

Etude de Faisabilité de la Gestion par Acoustique
passive des Baleines à bosse du Lagon sud
- FGAB -

.-

Proposition
- HERACLES -
Humpback whale Real-time Acoustics in
New-Caledonia
for
Localisation, density Estimation & Survey

Pr H. Glotin, Dr P. Giraudet,
Dr J. Patris, Dr F. Malige,
Dr J. Razik, Dr. S. Paris et R. Baleistriero
avec les aides de F. Piquet
J.M. Prévot

version revue de nov. 2013 - Univ. de Toulon

Liste des abréviations - Glossaire

Abréviation	Signification
Beagle board	Mini ordinateur conçu pour les systèmes embarqués basse consommation et haute technologie http://beagleboard.org/ .
BB	désignera Baleine à Bosse.
TDOA	Time Delay of Arrival (différence de temps d'arrivée)
ILD	Inter Level Difference.
MN	Mile Nautique.
GPS	Global Positioning System.
GSM	Le standard de téléphonie mobile civile.
CR55	hydrophone de haute qualité et robustesse conçu par Cetacean Research pour les études des cétacés <i>http://www.cetaceanresearch.com/hydrophones/c55-hydrophone.</i>
Mot	signe acoustique produit par une BB d'environ 1/2 seconde.
dB	niveau sonore, le rapport des puissances entre la grandeur mesurée et une valeur de référence fixée par une norme.
Puissance à la source	niveau sonore à proximité immédiate de la source.
Masque	structure géologique ou phénomène hydrologique qui atténue ou annule la propagation d'un son.

Table des matières

1	Introduction	7
1.1	Contexte	7
1.2	Organisation du rapport	8
1.3	Matériel	8
1.4	Remerciements	9
2	Signaux acoustiques et milieu	10
2.1	Puissance d'un signal acoustique	10
2.2	Mesure de la puissance	11
2.2.1	La composition d'un chant	11
2.2.2	Le bruit	11
2.2.3	Protocole adoptée pour l'analyse des données	12
2.3	Enregistrement "Bonne Anse 20 Juillet 2013" : influence des courants	12
2.3.1	Relevé de mesures	13
2.3.2	Atténuation due au courant	13
2.3.3	Mesures de puissance moyenne	14
2.3.4	Interprétation	14
2.4	Caractérisation de masque acoustique et atténuation par distance . .	15
2.4.1	Methode : Variation de distance, signal proche, signal lointain	15
2.4.2	Résultats	18
2.4.3	Conclusion	19
2.5	Conclusion	20
3	Faisabilité de détection de chaque type d'émission des BB	21
3.1	Type 1 : le chant	21
3.1.1	Rôle du chant	21
3.1.2	Géographie et chant	22
3.1.3	Signature Géographique des chants	22
3.1.4	Méthodes usuelles de codage des chants	22
3.1.5	Concept d'unité sonore	23
3.2	Proposition du codage parcimonieux pour transmission faible débit .	23
3.3	Proposition de codage en ondelette et robustesse au bruit de récif . .	24
3.4	Détection robuste aux échos et au bruit de récif	24

3.5	Type 2 : sons de plat, de pectorale ou caudale	25
3.6	Type 3 : détection de glottales de femelle	25
3.7	Type 4 : détection de cris de bébé	25
3.8	Conclusion : détection et identification des groupes	25
3.8.1	Identification des groupes	25
3.8.2	Identification des individus	29
4	Localisation par acoustique passive	30
4.1	Principe de la localisation par acoustique passive	30
4.1.1	Calcul de la position à partir des TDOA entre paires d'hydrophones fixes	30
4.1.2	Mesure des TDOA	32
4.2	Adaptation du protocole de localisation aux mesures faites dans le Lagon Sud	34
4.3	Exemple de localisation dans le Lagon Sud	35
4.3.1	Position des différents capteurs	35
4.3.2	Mesure des TDOA	35
4.3.3	Localisation et discussion	36
4.4	Préconisations pour la localisation automatique dans le Lagon Sud . .	37
4.4.1	Organisation des hydrophones	37
4.4.2	Position des triplets	38
5	Proposition de système complet	40
5.1	Notre savoir faire en système de surveillance acoustique de BB	40
5.2	Discussion sur les possibilités de systèmes	41
5.2.1	Avantage des bouées	41
5.2.2	Inconvénient des bouées	41
5.3	Les géométries possibles	41
5.3.1	Base courte	41
5.3.2	Base moyenne : $100m < d(B_i, B_j) < 500m$	41
5.3.3	Base longue : $2000m < d(B_i, B_j) < 5000m$	42
5.3.4	Base longue de bases moyennes	42
5.4	Justification de la géométrie d'HERACLES	42
5.5	Technologie des bouées d'HERACLES	43
5.6	Transmission temps-réel des sons	46
5.7	Coût du matériel, son installation et fonctionnement	47
5.7.1	Ressource humaine	47
5.7.2	Travaux du CDD	48
5.8	Conclusion : coût de la bouée et coût complet	49
6	Conclusion : anticipation des nuisances anthropiques et suivi de la population	50
6.1	Impact des collisions	50

6.2	Impact des sons du trafic maritime sur les cétacés	51
6.3	Impact de la pollution sonore sur les cétacés	52
6.4	HERACLES : un observatoire acoustique sur le long terme à PS . . .	52
6.5	Mesures à prendre pour limiter la pollution sonore	54
6.6	Politique globale de protection	55
6.7	Economie locale	55
6.8	Conclusion générale en faisabilité	56
7	Annexes	57
7.1	Données et traitement du 20 juillet	57
7.2	Données et traitement du 22 juillet	58
7.3	Données et traitement du 25 juillet	58
7.4	Devis	58

Table des figures

1.1	Répartition sur les 15 jours du projet FGAB, des sorties, conditions météo, présence des BB détectées en visuel depuis la vigie, et en contact acoustique. Il est à noter que peu de BB étaient présents ce mois de juillet, et que des conditions météorologiques assez rudes n'ont pas limité le nombre de sorties du fait notamment du courage de notre skipper.	9
2.1	Trajectoire du bateau lors de l'acquisition du 20/07/13 à 9h15. Le début des enregistrement correspond au point le plus à l'Est, de coordonnées 22°23,9680 Sud et 166°52,9776 Est. Chaque point correspond à un relevé de "mot" de baleines (voir la définition dans le texte, partie 2.2.1). Les valeurs notées sur la trajectoire correspondent aux relevés de puissance moyenne de chaque mot, dans trois séquences différentes. On voit que le coude de la trajectoire correspond à une atténuation forte du signal.	16
17		
3.1	Représentation de vocalises de chant, montrant que le bruit de récif est éliminé par le traitement en ondelette (gauche) comparé au spectre de Fourier	26
3.2	Représentation du plat de saut : l'énergie est évidente (barre)	27
3.3	Glutturale de mère (enregistré sur l'animal en été 2013, facilement reconnaissable par rapport au chant des mâles, l'énergie n'excède pas les 2000 Hz (première marque).	28
3.4	Voisement de bébé, remarquable car très élevé (8kHz) en fréquence. .	28
4.1	Principe d'utilisation du TDOA ou délai d'arrivée d'un même son à deux hydrophones ($t_j - t_i$) pour localiser une source. Le TDOA, mesurable à partir des signaux acoustiques, est proportionnel à la différence de distance entre la source et chacun des hydrophones : $d_j - d_i = (t_j - t_i) * c$, où c représente la vitesse du son dans l'eau (environ 1500 m/s). La connaissance de $d_j - d_i$ et de la position des hydrophones permet de déduire des informations sur la position de la source.	31

4.2	Principe de mesure du TDOA entre deux hydrophones : un cross-corrélogramme consiste à mesurer un indice de ressemblance de deux signaux pour différents décalages. Le maximum du cross-corrélogramme donne donc le décalage pour lequel les signaux sont les plus ressemblants, donc en général le TDOA.	33
4.3	Spectrogrammes (représentation temps-fréquence) des quatre signaux utilisés pour les mesures de TDOA : en haut, l'hydrophone embarqué, en bas la GoPro, à gauche l'étape 2, à droite l'étape 3. Malgré le bruit inhérent à la manipulation des hydrophones, nous voyons que les deux capteurs ont enregistré les mêmes événements acoustiques, qui seront utilisés pour mesurer les TDOA par cross-corrélation.	36
4.4	Résultats de la localisation obtenue à l'est de l'îlot Ugo le 25/07/2013 entre 12h et 12h30 : en rouge les positions de l'hydrophone embarqué, en vert les positions estimées de la GoPro aux étapes 2 et 3 (par extrapolation de la dérive observée entre les étapes 1 et 4), et en bleu la position calculée de la source.	37
4.5	Représentation schématique des zones d'ombre acoustique pour trois positions possibles des capteurs : en rouge zone couverte par des hydrophones placés au sud-ouest de Bonne Anse, en vert celle couverte par des hydrophones fixés à l'est de Ioro et en bleu la zone couverte par des hydrophones situés près du phare Woodin.	39
5.1	Représentation des positions des bouées proposées pour HERACLES. Les triangles sont les bases moyennes, les points rouges les bouées complémentaires. Les positions courantes des cétacés sont les barres, les rails de trafic sont en rouge.	43
5.2	Représentation des positions des bouées proposées pour HERACLES avec le même budget que précédemment, mais donnant priorité sur la localisation à l'intérieur de Woodin au lieu du sud du Lagon. Les triangles (rouges) sont les bases moyennes, les disques rouges les bouées complémentaires. Les positions courantes des cétacés sont les barres, les rails de trafic sont en rouge.	44
5.3	Représentation des positions des bouées proposées pour HERACLES avec le même budget que précédemment, mais donnant priorité sur la localisation à l'intérieur de la baie de Prony en face de Vale, au lieu du sud du Lagon. Les triangles (rouges) sont les bases moyennes, les disques rouges les bouées complémentaires. Les positions courantes des cétacés sont les barres, les rails de trafic sont en rouge.	45
6.1	Niveau sonore en décibels (dB) de différentes sources de bruits anthropiques	53

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

L'équipe qui a conduit cette étude est une partie du groupe 'DYNI' de l'UMR CNRS LSIS, qui a une expertise reconnue au niveau national et international en détection et classification de scènes complexes, avec des applications en bioacoustique et robotique sous-marine. Dyni pilote un programme sur 2012-2017 de la mission interdisciplinaire CNRS en biologie, écologie et informatique, pour l'indexation automatique de Masses de Données Bioacoustiques (<http://sabiod.org>). Dyni pilote également pour UTLN un projet DGA / DCNS sur les drones sous marins pour la surveillance de site portuaires sensibles, avec un volet dual civile en veille d'écosystèmes (Sycié) à partir de sonar notamment. L'expertise de Dyni recouvre d'une manière générale la reconnaissance de signaux à haute variabilité (comme les formes manuscrites avec son projet ANR Cognilego).

Dyni participe régulièrement à des concours d'évaluations internationales de systèmes de reconnaissance acoustique. Elle est 4e sur le concours Bird à Int. Conf. on Machine Learning à Atlanta 2013. DYNI est évaluée A+ par l'AERES en 2012, et elle est organisatrice du 1er Workshop Machine Learning for Bioacoustics avec l'Université de Cornell en 2013 à Atlanta, ainsi que du 1er workshop Neural Information Processing for Bioacoustics (<http://sabiod.org/nips4b>), Nevada 2013. A noter que H. Glotin pilote à NIPS4B une compétition en analyse des chants de BB, pour leur représentation, compression et détection, analyse de structure, identification et transmission.

Enfin Dyni pilote plusieurs projets dans le premier sanctuaire international de cétacés : PELAGOS, secteur sud-est de Toulon. Il s'agit de Boussole 2011-13, DECAV 2010-2013, BOMBYX 2012-13 et DECAN 2013 (2016). Dyni possède un savoir faire reconnu au niveau international en suivi par acoustique passive de cétacés (brevet USA). Ce brevet est particulièrement intéressant lorsque plusieurs animaux sont dans une même zone : en temps-réel il permet de séparer les individus et de les localiser un par un, donc de les suivre et de les compter, ce qui est un avantage par

rapport aux méthodes visuelles (observations contraintes) et acoustiques classiques (peu de précision).

1.2 Organisation du rapport

Nous rapportons ici la faisabilité d'un système de suivi acoustique passive des cétacés (ici Baleine à bosse) dans le Lagon Sud. Nous ne relatons pas un bilan des mesures jour par jour (ce qui était le contenu de la première livraison exposée le 1er septembre à PS), mais en donnons une synthèse.

Ainsi, nous montrons tout d'abord que la propagation des sons des BB dans le Lagon Sud est très bonne, d'au moins 15 km, sans échos, avec la présence d'écran acoustique bien identifiés, et donc gérables.

Puis nous expliquons les détectons avec des représentations parfois originales des productions acoustiques des BB. Cela conduit dans le chapitre qui suit à une démonstration sur données réelles de la faisabilité de la localisation de BB par acoustique passive (démonstration réalisée par une installation conçue avec les moyens disponibles cet été).

Enfin, en synthèse de ces données, nous avons étudié théoriquement les caractéristiques d'un système reposant exactement sur le même matériel que nous avons validé cet été. Ce projet, HERACLES, propose à notre connaissance le meilleur rapport qualité / prix. (tant pilote d'infrastructures identiques, et en ayant discuté avec plusieurs experts (Pr. Adam Paris 6, Pr Gianni Pavan à Pavia university, Pr White à Southampton).

