM O., MOTSCH J.-F., RUZIÉ G. AND GUINET C. 2007. Acoustic monitoring in the South-Western Indian Ocean reveals call characteristics and seasonal occurrence of two blue whale subspecies. Communication orale présentée au XXI International Bioacoustic Congress, CIBRA University of Pavia Italy, Septembre 2007.

SAMARAN F., ADAM O., MOTSCH J.-F., CANCI Y., RUZIÉ G. AND GUINET C. 2007. Using acoustic detection and localization methods to study the endangered blue whale (*Balaenoptera musculus*) in the South-western Indian Ocean. Communication orale présentée au 3rd International Workshop on Detection and Localization of Marine Mammals using Passive Acoustics, Boston, Massachusetts, Etats-Unis, Juillet 2007.

SAMARAN F., CANCI Y., RUZIÉ G., MOTSCH J.-F., ADAM O. AND GUINET C. 2007. Seasonality of “antarctic” and “pygmy” blue whale calls recorded in the southwestern indian ocean. Communication orale présentée à la 21ème conférence annuelle European Cetacean Society, Donostia-San Sebastian, Espagne, Avril 2007.

SAMARAN F., COTTE C., CANCI Y., RUZIÉ G. ET GUINET C. 2006. Les baleines dans l’Océan Austral :Etudes historiques et contemporaines. Communication orale présentée au 3^e journée du Comité Nationale Français des Recherches Arctiques et Antarctiques, Paris, Octobre 2006.

ABSTRACT

LONG TERM ACOUSTIC OBSERVATIONS IN INDIAN OCEAN: SEASONAL OCCURRENCE AND DISTRIBUTION PATTERN OF CETACEAN

The main goal of this PhD was to improve knowledge about the current occurrence and seasonal distribution pattern of baleen whales in the southwestern Indian Ocean. The intensive whaling during the 20th century reduced dramatically baleen whale population to near extinction. The lack of information about the current occurrence and distribution of baleen whale underscore the difficulty to study these species with traditional visual survey in the Southern Ocean. Here, one year of acoustic observations in sub Antarctic area (near Crozet archipelago) was examined to assess baleen whale presence by using species specific calls in a detection distance range of approximately 250km (estimate from parabolic equation propagation loss models). Fin whale calls, Antarctic blue whale calls and pygmy blue whale (Madagascar type and Australia type) calls were detected. The variation of call number over one year revealed different patterns of whale occurrence. Detection of fin whale calls were very scarce and occur only during winter and fall time. Antarctic blue whale calls were detected year round, but the decrease of calls number during summer time suggests, on the one hand, one part of Antarctic blue whale population leave the area during winter, probably to migrate and spend feeding period in higher latitude, and on the other hand another part of the population seems to stay in the sub Antarctic area. In the same time, and only during this specific feeding season, pygmy blue whale calls were detected in this area. Occurrence of these two blue whale sub-species during summer period suggests that this specific area could be a high biological productivity region which represents a baleen whale feeding ground.

Keywords: Baleen whale, Bioacoustic, Hydroacoustic, Detection, Localization, Seasonal occurrence pattern, Migration, Southern Ocean, Indian Ocean.

RESUME

ANALYSE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES D'ORIGINE BIOLOGIQUE ENREGISTRES DANS L'OCEAN INDIEN : IMPLICATIONS DANS LE RECENSEMENT ET LE SUIVI DES MOUVEMENTS SAISONNIERS DES CETACES.

L'objectif de cette thèse est d'apporter des éléments de réponses sur la présence et la répartition des grandes baleines dans le secteur Indien de l'Océan Austral. En effet, ces espèces ont très fortement souffert de la chasse industrielle menée au cours du XXème siècle. Leur présence et leur répartition actuelle dans l'Océan Austral restent largement méconnues ; les rares observations visuelles de grandes baleines apportent très peu d'informations et soulignent les difficultés de cette approche classique pour l'étude de ces animaux. Dans cette étude, une année d'enregistrements acoustiques provenant d'un observatoire d'écoute localisé en zone subantarctique (Crozet) a été analysée afin de repérer les signaux acoustiques typiques émis par les grandes baleines et témoins de leur présence. Les résultats suggèrent que quatre espèces ou sous-espèces de grandes baleines sont présentes dans le secteur Indien de l'Océan Austral (le rorqual commun, la baleine bleue Antarctique, la baleine bleue pygmée de Madagascar et d'Australie) dans une zone d'écoute estimée au maximum à 250km (d'après le modèle de propagation du son utilisé). Les variations saisonnières dans le nombre et dans l'intensité des cris mais aussi dans les estimations des distances de présence, indiquent une présence occasionnelle, saisonnière ou permanente de ces grandes baleines. Dans ce secteur, le rorqual commun est présent occasionnellement durant l'hiver et l'automne, alors que la baleine bleue Antarctique, est détectée toute l'année. Une forte diminution du nombre de cris de cette espèce, l'été, suggère qu'une partie de la population quitte la zone durant la période estivale, certainement pour migrer vers les aires d'alimentation des hautes latitudes. Cependant, des cris sont toujours détectés durant l'été et au début de l'automne, ce qui suggère qu'une partie de la population n'effectue pas de migration et reste en zone subantarctique. Or, exclusivement du milieu de l'été à la fin de l'automne, une autre sous-espèce de baleine bleue, la baleine bleue pygmée de type Madagascar est détectée. Cette période coïncide avec l'activité d'alimentation de l'espèce. La présence de ces deux sous-espèces autour de Crozet durant l'été et l'automne suggère alors que cette zone subantarctique semble être une aire d'alimentation privilégiée pour ces deux grandes baleines.

Mots Clés : Grande baleine, Bioacoustique, Hydroacoustique, Détection, Localisation, Saisonnalité, Migration, Océan Austral, Océan Indien