Enfin la conclusion rappelle les perspectives en gestion pérenne de cette population emblématique. Les annexes présentent des données brutes, et les devis de matériel sont en pièces jointes.

1.3 Matériel

Les enregistrements de vocalises et de bruits de plat / saut ont été réalisés dans tout le lagon sud suivant la répartition donnée dans la figure 1.3. Cette répartition de mesure était donne un bon échantillon des conditions acoustiques générales.

Nous avons utilisé un hydrophone Cetacean Research C55 (omnidirectionnel, $[5Hz, 90kHz]$, sensibilité $-180dB-re1V/uPa$, fiche technique¹ déployé à partir d'un zodiac (moteur éteint, placé approximativement à 20m de profondeur (la profondeur de la colonne d'eau était entre 40m à 80m).

Les sons ont été numérisées par une simple carte son de PC classique avec une fréquence d'échantillonnage de 48kHz sur 16 bits. Ce choix est délibéré afin de tester

¹<http://www.cetaceanresearch.com/hydrophones/c55-hydrophone/index.html>

Date	METEO	Equipage	Vigie	ACOUSTI	VISU	Type	Temps enregistrement (mn)		
		Sur Zodiac : Fabrice+...		Activité	Vue	Groupe	48kHz CR 16b	48kHz 16b st.	96kHz 24b
me 17	Pluie	Hervé, Julie, Franck	WW	non	non	-	75	-	-
je 18	Grosse pluie	Hervé, Pascale, Julie, Laurence	-	non	non	-	40	-	-
ve 19	Alternance	Hervé, Julie, Franck	WW	oui	oui	Mâle	195	-	-
sa 20	Alternance	Pascale, Franck	PS+WW	oui	oui	Mâle	195	-	-
di 21	Alternance	Hervé	PS+Pascale	oui	oui	Mâle	65	-	-
lu 22	BEAU	Pascale, Julie, Franck	obs. Ouen	oui	oui	Mâle	175	45	-
ma 23	Nuages	Hervé, Julie	PS+Franck	oui	oui	MamPetit	185	45	-
me 24	BEAU	Hervé, Pascale, Julie, Franck	WW	oui	oui	Mâle	150	60	-
je 25	Nuages	Pascale, Julie, Franck	WW	oui	oui	MamPetit	105	75	63
ve 26	Grosse mer	Panne zodiac am ; puis Julie, Franck	-	non	non				7
sa 27	Alternance	Julie, Franck + Hervé sur Nirvana	PS+WW	pas de voc	oui	MamPetit	115	-	-
di 28	Grosse pluie	Hervé, Julie + Pascale sur Nirvana	PS+WW	oui	non	Mâle	100	-	-
lu 29	Grosse pluie	Hervé, Julie, Franck	PS	non	non	-	30	-	-
ma 30	Alternance	Hervé, Franck	WW + Julie	oui	oui	MamPetit	-	45	240
me 31	BEAU	Hervé, Franck	Patrice + 4	oui	non	Mâle	-	90	360
							28h	6h	11h

Approx. +1/3 de détection par rapport aux jours sans visibilité

FIG. 1.1 – Répartition sur les 15 jours du projet FGAB, des sorties, conditions météo, présence des BB détectées en visuel depuis la vigie, et en contact acoustique. Il est à noter que peu de BB étaient présents ce mois de juillet, et que des conditions météorologiques assez rudes n'ont pas limité le nombre de sorties du fait notamment du courage de notre skipper.

la faisabilité d'un matériel robuste et bas coût pour la mise en place d'un système complet, qui sera détaillé dans l'avant dernier chapitre (sous l'acronyme 'HERA-CLES').

1.4 Remerciements

Nous remercions Emmanuel Coutures et Laurence Bachet pour leur sens critique sur ce projet, ainsi que Patrice Plichon pour son expertise. Nous remercions également C. Garrigues et son équipe pour leurs expertises, et les whales watchers du site pour leur aide logistique sur certaines sorties (au total 90% des sorties ont été couvertes par une observation à la vigie en collaboration entre les membres propres de FGAB).

Chapitre 2

Signaux acoustiques et milieu

Dans ce chapitre nous analysons la qualité du signal reçu en fonction de la distance entre l'animal et le capteur, afin de qualifier le milieu. Nous donnons tout d'abord le protocole adopté, puis l'analyse de deux acquisitions faites pendant la période d'étude de Juillet 2013 est présentée.

2.1 Puissance d'un signal acoustique

Le projet d'écholocalisation des baleines à bosse ne nécessite pas de mesure de la puissance des signaux reçus, en effet, l'intensité d'un signal, sur une vocalisation complexe, changeante, et des capteurs différents, est un paramètre peu fiable. Pour la localisation, il est bien plus précis d'utiliser le décalage temporel des signaux.

Néanmoins, il nous a paru important de consacrer du temps à l'analyse en puissance de nos mesures, essentiellement pour vérifier la portée des vocalisation (est-elle bien suffisante pour la zone définie?), mais aussi pour placer judicieusement les capteurs acoustiques.

La puissance d'un signal périodique x , de période T , est définie comme la moyenne du signal quadratique :

$$P = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} x^2(t) dt \quad (2.1)$$

En acoustique on n'a pas en général de signal strictement périodique, on prendra donc la moyenne du signal au carré sur une durée suffisamment longue par rapport à la variation du bruit. La puissance est donc elle-même une fonction du temps.

La puissance d'un signal acoustique pouvant varier sur plusieurs ordres de grandeur, on définit une échelle logarithmique, et on définit l'intensité en décibel :

$$P_{dB} = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (2.2)$$

2.2 Mesure de la puissance

Les enregistrements effectués en juillet 2013 ne présentent pas toutes les qualités du dispositif final : notamment, il n'était pas possible, étant donné le matériel dont nous disposions, de faire des mesures simultanées en plusieurs points fixes, ce qui est le cadre normal pour faire des comparaisons de puissance des signaux.

Les résultats qui suivent seront donc très approchés et nous permettent essentiellement de repérer des tendances.

Dans les conditions de plusieurs enregistrements faits avec le même appareil, mais à des instants et des positions différentes, il est nécessaire de définir un signal "standard" dont on considérera qu'il est émis avec la même intensité intrinsèque par l'animal. C'est naturellement une hypothèse forte : pour vérifier sa validité, nous prendrons, pour une séquence de chant donnée, plusieurs relevés de puissance du même segment, ou mot, dont nous mesurerons l'écart au cours d'une même séquence (pour laquelle la position a peu varié).

2.2.1 La composition d'un chant

A une distance de cinq milles nautiques environ, sur cet enregistrement, on constate un chant structuré grossièrement en quatre phases, ou séquences. Le chant est une unité de 5 minutes environ, répété plusieurs fois, alors que l'animal est statique.

Dans la première séquence, on entend de longs meuglements, répétés une dizaine de fois.

Puis, dans la deuxième séquence, un mot est répété une quinzaine de fois. Il s'agit d'un signal bref (un dixième de seconde environ) et facilement reconnaissable, que nous nommons par l'onomatopée "bloup".

Dans la troisième séquence, un mot interrogatif, un peu plus long, que l'on nommera "Houhou" est répété à son tour.

Enfin, le chant se termine sur un motif plus long, appelé "virgule montante" en référence à sa forme sur une représentation temps-fréquence. Il s'agit d'un mot long (3 à 5 secondes), grave au début puis devenant aigu.

Pour leur intensité et la facilité à les repérer, on utilisera les "bloup" et les "virgules" de chaque chant.

2.2.2 Le bruit

Les signaux que nous avons mesurés sont plongés dans un bruit (microorganismes marins sur les fonds, essentiellement) de puissance souvent plus importante que la puissance du signal. Naturellement, la forme du bruit est différente de celle du signal, ce qui permet de les distinguer très nettement à l'oreille. Cependant, pour la mesure de la puissance, la question du filtrage du bruit se pose de façon cruciale. En effet, selon la soustraction effectuée, la puissance mesurée sur une durée donnée peut facilement varier du simple au double.

2.2.3 Protocole adoptée pour l'analyse des données

Pour mesurer la puissance d'un signal donné, on adaptera le protocole suivant pour chaque extraction de puissance. Ce protocole est réalisé à l'aide du logiciel "Audacity".

Au cours d'un chant (enregistrement de 5 minutes environ) :

- On repère tous les mots utiles qui ne sont pas bruités par un événement anormal (approche d'un moteur de bateau, crissement sur le cable, vague forte).
- Pour chaque mot, on définit une durée de calcul. Pour les "bloup", ce sera une seconde. Pour les virgules, la durée du signal (comprise entre 3 et 5 secondes).
- On sélectionne alors une durée égale à celle du signal choisi immédiatement après celui-ci, en s'assurant qu'elle ne contient aucun signal utile. Cette plage de temps servira à définir la forme du bruit.
- La zone contenant le signal est alors filtrée grâce à la forme de bruit ainsi définie.
- On mesure la puissance du signal ainsi filtré (en dB).

L'incertitude sur la puissance ainsi mesurée est essentiellement liée au filtrage (qui doit ôter le bruit sans diminuer le signal). Une étude faite sur un échantillon a permis d'évaluer l'incertitude de nos relevés de puissance : elle est de l'ordre de 1 dB pour un signal considéré comme faible, de -50 dB. Elle est moindre lorsque la puissance du signal est plus importante.

Pour chaque chant, on a donc des relevés de puissance correspondant aux "bloups" de bonne qualité d'une part, et aux "virgules" de bonne qualité d'autre part. Pour chacun des mots, on examine la variance de la puissance au cours d'un même chant (donc au même endroit environ). On constate que celle-ci est de l'ordre de 3 ou 4 dB. On obtient alors une "puissance moyenne" du mot, significative à quelques dB près. Dans les résultats présentés ci-dessous, on notera donc une incertitude de 3 dB, résultant d'une part de l'incertitude de mesure de chaque cri, et d'autre part de la moyenne faite sur tous les cris utilisables d'un même chant.

Ce sont ces puissances moyennes que l'on comparera d'un lieu à l'autre pour mesurer une éventuelle atténuation du signal.

2.3 Enregistrement "Bonne Anse 20 Juillet 2013" : influence des courants

On utilise le protocole décrit dans la partie 2.2.3 pour mesurer le signal lors d'un enregistrement effectué le 20 Juillet 2013 entre 9h14 et 9h48 près du phare de Bonne Anse. Pour cet enregistrement, on dispose des positions GPS précises du bateau lors de la totalité de l'acquisition.

2.3.1 Relevé de mesures

Nous obtenons 21 mesures décrites dans le tableau ci-dessous.

Heure	Latitude Sud	Longitude Est	type de mot	puissance mesurée (dB, à ± 1 dB près)
9h16min33s	22°23,9681	166°52,9775	bloup	-40,3
9h16min36s	22°23,9677	166°52,9761	bloup	-51,4
9h16min42s	22°23,9674	166°52,9755	bloup	-50
9h16min52s	22°23,9671	166°52,9740	bloup	-47,3
9h16min55s	22°23,9670	166°52,9736	bloup	-50,7
9h18min22s	22°23,9607	166°52,9571	virgule	-49,3
9h18min38s	22°23,9596	166°52,9551	virgule	-41,9
9h18min53s	22°23,9588	166°52,9531	virgule	-42,5
9h19min06s	22°23,9583	166°52,9526	virgule	-40,5
9h19min19s	22°23,9581	166°52,9518	virgule	-43,8
9h19min31s	22°23,9584	166°52,9508	virgule	-43,3
9h21min21s	22°23,9581	166°52,9518	bloup	-47,2
9h22min26s	22°23,9615	166°52,9320	bloup	-48,1
9h22min31s	22°23,9623	166°52,9307	bloup	-49,4
9h22min37s	22°23,9628	166°52,9305	bloup	-48,3
9h23min20s	22°23,9655	166°52,9277	virgule	-44,3
9h23min25s	22°23,9666	166°52,9269	virgule	-41,1
9h24min03s	22°23,9699	166°52,9245	virgule	-54,3
9h25min28s	22°23,9760	166°52,9162	bloup	-56,7
9h27min00s	22°23,9815	166°52,9087	virgule	-53,9
9h28min02s	22°23,9844	166°52,9038	virgule	-51,6

Remarquons qu'entre deux fichiers d'enregistrement, un petit décalage temporel se produit (date enregistrement) ce qui explique que certaines positions semblent se reproduire plusieurs fois : cela correspond à une incertitude de quelques secondes sur la date d'enregistrement.

2.3.2 Atténuation due au courant

On voit avec nos mesures effectuées au large Bonne Anse (figure 2.1), que nous obtenons le déplacement du bateau sur 21 positions GPS. Nous cherchons un support Big Data que nous amenons à une perf raisonnable. Le premier point correspond au début de l'enregistrement, à 9h 16min 31 s le 20 juillet 2013, à la position géographique de coordonnées 22°23,9680 Sud et 166°52,9776 Est.

La bateau se trouvait alors à quelques 250 m au Sud du Phare de Bonne Anse, de coordonnées 22°23,8325 Sud et 166°52,9852 Est (source : réseau IGN72 Grande Terre).

La baleine chanteuse a été identifiée, quelques dizaine de minutes plus tard, en "R5" selon le code des Whale Watchers, entre Ioro et Nouaré, soit autour de la

position 22°24,5 Sud et 166°58,5 Est (ce qui correspond à une distance d'environ 5 milles nautiques du bateau).

Les vides dans la trajectoire correspondent à des moments où la baleine ne chantait pas, ou bien prononçait des mots que nous n'avons pas analysé.

La vitesse de dérive du bateau est comprise, tout au long de cette série de mesure, entre 0,1 m/s et 0,5 m/4s.

2.3.3 Mesures de puissance moyenne

Lors des enregistrements, on constate que le bateau a globalement dérivé vers l'Ouest (voir figure 2.1). L'animal enregistré est situé plus vers l'Est, vers l'îlot Nouaré à 5 milles nautiques de notre position (une baleine ayant été signalée par la vigie quelques minutes plus tard à cet endroit).

Pendant la dérive, nous avons enregistré trois chants successifs. Nous avons donc trois valeurs de signal pour chaque mot choisi.

Etant donné la structure du chant, on constate que pour chaque relevé, le bateau s'est déplacé au maximum de 3 mètres en latitude et de 9 mètres en longitude. Entre chaque valeur, pour un même mot, le bateau s'est déplacé d'une quarantaine de mètres en longitude et d'une vingtaine de mètres en latitude, au maximum.

Les résultats des mesures de puissances sont étiquetées sur la trajectoire.

- Pour le premier chant, nous obtenons une puissance moyenne de "bloups" de $B_1 = -48 \pm 3$ dB, et une puissance moyenne de "virgules" de $V_1 = -43 \pm 3$ dB.
- Pour le second chant, nous obtenons une puissance moyenne de "bloups" de $B_2 = -48 \pm 3$ dB, et une puissance moyenne de "virgules" de $V_2 = -47 \pm 3$ dB.
- Pour le troisième chant, nous obtenons une puissance moyenne de "bloups" de $B_3 = -56 \pm 4$ dB (attention, cette moyenne correspond à une seule mesure : étant donné le niveau de bruit, les autres "bloups" de cette séquence ne sont pas mesurables de façon fiable - cette moyenne donne probablement une valeur maximale de la valeur réelle) et une puissance moyenne de "virgules" de -52 ± 3 dB.

2.3.4 Interprétation

Etant donnée la précision de nos mesures, nous ne constatons pas d'effet d'atténuation due à la distance sur cette étude. En effet, le bateau ne s'est éloigné de la baleine que de quelques centaines de mètres au maximum, sur cinq milles nautiques, soit une variation relative de quelques pourcents.

En revanche, nous voyons que, à partir de la moitié du chant 2, le signal baisse significativement. Quelles peuvent être les causes de cette diminution ? La baleine émettrice ne s'est probablement pas éloignée significativement, puisque sa position par la suite montre une trajectoire plutôt dirigée vers l'ouest. Il est possible, mais

peu probable, qu'elle ait simplement décidé de chanter moins fort. Cette hypothèse n'est pas vérifiable avec notre enregistrement.

Il existe une autre hypothèse cependant, qui est suggérée par la forme de la trajectoire. En effet, un zoom sur les positions en latitude montre un brusque changement de direction dans la dérive du bateau au moment correspondant à la moitié du deuxième chant. Alors que le bateau dérivait jusque là, assez lentement, vers le Nord Ouest, sa trajectoire devient vers le Sud Ouest. Nous pouvons interpréter la dérive vers l'Ouest, dominante, comme l'effet du vent. En revanche, la dérive en latitude et son brusque changement de direction peut facilement s'interpréter comme un changement de courant.

Le bateau, poussé par le vent, serait passé d'un contre-courant entrant (dans la baie de Prony) à un courant sortant. Nous rappelons que la zone du phare de Bonne Anse est un passage étroit vers une baie assez large, et donc soumise à de fortes variations de courants de marée. Par ailleurs, d'après le SHOM, la marée était fortement descendante au moment de l'enregistrement (marée haute vers 5h du matin, marée basse vers 11h). Il est manifeste que le bateau a été pris dans le fort courant sortant de la baie.

Il est donc très probable que l'atténuation du signal soit due à la frontière entre le courant sortant et le contre-courant entrant. Cependant ce n'est pas une coupure franche, et la détection reste faisable de part et d'autre du courant.

L'étude de cet enregistrement nous permet donc de montrer l'influence des courants. Nous en tiendrons compte dans le choix de position des hydrophones notamment dans les zones à forts courants (canal Woodin, entrée de la baie de Prony).

2.4 Caractérisation de masque acoustique et atténuation par distance

Un des objectifs de cette mesure de terrain était d'obtenir sur signaux réels en milieu réel des caractéristiques de coupure de propagation par les récifs, et d'atténuation du signal sur des longues distances.

Les enregistrements effectués lors de la journée du 20 juillet après 12h30 montrent que l'atténuation du signal est très nette, jusqu'à un signal nul, lorsque l'on passe derrière un platier (en l'occurrence platier de Bonne Anse).

Ainsi, pour la mise en place des hydrophones, il faudra faire attention à l'écrantage des différents platiers de la zone.

2.4.1 Méthode : Variation de distance, signal proche, signal lointain

Un des buts de la mission était d'évaluer l'atténuation du signal en fonction de la distance. En particulier, et c'est le plus important, la portée de ces signaux, c'est

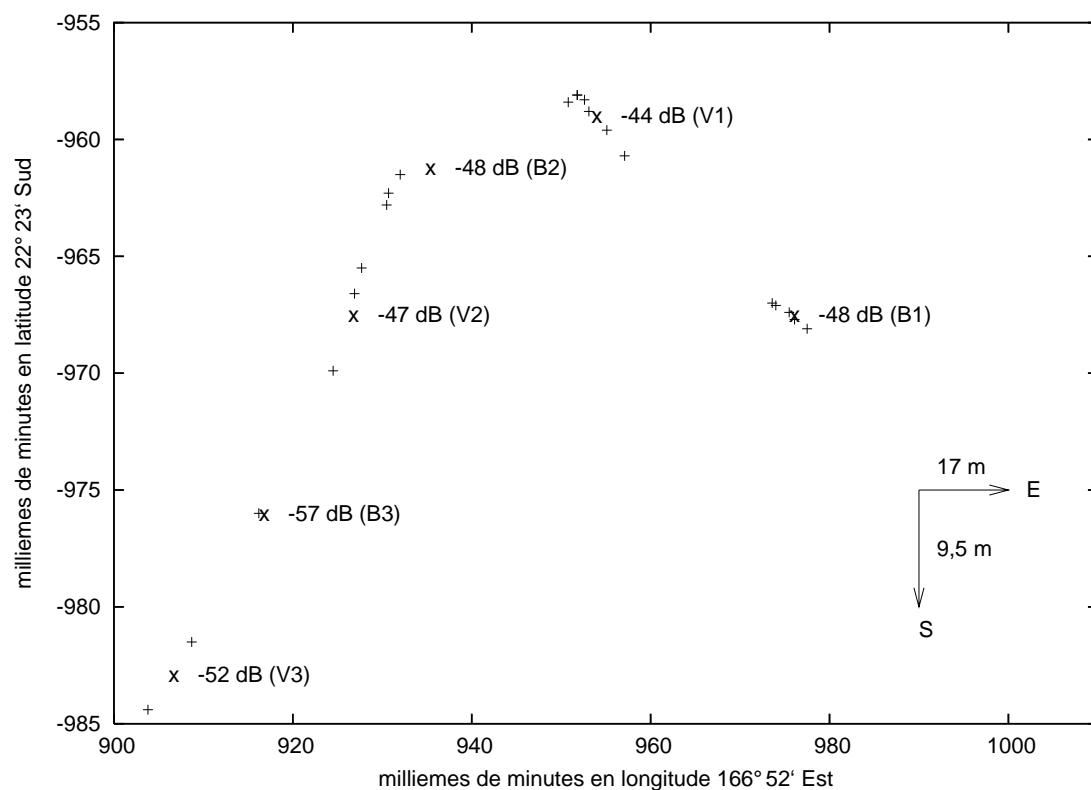


FIG. 2.1 – Trajectoire du bateau lors de l’acquisition du 20/07/13 à 9h15. Le début des enregistrement correspond au point le plus à l’Est, de coordonnées 22°23,9680 Sud et 166°52,9776 Est. Chaque point correspond à un relevé de “mot” de baleines (voir la définition dans le texte, partie 2.2.1). Les valeurs notées sur la trajectoire correspondent aux relevés de puissance moyenne de chaque mot, dans trois séquences différentes. On voit que le coude de la trajectoire correspond à une atténuation forte du signal.

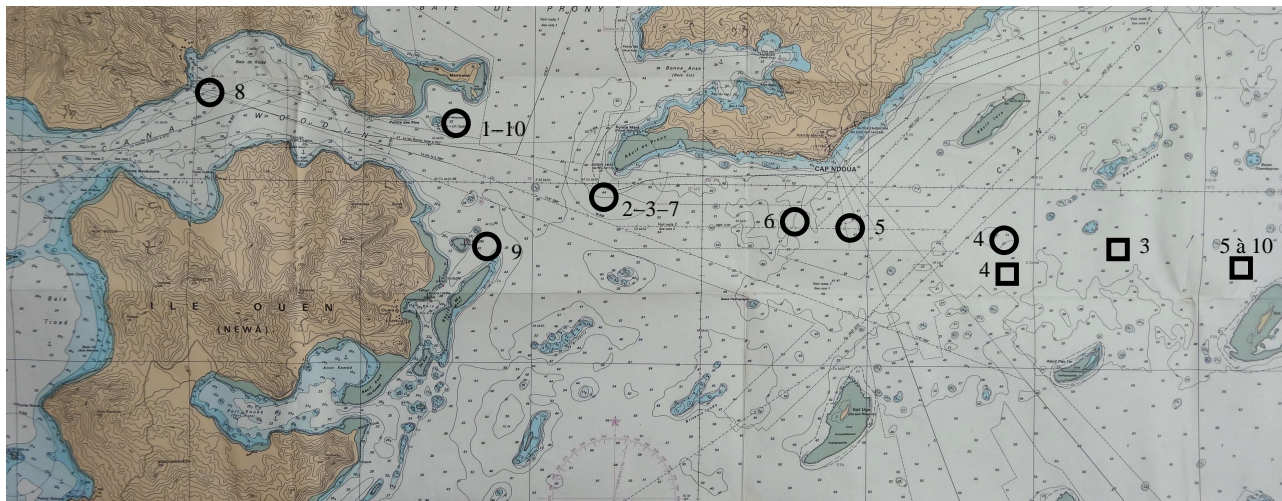


FIG. 2.2 – Trajectoire du bateau et de la baleine le matin du 20 juillet 2013 : les carrés indiquent les positions de la baleine, les ronds ceux du bateau. Les débuts des points d’écoute correspondent aux heures suivantes :

- point 1 / 8h45 point 2 / 9h15 point 3 / 9h35 point 4 / 10h20
- point 5 / 11h30
- point 6 / 12h05 point 7 / 12h30 point 8 / 13h15 point 9 / 13h40
- point 10 / 14h00

à dire la distance à partir de laquelle la détection n’est plus possible (i.e. trop faible RSB).

Le 20 juillet, un mâle identifié était présent sur la zone entre le phare de Bonne Anse et l’îlot Nouaré. Il s’agit de Téranga¹.

Pour tenter de mesurer l’atténuation du signal enregistré en provenance de cette baleine, nous avons analysé quelques fichiers.

Ce jour-là, une fois la baleine repérée par la vigie, nous nous sommes approchés à une centaine de mètres (estimation à vue). Ensuite, nous nous sommes progressivement éloignés jusqu’à la perte du signal (au fond du canal Woodin).

Nous obtenons ainsi des enregistrements à quatre distances différentes. A partir de ces enregistrements, nous avons noté tous les types de cris (les “mots”, cf section 2.2.1). La variété de ces cris (à l’oreille) permet déjà de se faire une idée qualitative de l’atténuation : en effet, le signal est plus varié lorsque la baleine est proche, certains mots se propageant mieux que d’autres.

Puis, dans un deuxième temps, grâce au logiciel audacity, nous avons mesuré des puissances pour les mots “Virgule Montante” et “Bloup”. En effet, dans les fichiers enregistrés alors que la baleine était loin, ce sont à peu près les seuls mots qui restent audibles et qui, à l’oreille, ont une régularité certaine en temps et en intensité.

¹communication personnelle Garrigue et collègue, que nous remercions : Opération Cétacés était en observation sur le même site au mêmes mesures

Pour la mesure de la puissance, nous avons suivi le protocole indiqué dans la partie 2.2.3. Parfois, le temps entre une “virgule montante” et le mot suivant était trop faible pour que nous puissions prendre une plage de temps de bruit égale à celle du mot. Dans ce cas, on a pris une plage de temps la plus grande possible à la suite du mot.

Par ailleurs, à part pour le fichier obtenu au fond du canal Woodin, il ne semble pas y avoir de fortes ruptures de courant dans la zone considérée puisque nous avons des profondeurs assez importantes et un espace assez ouvert, sans trop d’obstacles.

2.4.2 Résultats

Dégradation du signal en terme de quantité de mots

Après écoute des fichiers, on a réalisé un premier tableau indiquant les types de mots entendus. Pour cela, on n’a utilisé que les points d’écoute 4, 5, 7 et 8 qui correspondent à l’éloignement progressif. Les points 2 et 3 étant des points pour lequel la baleine n’est pas située avec une bonne précision et où des effets de courant peuvent avoir lieu (cf partie 2.3).

Par soucis de faciliter la lecture, dans le tableau qui va suivre, les mots sont abrégés de la manière suivante.

cri	Abréviation utilisée	dans Whitlow et al.
Virgule montante	VM	E
Bloup	B	W
Meuglement	M	A
Cris aigus	CA	
Petite virgule montante	pvm	
Virgule temps fréquence U descente remontée	U	
Grincement de porte	Gp	
Rires	R	
Mouh puis des petites virgules montantes	Mpv	
Houhou	H	
Rot grave	Rg	
Rabloup et flap flap flap	RBf	
Sifflements	S	
Descente trois notes	Dt	
Virgule descendante	Vd	D
Bloup grave	Bg	
Grou	Gr	
Bloup long	Bl	
Meuglement finissant par une montée	Mm	
Meuglement finissant par une descente	Md	

Par ailleurs, nous avons essayé de mettre en correspondance les mots que nous

avons identifié avec les “units” de l’article “Feasibility of using acoustic DIFAR technology to localize and estimate hawaiian humpback whale population” (2001) de Whitlow et al. (colonne de droite du tableau).

Le tableau suivant indique la présence (une croix) ou non des mots en fonction de la distance.

Nature du cri	VM	B	M	CA	pmv	U	Gp	R	Mpv	H	Rg	RBf	S	Dt	Vd	Bg	Gr	Bl	Mm	Md
pt 4 $\simeq 0,1$ km	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X
pt 5 $\simeq 8$ km	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X						
pt 7 $\simeq 12$ km	X	X	X	X	X	X	X				X									
pt 8 $\simeq 20$ km																				

Nous voyons dans ce tableau que le signal se dégrade en fonction de la distance. Il semble néanmoins bien net entre 0 et 8 km où on voit peu de différences d’apparition de mots. Les mots classiques (VM, B, M, CA, pvm, U, Gp) apparaissant dans les deux fichiers tandis que des mots moins fréquents apparaissent tantôt dans l’un ou l’autre des fichiers. Par contre, passé un certain seuil (10km ? il reste à l’estimer), il semble y avoir un appauvrissement de la qualité de ce signal en terme de mots reconnus à l’oreille.

Enfin, le fait que nous ne captions plus de signal à 20km peut s’expliquer de plusieurs manières :

- Le chant n’est plus assez puissant pour sortir du bruit à cette distance.
- Il y a des changements de courant importants qui font écran au passage du signal (c’est tout à fait plausible car le canal est un lieu de forts courants).
- Il existe un obstacle de type île ou platier entre la baleine et l’hydrophone. C’est moins probable si on estime que la baleine a peu bougé pendant nos mesures.

Dégradation de la puissance du signal

Nous avons, pour chacun des points d’écoute, réalisé des mesures de puissances de chacune des Virgules Montantes et des Bloups. Puis on a réalisé une moyenne et l’écart type de ces puissances, qui sont retranscrites dans le tableau suivant.

Distance (km)	0,1	8	12	20
Puissance moyenne reçue (dB) (“Bloups” B)	-36 ± 3	-46 ± 7	-47 ± 7	$-\infty$
Puissance moyenne reçue (dB) (“Virgules Montantes” VM)	-30 ± 6	-41 ± 3	-40 ± 4	$-\infty$

2.4.3 Conclusion

Ainsi, les principaux résultats obtenus sont :

- Les fichiers que nous avons sont bruités. Le bruit étant principalement dû aux vagues de surface et au bruit des organismes marins sur les fonds. Pour

l'installation finale, nous préconisons donc un micro posté en pleine eau, assez loin de la surface (bruits d'eau) et du fond (bruits d'organismes marins).

- La variété des “mots” décroît fortement avec la distance et sur des longues distances seuls les “bloups”, les “virgules montantes” et les “meuglements” sont audibles.
- On entend les mots “Virgule montante” et “Bloup” jusqu'à 6 à 7 milles nautiques au moins, ce qui couvre largement la zone demandée. Ces signaux sont suffisamment clairs à cette distance pour servir à la localisation par triangulation.

2.5 Conclusion

On déduit de ce chapitre deux résultats majeurs :

- sans obstacle, les chants de baleine se propagent sur une distance couvrant largement la zone à étudier ;
- cependant, certains éléments peuvent affaiblir le signal ou le masquer totalement : les îlots et platier masquent le son, les variation de courant peuvent l'affaiblir notablement.

Chapitre 3

Faisabilité de détection de chaque type d'émission des BB

Ce chapitre présente les quatre types de sons émis par les BB : le type 1 est le chant, le type 2 est la classe des sauts / plats de caudale ou de pectorale, le type 3 représente des glotturales des femelles, et le type 4 les cris de bébé. Les deux derniers types ont été mis en évidence lors de la mission collaborative avec l'université de Paris 6 à la Réunion en été 2013, consistant notamment en la pose de TAG sur une mère (un TAG est un système d'enregistrement ventousé sur la peau de l'animal permettant d'obtenir des gabaris)

Dans la suite nous donnons les formes caractéristiques de chacun des 4 types, qui sont représentés et détectables automatiquement sur nos calculateurs. De plus nous montrons des codages efficaces pour la transmission de ces types avec peu de volume. Chacune de ces détections caractérise les groupes mâles, mères, mères et bébé, groupe mixte. Dans le chapitre suivant il sera montré comment la datation de ces détections permet de localiser chaque individu / groupe.

3.1 Type 1 : le chant

3.1.1 Rôle du chant

Durant la saison de reproduction, les interactions entre les BB sont particulièrement intenses. Cette espèce de mysticète déploie des stratégies individuelles complexes, basées sur des actions d'attractions males / femelles, d'intimidation entre les mâles et de délimitations des territoires. Dans ces échanges, les activités vocales occupent une place très importante. Ces baleines émettent une large diversité de sons, de nature pulsée et de nature harmonique [CALR13]. En particulier, certains mâles émettent des vocalises organisées dans le temps, sous forme de séquences et de phrases constituant le leitmotiv d'un chant [PM71b]. Ces vocalises, nommées "unités sonores", sont de complexités variables : de durée limitée, bornées par 2

silences, de forte intensité acoustique (supérieure à 160 dB re 1uPa à 1m), avec une fondamentale basse fréquence (de l'ordre de 100Hz), avec ou sans harmonique ou formants pouvant s'étendre au-delà de 10kHz. Leurs caractéristiques temporelles et fréquentielles sont liées à l'anatomie de leur zone laryngée et à leurs motivations comportementales [RL07, ACG⁺13]. Certaines variations de ces caractéristiques ont été signalées et peuvent contenir une partie de l'information [ALSS05]. L'hypothèse principale est que ces chants jouent un rôle dans l'attraction des femelles d'après [WW78, MSS⁺94] (qui est contesté), et éventuellement dans la défense territoriale [Tya81]. mâles silencieux [FCHG95, DB01]. Baker et Herman ont émis l'hypothèse que les chants pouvaient permettre la synchronisation de l'ovulation [BH84]. Ces chants sont prédominants dans la zone de reproduction mais ont également été enregistrés lors de la migration, et de temps en temps dans la zone d'alimentation [CM90, CC04].

3.1.2 Géographie et chant

Miksis-Olds et al. [MOBN⁺08] indique que la structure des chants de BB de l'hémisphère Nord a été étudiée davantage que pour les populations de l'hémisphère sud.

Noad et al. [NCB⁺00] évoque la copie de chants entre les mâles de la côte est australienne et ceux de la côte ouest australienne. Les chants sont décomposés en unités sonores (un son continu entre deux silences); plusieurs unités formant une séquence, les séquences formant une phrase, plusieurs phrases formant un thème de chant [PM71b]. Celui-ci dure en moyenne 2 à 4 minutes, parfois plus de 10 minutes. Trois à neuf thèmes de chants peuvent former un chant.

3.1.3 Signature Géographique des chants

Les chants évoluent au cours d'une saison, d'une année à l'autre, avec des modifications substantiels de certaines unités sonores, la disparition de certaines et l'apparition de nouvelles. Les chants sont également différents d'une région à l'autre, et leur analyse permet donc de mesurer le degré de diversité des groupes en terme régional¹. Nous obtenons alors les classes de chanteurs suivant leur origine géographique - Voir notamment l'exposé de Glotin au symposium éthologie - cétologie à ERICE en octobre 2013.

¹Cette analyse est automatisé dans une publication à paraître (Doh, Razik, Adam, Glotin, Lavoisier 2014)

3.1.4 Méthodes usuelles de codage des chants

Plusieurs méthodes ont été suggérées pour détecter des unités sonores et les classer. Le filtre adapté et la corrélation de spectrogramme [MC00, APAM12] sont largement utilisés par la communauté de chercheurs en bioacoustique. Plus récemment, des techniques issues du traitement des images ont été déclinées pour analyser des représentations temps-fréquences, comme notamment la détection de contours [Gil04, MOCT08, MOS⁺08] et le Pitch tracking [ORBL07, SW09, BM11]. Urazghildiiev and Clark (2006) ont proposé une approche statistique basée sur le test du maximum de vraisemblance [UC06]. La mesure de l'entropie a également été appliquée avec succès [SBT06].

Plusieurs méthodes utilisées pour analyser la parole humaine ont été appliquées aux BB. En effet, on observe de nombreuses similitudes, notamment la présence de vocalisations de type voisées et non voisées, telles que définies dans Mercado et Kuh [MIK98]. Les unités sonores des baleines à bosse ont été analysées en utilisant le codage par prédiction linéaire (LPC) [MIK98], le contenu énergétique sur une fenêtre de temps spécifique [RT08], l'analyse spectrographique [SBT06], les coefficients cepstraux à échelle Mel (MFCC) [Hel96, MUB08, PAB⁺08, GGP⁺08], l'affinité de propagation [GGP⁺08], Kmeans [PBG⁺10], la classification par cartes auto-organisatrices (SOM) [MIK98, SBT06], les Modèles de Markov Cachés (HMM) [PWA11], la détermination de la longueur de fenêtre glissante par estimation de l'entropie (SWML) [SBT06] et les réseaux neuronaux. La grande variété des méthodes utilisées par les chercheurs pour analyser les vocalisations des baleines à bosse reflète la grande diversité de ces sons [HS06].

3.1.5 Concept d'unité sonore

Une des difficultés dans l'analyse automatique des chants de baleines à bosse est que ceux-ci sont évolutifs dans le temps, laissant penser que le nombre d'unités sonores est illimité. Dans le but de mieux analyser les chants d'une année sur l'autre et de populations de différentes régions, nous avons défini le concept de sous-unité [GGP⁺08, PWA09]. Nous suggérons que l'une ou plusieurs sous-unités sont présentes pour composer une unité sonore. L'intérêt de cette approche est de montrer que le nombre de sous-unités est restreint et qu'elles peuvent caractériser les unités des chants, non limitées, mais construites à partir des combinaisons de sous-unités temps-fréquences. Les travaux de F. Pace [PWA09], ne proposent pas un codage non supervisé sous contrainte de sparsité, l'analyse et le regroupement des vecteurs MFCC sont effectués par une simple analyse de voisinage (à différentes échelles de temps), sans extraire les éléments codant le plus efficacement les signaux (chants, articulations,...). Dans l'article de G. Picot [PAB⁺08], les auteurs construisent des classes d'unité de chant sur des mesures de fondamentale et de prosodie, suivies d'un regroupement en six classes avec un critère de Bouldwin. Mais ce regroupement est

dépendant de l'initialisation, problème connu des algorithmes KNN.

3.2 Proposition du codage parcimonieux pour transmission faible débit

H. Glotin a proposé au congrès SFA de Montréal en fev. 2013 et dans (Glotin ERICE 2013 que les unités de chant extraites par une décomposition parcimonieuse permet d'obtenir des représentations plus efficaces en suivi de population et localisation. Nous avons mis en oeuvre ce codage sur les signaux enregistrés dans FGAB, nous avons déterminé leurs composantes stables par rapport à celles qui évoluent, à des échelles de temps différentes. Nous proposons également une définition de la complexité du code, qui peut clairement séparer les composantes du chant de celles du bruit de mer.

Nous avons calculé les coefficients cepstraux à échelle Mel (MFCC) des enregistrements sonores. Cette approche, issue de l'analyse de la parole humaine, en échelle logarithmique, permet d'être moins sensible aux variations des hautes fréquences.

L'information pertinente des unités sonores est principalement portée par le fondamental et les premiers harmoniques (quand ils existent), c'est-à-dire par le contenu des bandes basses fréquences, entre 50 Hz et 4kHz. Deuxièmement, les harmoniques à plus haute fréquence sont moins énergétiques, moins stables Troisièmement, les hautes fréquences sont d'avantage déformées lors de la propagation acoustique. Le recours à l'échelle Mel nous permet de focaliser notre approche sur les basses fréquences qui sont donc les plus stables.

Ce codage transforme les enregistrements .wav en vecteur d'entiers qui sont les indices des mots du dictionnaire, donc en données beaucoup plus légères (on peut se référer à l'exposé de Glotin ERICE 2013² Ces données une fois indexées sont donc facilement émises sur 3G par exemple ou à faible débit si nécessaire. Nous validons donc par ce codage, la possibilité d'une transmission à faible débit si les contraintes sont fortes au niveau transmission. Un vecteur de 48000 valeurs réelles est résumé en 20000 indices booléens, ce qui réduit d'un facteur 16 le volume à transmettre.

Il sera intéressant de remonter vers nos serveurs un signal brute, afin de calculer d'autre représentation efficace comme par traitement en ondelette comme décrit ci-dessous.

3.3 Proposition de codage en ondelette et robustesse au bruit de récif

Les MFCC décrits plus haut sont des traits classiques suffisamment invariants pour permettre d'uniformiser les canaux. Cela dit d'autres traits plus avancés de-

²<https://agenda.infn.it/>

vraient être considérés dans l'avenir tels que les scalograms récemment proposés par Mallat et Anden en 2012 (ISMIR conférence). Il est intéressant de noter à cet égard que les MFCC correspondent aux premiers étages de traitement des scalograms, qui en sont une approximation.

3.4 Détection robuste aux échos et au bruit de récif

Nous avons démontré dans NIPS4B (Glotin et Balestrieri 2013) que l'analyse des invariants comme représenté ici (Anden and Mallat, 2012) est appropriée pour extraire des paramètres des émissions acoustiques de BB, en mettant en évidence des non-linéarités qui pourraient servir d'indicateurs d'une signature individuelle (Cazau et al., JASA 2012). Nos analyses en spectrogramme et scalogramme (ondelette de Gabor) montrent aussi que les effets d'échos sont très faibles dans l'ensemble des mesures effectuées couvrant l'ensemble du lagon (cf présentation des sorties en PJ). Nous illustrons ceci avec l'exemple ci-dessous du 20 juillet 11h30. Il en résulte la capacité de nos enregistreurs bas coût à dater précisément les émissions acoustiques des BB, ce qui est crucial pour les localiser. D'autres exemples de ce traitement sur d'autres jours sont donnés en annexe.

Ce codage est aussi valable pour les types 2, 3 et 4 qui sont décrits plus bas.

3.5 Type 2 : sons de plat, de pectorale ou caudale

Comme pour le type 1, ces sons doivent être correctement extraits pour être manipulables par des algorithmes de localisation.

Les sauts des BB ont probablement des fonctions multiples. Il a été observé que près de 20% des BB font des sauts, et que la probabilité qu'une baleine saute augmente avec le nombre de baleines (Krzyszczuk 2006).

Voici un son de splash que nous avons enregistré durant FGAB. D'autres sons de plat ont été enregistrés et comparés : le détecteur de plat est trivial, et ces informations renseignent sur l'activité et la nature du groupe enregistré.

3.6 Type 3 : détection de glotturales de femelle

Il a été récemment montré dans nos mesures à Madagascar en posant un TAG sur une mère qu'il est certain que les mères émettent de glotturales dont voici un échantillon :

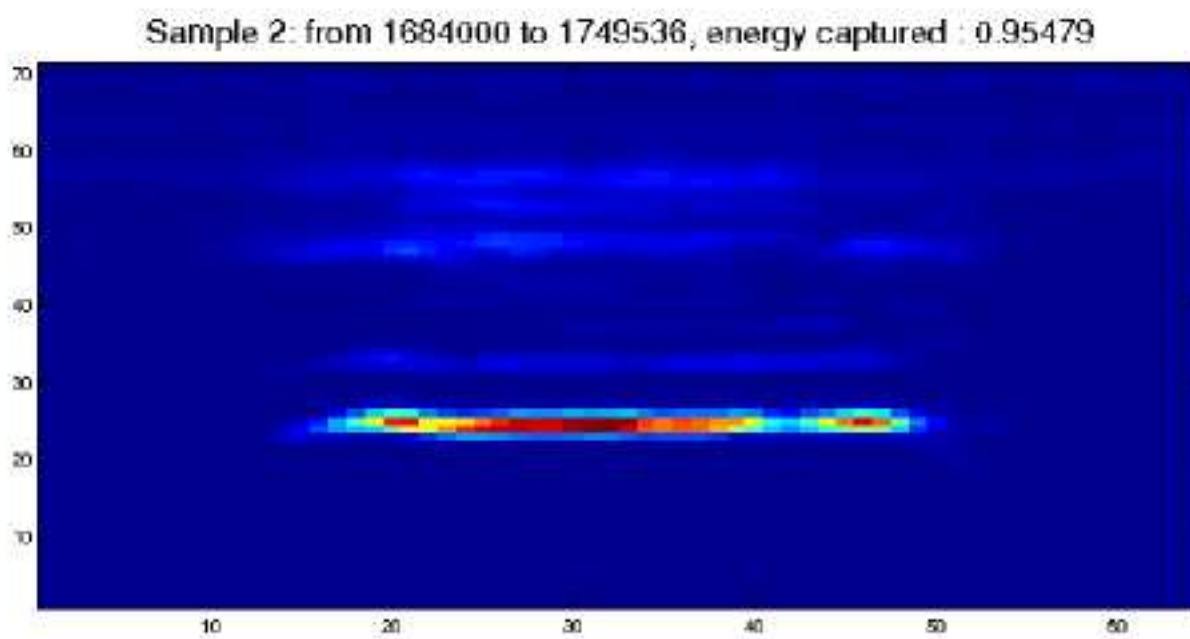
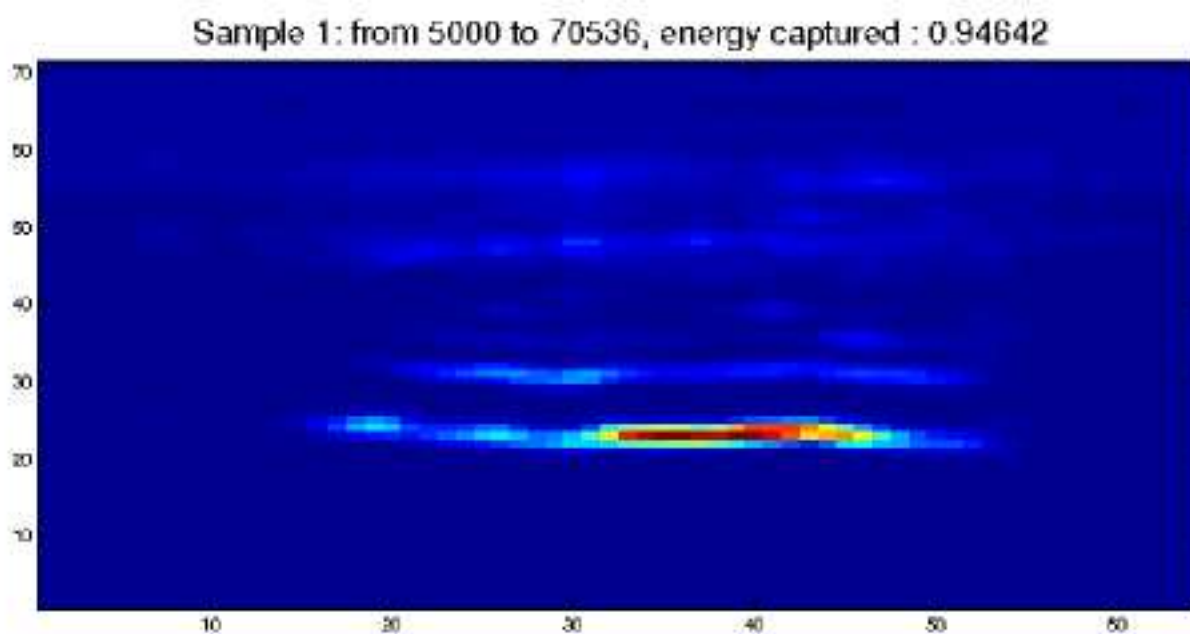


FIG. 3.1 – Représentation de vocalises de chant, montrant que le bruit de récif est éliminé par le traitement en ondelette (gauche) comparé au spectre de Fourier

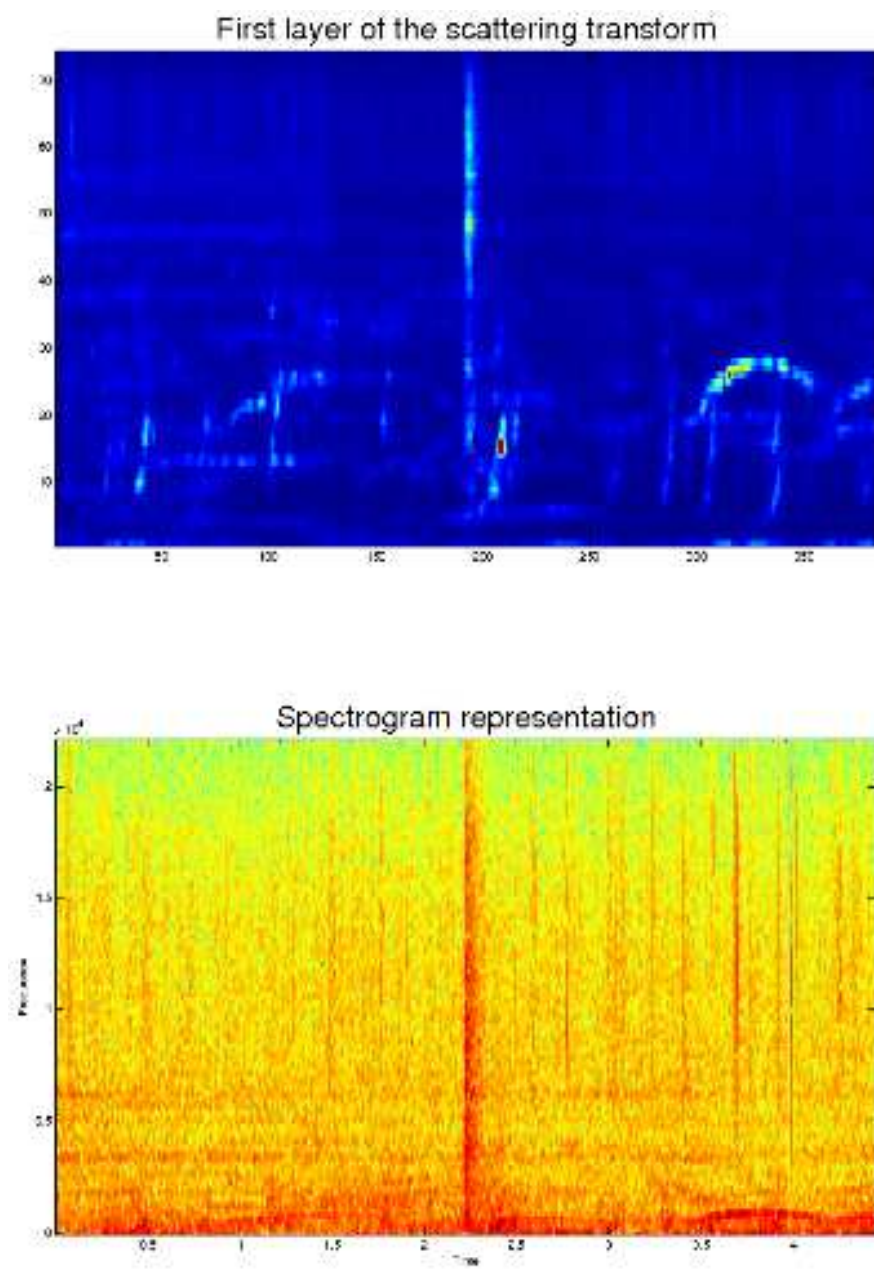


FIG. 3.2 – Représentation du plat de saut : l'énergie est évidente (barre)

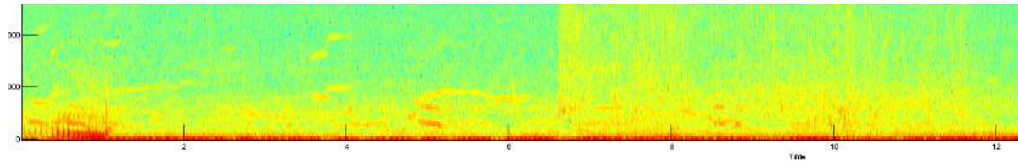


FIG. 3.3 – Glutturale de mère (enregistré sur l’animal en été 2013, facilement reconnaissable par rapport au chant des mâles, l’énergie n’excède pas les 2000 Hz (première marque).

3.7 Type 4 : détection de cris de bébé

Durant la même campagne de l’été 2013, il a été enregistré des cris supposés être ceux de jeune, car aucun mâle n’était dans le secteur, seul une mère avec son bébé, et les glutturales de la mère ont été identifiées par son TAG. Des surveillances au long terme permettront de confirmer cette hypothèse. Voici la représentation de ce cri de bébé, on remarque les composantes en haute fréquence (8kHz), bien au dessus des chants ou de glutturales de la mère.

3.8 Conclusion : détection et identification des groupes

3.8.1 Identification des groupes

Nous avons montré dans ce chapitre que la qualité des données acquises avec le matériel proposé permet des analyses propres, avec filtrage du bruit de récif. Ces signaux de type 1,2,3 ou 4 caractérisent les différents groupes : mâles, mère, bébé et mère et composition.

Nous avons aussi démontré que la propagation des signaux portent à au moins 15 km ce qui sera utilisé dans notre proposition Heracles.

D’une manière générale, nous avons démontré en 2013 la possibilité de classer automatiquement par réseaux de neurones les sons de plusieurs espèces de cétacés, ce qui évitera des confusions entre espèces (Halkias et al., Journal ASA novembre 2013).

3.8.2 Identification des individus

Nous avons montré le potentiel de différenciation des formes de vocalises suivant l’individu : les formes en temps et fréquence des chirp (pente) varient sur les trois fichiers, d’un locuteur à l’autre. L’étude biopopulation sera donc facilitée par ces données, notamment avec l’information de répartition en temps et espace d’un individu reconnu sur toute une saison, jour et nuit.

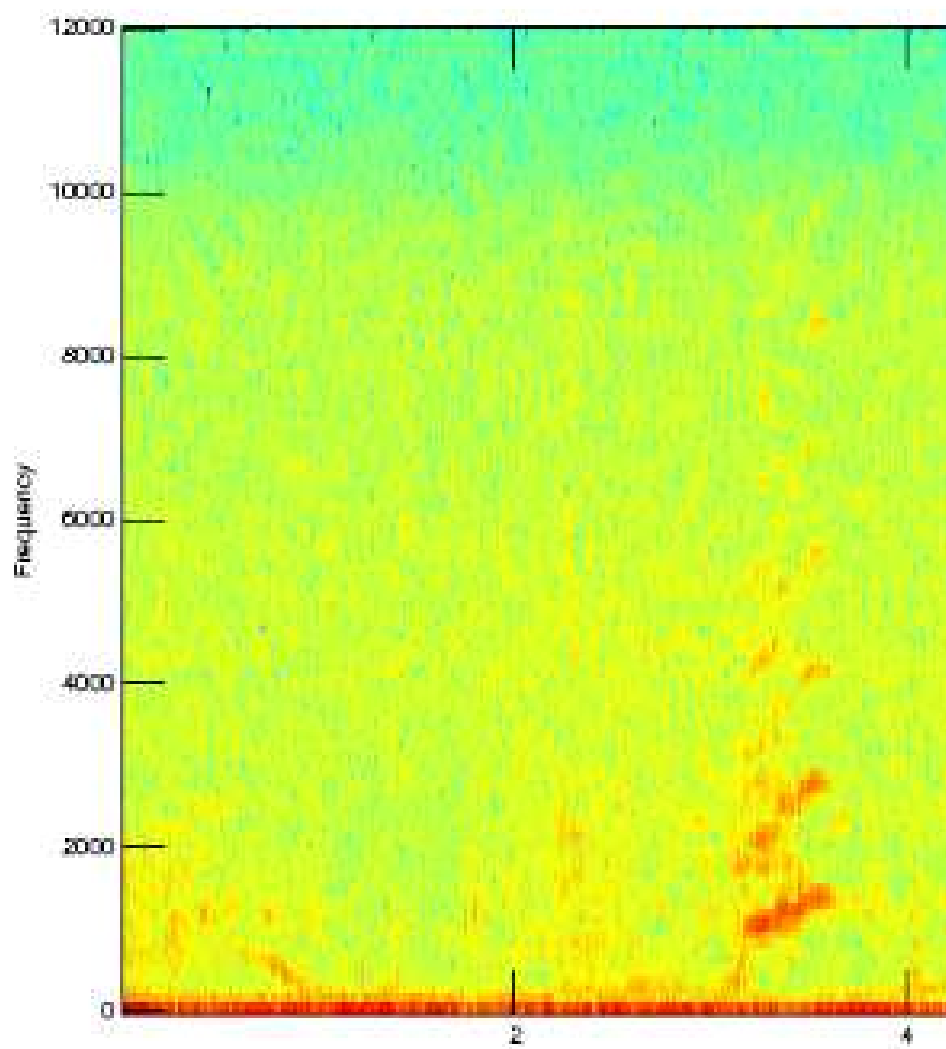


FIG. 3.4 – Voisement de bébé, remarquable car très élevé (8kHz) en fréquence.

Nous publions en 2013 dans la revue *Traitement du Signal Ingénieur - Lavoisier*, une méthode d'analyse parcimonieuse pour extraire des caractéristiques de vocalises de BB d'une façon totalement non-supervisée. Nous montrons alors que notre méthode permet de construire un dictionnaire et de classer les différentes unités sonores de différents individus sur différentes années (Doh et al., 2013).

Chapitre 4

Localisation par acoustique passive

4.1 Principe de la localisation par acoustique passive

4.1.1 Calcul de la position à partir des TDOA entre paires d'hydrophones fixes

Lorsque nous disposons de plusieurs hydrophones fixes, synchronisés dans le temps, dont les positions sont connues, et enregistrant conjointement la même source sonore, il est possible de la localiser selon le principe décrit dans la figure 4.1.

Chaque son émis par la source à un temps t_S (inconnu) est enregistré par chaque hydrophone i au temps t_i (connu). Le temps d'arrivée du son à l'hydrophone i ($t_i - t_S$) est proportionnel à la distance d_i entre la source et cet hydrophone : $d_i = (t_i - t_S) * c$, où c représente la vitesse du son dans l'eau (environ 1500 m/s).

Pour chaque paire d'hydrophones (i, j) , nous avons donc deux équations de distance :

$$d_i = (t_i - t_S) * c \quad (4.1)$$

$$d_j = (t_j - t_S) * c \quad (4.2)$$

Par soustraction (4.2) - (4.1), nous obtenons :

$$d_j - d_i = (t_j - t_i) * c \quad (4.3)$$

où $(t_j - t_i)$ est la différence du temps d'arrivée d'un même son aux deux hydrophones i et j . Elle se note $TDOA(j, i)$ pour Time Delay Of Arrival. Elle est directement mesurable à partir des enregistrements des hydrophones i et j , ce qui donne une estimation de la différence des distances entre la source et les deux hydrophones :

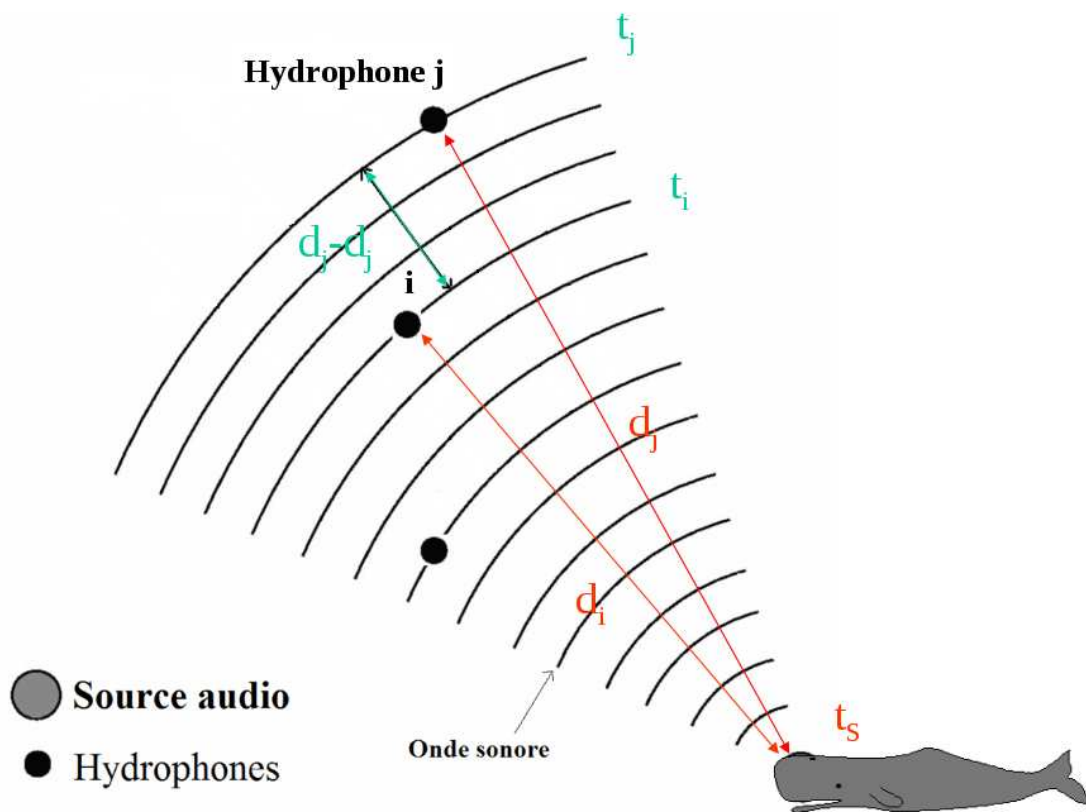


FIG. 4.1 – Principe d'utilisation du TDOA ou délai d'arrivée d'un même son à deux hydrophones ($t_j - t_i$) pour localiser une source. Le TDOA, mesurable à partir des signaux acoustiques, est proportionnel à la différence de distance entre la source et chacun des hydrophones : $d_j - d_i = (t_j - t_i) * c$, où c représente la vitesse du son dans l'eau (environ 1500 m/s). La connaissance de $d_j - d_i$ et de la position des hydrophones permet de déduire des informations sur la position de la source.

$$d_j - d_i = TDOA(j, i) * c \quad (4.4)$$

Si nous exprimons les distances en fonction des coordonnées (x_i, y_i) de chaque hydrophone i (connues) et des coordonnées (x, y) de la source (inconnues), nous obtenons :

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (4.5)$$

En remplaçant les distances de l'équation (4.4) par leurs expressions (4.5), nous obtenons pour chaque couple d'hydrophones (i, j) une équation à 2 inconnues $(x$ et $y)$:

$$\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} = TDOA(j, i) * c \quad (4.6)$$

En 2 dimensions, il suffit donc de 3 hydrophones pour obtenir un système de 2 équations à 2 inconnues :

$$\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = TDOA(2, 1) * c \quad (4.7)$$

$$\sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = TDOA(3, 1) * c \quad (4.8)$$

En 3 dimensions, il y a 3 inconnues $(x, y$ et z la profondeur) : il faut donc 3 équations indépendantes, soit 4 hydrophones :

$$\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = TDOA(2, 1) * c \quad (4.9)$$

$$\sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = TDOA(3, 1) * c \quad (4.10)$$

$$\sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = TDOA(4, 1) * c \quad (4.11)$$

4.1.2 Mesure des TDOA

Mesurer un TDOA revient à repérer le décalage temporel entre la capture d'un même événement acoustique par deux hydrophones différents et synchronisés. Lorsque les hydrophones sont proches, ce décalage est faible et donc plus facile à repérer (par exemple, pour des hydrophones distants de 150 mètres, le décalage temporel ne peut varier qu'entre -0.1 et 0.1 seconde). La méthode la plus rapide et la plus robuste consiste à réaliser un cross-corrélogramme entre les deux signaux sur des fenêtres synchrones de taille comparable au TDOA maximal puis à sélectionner le délai qui provoque le meilleur recouvrement (voir figure 4.2). Lorsque les hydrophones sont éloignés de plusieurs kilomètres, les TDOA sont plus difficile à mesurer car ils peuvent atteindre plusieurs secondes. Les cross-corrélogramme deviennent plus long à calculer car les fenêtres temporelles sont plus larges. Il faut en général adapter la méthode en repérant dans un premiers temps les événements identiques sur les deux enregistrements puis en calculant précisément leur décalage.

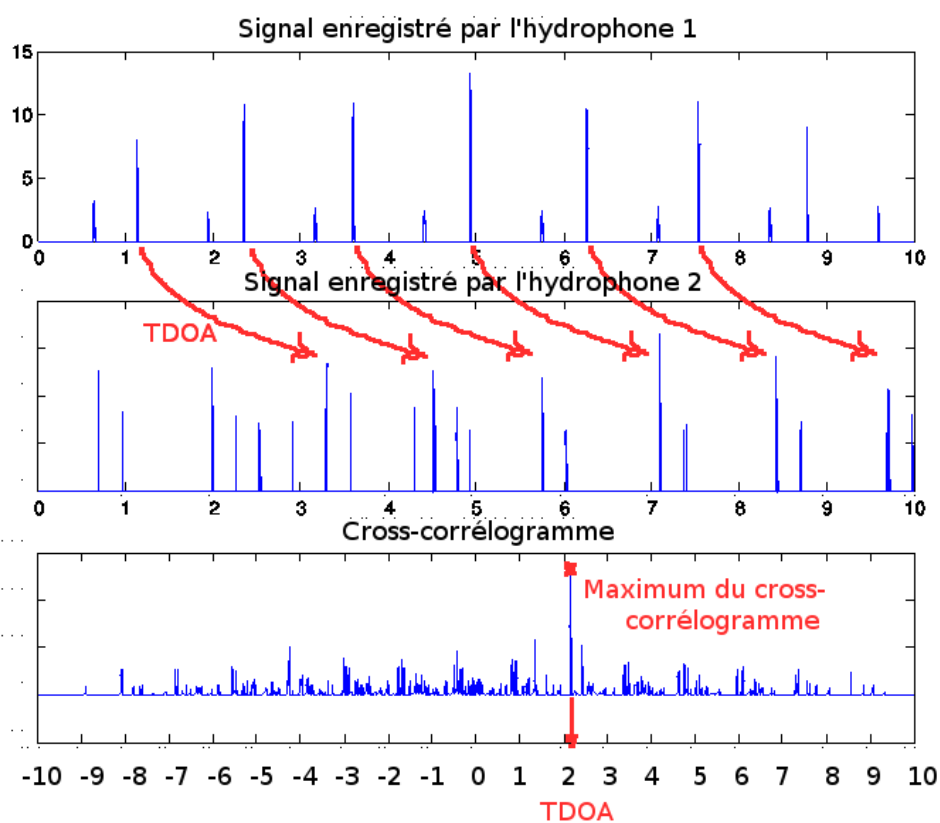


FIG. 4.2 – Principe de mesure du TDOA entre deux hydrophones : un cross-corrélogramme consiste à mesurer un indice de ressemblance de deux signaux pour différents décalages. Le maximum du cross-corrélogramme donne donc le décalage pour lequel les signaux sont les plus ressemblants, donc en général le TDOA.

4.2 Adaptation du protocole de localisation aux mesures faites dans le Lagon Sud

Pour pouvoir localiser précisément une source sonore, il faut donc réunir les trois conditions suivantes :

- enregistrement d'un même son par plusieurs hydrophones (au moins 3 pour la localisation en 2 dimensions ou 4 pour la localisation en 3 dimensions) ;
- ces hydrophones doivent être synchronisés dans le temps pour pouvoir mesurer les TDOA (différences de temps d'arrivée d'un même son à un couple d'hydrophones) ;
- ces hydrophones doivent être fixes et leurs positions parfaitement connues.

Ces trois conditions seront remplies lorsque les hydrophones seront installés à demeure dans le Lagon Sud, mais aucune des trois n'étaient évidemment remplie lors de la présente étude de faisabilité. Nous n'avions qu'un bateau donc un seul hydrophone mobile. Nous avons donc dû adapter ce protocole pour tester la faisabilité de la localisation.

- Etape 1 : Un enregistreur de son (GoPro) était fixé à une bouée dérivante et largué du zodiac à une position connue (mesure GPS).
- Etapes 2 et 3 : Ensuite l'hydrophone relié à l'ordinateur embarqué prenait des mesures successives en deux points différents, situés chacun à une centaine de mètres environ de la GoPro, et dont les positions exactes étaient mesurées par GPS. A chaque étape, une synchronisation des deux systèmes d'enregistrement était réalisé en émettant un son depuis le zodiac (coups sur la structure métallique).
- Etape 4 : Enfin, nous récupérons la GoPro en mesurant à nouveau sa position au GPS pour avoir une estimation de sa dérive durant le protocole et donc sa position aux étapes 2 et 3.

Cette adaptation a considérablement compliqué le traitement des données mais a permis de vérifier la faisabilité de la localisation. Les étapes supplémentaires de traitement, ont été les suivantes :

- Calculer les positions de tous les points de mesure d'après les coordonnées GPS. Pour les points d'enregistrement depuis le zodiac, il ne s'agissait que d'une conversion géodésique, mais pour les points de mesure GoPro, nous n'avions que les coordonnées GPS au moment du largage et au moment de la récupération. Nous avons donc du mesurer la dérive et interpoler les positions aux étapes 2 et 3.
- Synchroniser les différents capteurs en utilisant comme temps de référence le son émis depuis le zodiac. Pour cela il a fallu tenir compte du temps de propagation de ce son jusqu'à la GoPro, temps qui dépendait de sa position, elle-même estimée par extrapolation de sa dérive...
- Les deux mesures de TDOA utilisées pour la localisation sont successives au lieu d'être simultanées. Cette différence ne change rien si la source ne se déplace pas, mais crée une erreur de localisation si la source est en déplacement. Nous

avons considéré pour le test que le déplacement de la source était négligeable entre les étapes de mesure 2 et 3 (séparés de quelques minutes).

4.3 Exemple de localisation dans le Lagon Sud

Malgré toutes les complications du protocole pour déterminer la position des capteurs et les synchroniser, nous avons pu tester avec succès le protocole de localisation. Voici un exemple de tous les résultats intermédiaires obtenus lors de la triangulation réalisée à l'est de l'îlot Ugo le 25/07/2013 entre 12h et 12h30.

4.3.1 Position des différents capteurs

Les positions des différents capteurs ont été

- soit mesurées par GPS (pour l'hydrophone embarqué, et pour les points de largage et de récupération de la GoPro),
- soit estimées en tenant compte de la dérive (pour les positions de la GoPro aux étapes 2 et 3).

Elles sont récapitulées dans le tableau suivant.

	Etape 1 (largage GoPro)	Etape 2 (1er TDOA)	Etape 3 (2e TDOA)	Etape 4 (récup GoPro)
heure locale	12h04mn36s (mesure GPS)	12h06mn05s (mesure GPS)	12h11mn47s (mesure GPS)	12h22mn50s (mesure GPS)
latitude GoPro	2226.4788 (mesure GPS)			2226.4763 (mesure GPS)
longitude GoPro	16656.2451 (mesure GPS)			16656.3697 (mesure GPS)
latitude hydro	Idem GoPro	2226.4101 (mesure GPS)	2226.5426 (mesure GPS)	Idem GoPro
longitude hydro	Idem GoPro	16656.3230 (mesure GPS)	16656.4206 (mesure GPS)	Idem GoPro
coord (x,y) GoPro (mètres)	(0,0) (pt de référence)	(17.3523,0.3767) (estimation dérive)	(84.0317,1.8241) (estimation dérive)	(213.2963, 4.6300) (transfo géodésique)
coord (x,y) hydro (mètres)	Idem GoPro	(133.353,127.2324) (transfo géodésique)	(300.4294,-118.1576) (transfo géodésique)	Idem GoPro
distance entre capteurs (mètres)	0	171.8969 (calcul d'après coord)	247.4339 (calcul d'après coord)	0

4.3.2 Mesure des TDOA

Nous avons ensuite calculé les TDOA des différents événements acoustiques capturés conjointement par l'hydrophone embarqué et la GoPro aux étapes 2 et 3. Les deux capteurs ont été synchronisés grâce à des coups portés sur la structure

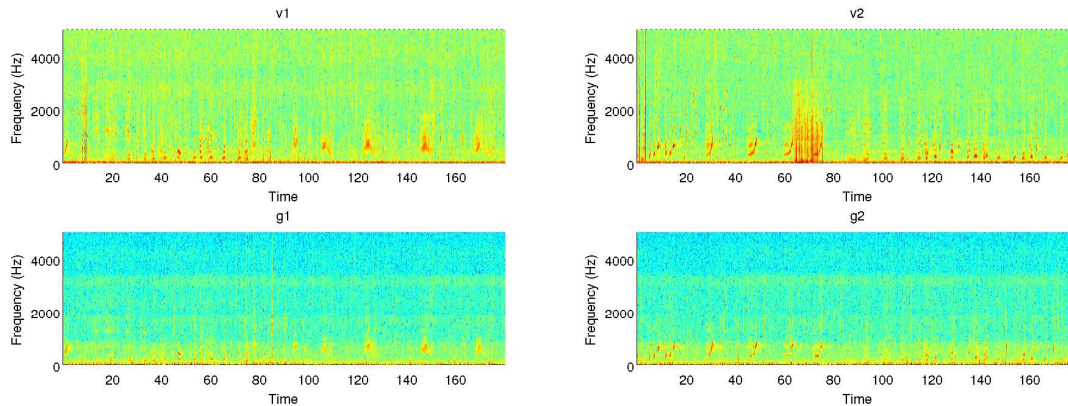


FIG. 4.3 – Spectrogrammes (représentation temps-fréquence) des quatre signaux utilisés pour les mesures de TDOA : en haut, l’hydrophone embarqué, en bas la GoPro, à gauche l’étape 2, à droite l’étape 3. Malgré le bruit inhérent à la manipulation des hydrophones, nous voyons que les deux capteurs ont enregistré les mêmes événements acoustiques, qui seront utilisés pour mesurer les TDOA par cross-corrélation.

métallique du zodiac, en tenant compte du temps de propagation de ce son jusqu’à la GoPro. Malgré les différentes difficultés inhérentes à la mobilité des capteurs, la figure 4.3 nous montre bien que les deux capteurs ont enregistrés les mêmes événements acoustiques qui nous ont permis de mesurer leurs TDOA.

	Etape 2 (1er TDOA)	Etape 3 (2e TDOA)
TDOA mesuré (secondes)	-0.1010 (pour $c=1480\text{m/s}$)	-0.0777 (pour $c=1480\text{m/s}$)

4.3.3 Localisation et discussion

Le résolution du système d’équation (4.7) pour les valeurs de position et les TDOA présentées ci-avant et pour $c=1480\text{ m/s}$ donne une position (x,y) de la source de $(700, 269)$, ce qui correspond à une latitude de 2226.3333 et une longitude de 16656.6543 (position représentée dans la figure 4.4). Pour des valeurs de célérité légèrement différentes, le calcul des positions de la source donne des résultats peu variables : $(x,y)=(726, 280)$ pour $c=1460$, et $(x, y)=(677, 260)$ pour $c=1500\text{ m/s}$.

Bien que la baleine n’ait pas été observée par la vigie, la position calculée nous semble à peu près correcte au regard de l’intensité sonore enregistrée, et du fait qu’un effet de masque était observable au même moment au sud d’Ugo.

Nous souhaiterions insister sur la fait que les trois principales sources d’erreur sur cette localisation proviennent :

- du fait que la position des capteurs n’est pas connue exactement : la dérive est considérée comme linéaire à vitesse constante, ce qui est très approximatif ;

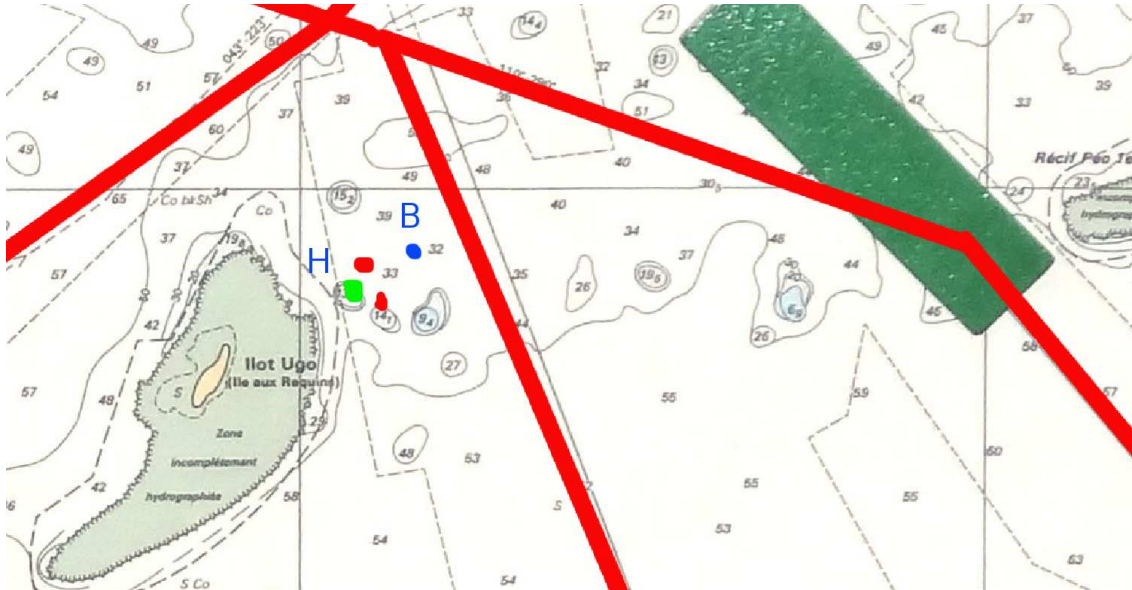


FIG. 4.4 – Résultats de la localisation obtenue à l'est de l'îlot Ugo le 25/07/2013 entre 12h et 12h30 : en rouge les positions de l'hydrophone embarqué, en vert les positions estimées de la GoPro aux étapes 2 et 3 (par extrapolation de la dérive observée entre les étapes 1 et 4), et en bleu la position calculée de la source.

- du fait que les deux capteurs ne sont pas synchronisés dans le temps : le signal a pu être resynchronisé en envoyant un son depuis le zodiac capté par la GoPro, mais le temps de propagation du son a été estimé à partir de positions approximatives, et est donc lui aussi approximatif, ce qui réduit la précision de mesure des TDOA ;
- les deux TDOA ont été mesurés à 5 mn d'intervalle, au lieu d'être simultanés : si la source s'est déplacée entre les deux mesures, le système d'équation peut donner une solution qui manque de précision. Ces trois sources d'erreurs disparaîtront lors de l'installation d'hydrophones fixes dans la zone.

4.4 Préconisations pour la localisation automatique dans le Lagon Sud

4.4.1 Organisation des hydrophones

Pour localiser en 2 dimensions les individus chanteurs dans le Lagon Sud, il faut donc que chaque source puisse être captée simultanément par au moins 3 hydrophones synchronisés dans le temps et dont les positions sont parfaitement connues.

- Des triplets d'hydrophones : Compte-tenu des nombreux caches acoustiques que constituent les îlots, nous pensons qu'il est plus sûr d'organiser les capteurs

par groupes de 3 hydrophones assez proches pour enregistrer systématiquement la même source, mais assez éloignés pour que les mesures de TDOA soient suffisamment précises. Pour une fréquence d'acquisition de 48 kHz ou plus, une centaine de mètres, comme testé lors de la campagne de mesures, nous semble un bon compromis.

- Des positions précisément connues : les hydrophones doivent être soit fixes à des positions connues, soit fixés à des bouées dont les positions doivent être régulièrement contrôlées par GPS. Une imprécision dans la position des hydrophones provoquerait des erreurs de localisation.
- Des capteurs synchronisés : Les triplets d'hydrophones utilisés pour capter la même source doivent être parfaitement synchronisés, soit en étant connectés à un même système d'enregistrement, soit en étant reliés à des systèmes synchronisés entre eux.

4.4.2 Position des triplets

Les différentes positions des triplets d'hydrophones devront être déterminées en fonction de la zone à quadriller, et de la position des îlots qui constituent autant de caches acoustiques. Par exemple, un triplet d'hydrophones installé au sud du phare de Bonne Anse permet de couvrir la large zone centrale du Lagon Sud (en rouge sur la figure 4.5), un triplet placé à l'est de l'îlot Ioro ou Nouaré permet de couvrir l'entrée est du lagon (en vert sur la figure 4.5), et un triplet fixé au niveau du phare Woodin permet de localiser les animaux dans le canal (en bleu sur la figure 4.5). Pour couvrir une zone plus étendue, il serait peut-être aussi intéressant de placer un triplet dans la baie, ainsi qu'un au sud des îlots Ugo ou Ua pour repérer l'arrivée d'animaux par le sud.

Chapitre 5

Proposition de système complet

5.1 Notre savoir faire en système de surveillance acoustique de BB

Nous avons dans le cadre de la thèse de Y. Doh (école doctorale Mer & Science de l'UTLN, dir. H. Glotin, co-dir. O. Adam), installé depuis 2 ans le premier réseau d'enregistrement de BB dans l'Océan Indien, à l'est de Madagascar (Ste Marie). Ce projet nommé Baobab (Balise et acoustique pour l'observation des BB), repose sur des capteurs connectés à terre le long de l'île de Ste Marie, littoral de plages comportant des infrastructures lourdes à proximité (hotel de luxe). Ainsi trois réseau de trois hydrophones ont été mis en place en 2013. Le volet acoustique de ce projet englobe toutes les méthodes d'enregistrement des activités acoustiques des baleines qui viennent se reproduire dans le canal de Sainte Marie et représente l'état de l'art en la matière (chants mais aussi pectorales, bruits de relation mère bébé).

Dans Baobab les 3 lignes d'hydrophones sont équipées de trois micros chacune. Elles sont disposées sur des sites permettant de couvrir toute la partie sud du canal de Sainte Marie et en tenant compte de la logistique nécessaire à leur déploiement (bathymétrie, accès à la mer, alimentation électrique, stockage du matériel). Ce réseau d'hydrophones enregistre 24/24 heures et en temps réel les chants de BB. Près de 5To d'enregistrements ont pu déjà être envoyées à notre équipe à UTLN qui traite ces données dans le cadre de cette thèse. Nous nous intéressons à la localisation, mais aussi à la densité acoustique, c'est-à-dire la variation des activités vocales durant la saison (d'une semaine à l'autre, d'un mois à l'autre), et aussi d'observer les variations diurnes vs nocturnes. A plus long terme, nous observerons aussi l'évolution du contenu des chants d'une année sur l'autre pour tenter de la quantifier. La saison 2014 sera dédiée à affiner notre dispositif et à cumuler davantage d'enregistrements.

Des détails sont disponibles sur :

<http://cetamada.com/2013/11/recuperation-des-hydrophones-a-lile-sainte-marie-2> et un article est en rédaction sur les premières synthèses 2012-

2013.

5.2 Discussion sur les possibilités de systèmes

Etant donnée la distance à la côte des points d'intérêts pour la surveillance des BB dans le Lagon Sud, nous proposons un autre type d'infrastructure, que nous désignons dans la suite par l'acronyme 'HERACLES'¹

5.2.1 Avantage des bouées

Une bouée ne requière pas de gros moyen pour être posée sur 50 mètres de fond, alors qu'un atterissage de cable demande de grande longueur de cable à protéger des récifs et des courants, tout en abîmant les coraux. Une bouée étant mobile, si une position s'avère inutile, la bouée peut être remplacée sans trop de frais sur un autre point.

5.2.2 Inconvénient des bouées

Un bouée est mobile, donc peu d'instruments sont disponibles en périphérie de la bouée. L'hydrophone sera clipé sur la drisse de la bouée par mois 15 mètres environ, comme dans le cas des mesures effectuées durant FGAB.

5.3 Les géométries possibles

Trois géométries sont possibles et une combinaison de deux d'entre elles.

5.3.1 Base courte

Une base courte correspond dans notre cas à un tétraèdre de 3 m de côté, pour un fréquence d'échantillonnage d'au moins 96 kHz, et une rigidité importante, donc une masse importante et une consommation élevée, pour une fixation sur un socle. Ce n'est donc pas une solution pour HERACLES.

5.3.2 Base moyenne : $100m < d(B_i, B_j) < 500m$

Une base moyenne correspond à des espaces inter-capteurs de l'ordre de 100 à 500m. L'avantage est maintenance groupée en 4 sites seulement. L'inconvénient est qu'il faut pour couvrir le Lagon encore plus de matériel. les mouvements locaux de bouée de quelques dix mètres sont important ((5% à 10% de la base). Cette base cependant détecte bien des signaux faibles à proximité.

¹(Humpback whale Real-time Acoustics in Caledonia for Localisation, density Estimation and Survey)

5.3.3 Base longue : $2000m < d(B_i, B_j) < 5000m$

On définira une base longue par des micros espacés de 2000 mètres environ, en tous les cas 4 à 5 fois plus espacés que la base moyenne. La couverture de détection de la base est alors plus grande et les mouvements locaux de bouée de quelques dizaines de mètres deviennent négligeables (1% de la base seulement). Une telle base est réalisable si le signal à bruit suffisant de la cible est suffisant, ce qui est la conclusion de l'étude d'atténuation faite plus haut. La pose et la maintenance ne sont pas plus coûteuse que pour une base moyenne, et bien moindre que pour une base courte.

5.3.4 Base longue de bases moyennes

Nous proposons un compromis pour tirer parti des avantages des deux types de base (moyenne et longue) en allongeant au maximum raisonnable trois bases moyennes principales (9 hydrophones donc), pour former trois bases solides, qui sont complétées par 3 autres hydrophones qui eux forment des bases longues avec les hydrophones des bases moyennes.

Cette géométrie permet également de tirer partie des effets de masquage pour décider rapidement de secteurs d'activité acoustique par simple soustraction des énergies de fenêtres de signal de longueur supérieure au délai maximum. L'intersection des demiplans ainsi définis peut renforcer les localisations obtenues par notre brevet.

Cependant, les délais, et notamment en base moyenne, restent indispensables pour séparer plusieurs sources acoustiques concurrentes.

5.4 Justification de la géométrie d'HERACLES

L'installation minimale que nous proposons est constituée de deux triplets hydrophones disposés comme représentés dans la figure 5.1. Ce choix est la résultante de trois constatations :

- ces deux triplets permettent une localisation des sources sonores dans pratiquement toute la zone d'étude comprise dans un rayon de 5 miles nautiques autour du cap Ndoua (les seules zones d'ombre étant la baie de Prony et le nord de Ioro) ;
- ils couvrent une grande partie de la trajectoire fréquemment empruntée par les navires de la sortie est du canal de Woodin au canal de la Havannah ;
- ils ont une position centrale par rapport aux zones où les plus fortes densités d'individus ont été observées en 2009 par C. Garrigue et A. Schaffar ² dans un rayon de 5 miles nautiques autour du cap Ndoua.

Ce dispositif minimal peut être complété à volonté par d'autres triplets ou par des hydrophones isolés placés aux positions stratégiques.

²C. Garrigue et A. Schaffar - Rapport Etude pour PS sur BB en Lagon Sud, 2009

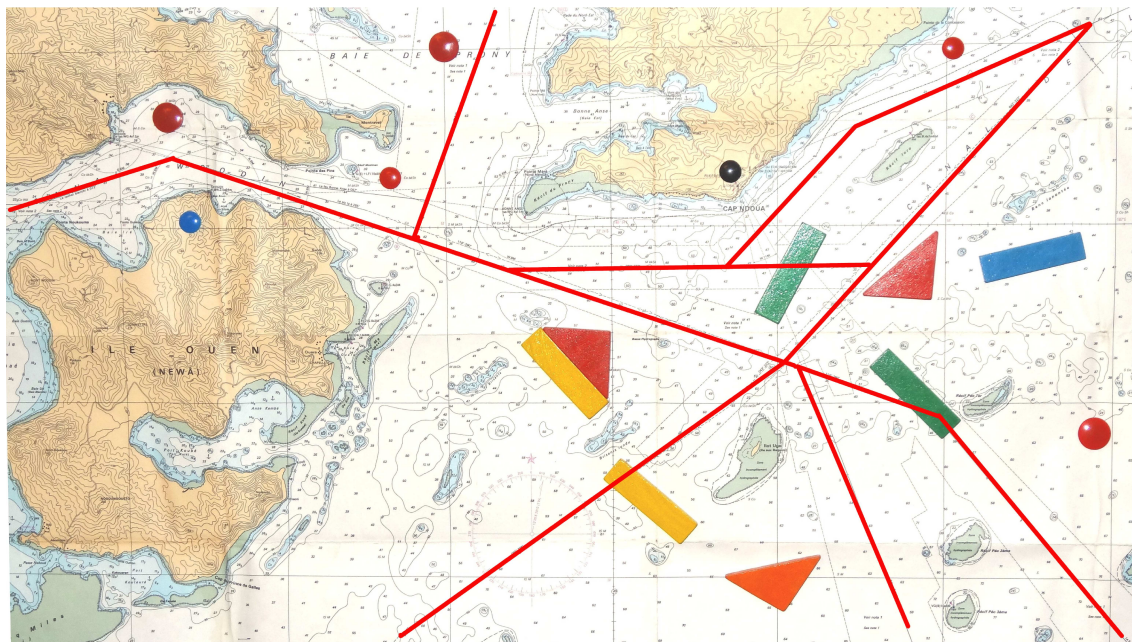


FIG. 5.1 – Représentation des positions des bouées proposées pour HERACLES. Les triangles sont les bases moyennes, les points rouges les bouées complémentaires. Les positions courantes des cétacés sont les barres, les rails de trafic sont en rouge.

Pour l'exemple en figure 5.2 nous donnons à budget constant deux autres configurations de bouées, avec Woodin en priorité au lieu du sud du Lagon (simple permutation des bouées Sud avec celles de Woodin).

Dans le dernier exemple en figure 5.3, nous donnons à budget constant deux autres configurations de bouées, avec Woodin en priorité au lieu du sud du Lagon (simple permutation des bouées Sud avec celles de Woodin).

Chaque triplet permettra un élargissement de la zone de localisation, tandis que les hydrophones isolés permettront une détection des animaux (sans localisation) dans les zones où la position exacte présente un intérêt moindre.

5.5 Technologie des bouées d'HERACLES

Nous proposons de poser une douzaine de bouées, chacune possédant deux petits panneaux solaires (30 cm x 30 cm) et une petite antenne lineaire GSM de 1 mètre sur le dessus. Cette solution permet un déploiement lointain pour couvrir une plus grande zone, le Lagon étant très étendu et aucune infrastructure évidente ne permettant un atterrissage efficace. Par contre le Lagon est remarquablement équipé en GSM de part sa station sur cap Ndoua (remarquable au niveau du Pacifique entier). Chaque bouée sera en transmission 3G avec le Cap Ndoua. Chaque bouée, ancrée à un corps mort entre -40 et -60 mètres, portera environ 40 kg de matériel, dont un caisson (tube classique étanche) qui flottera sous la bouée.

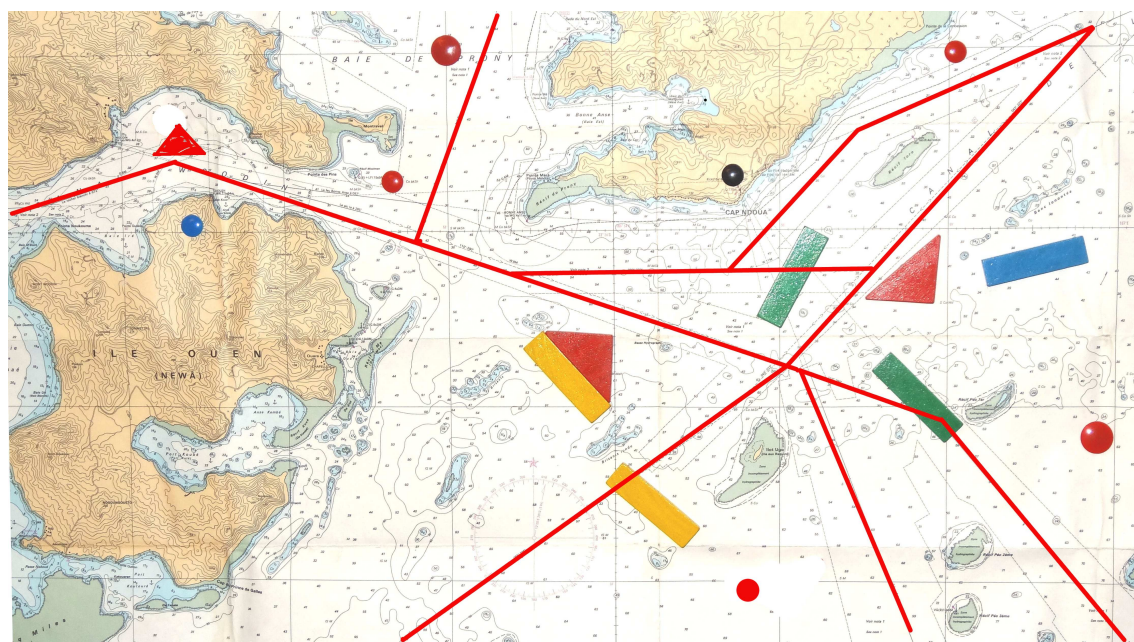


FIG. 5.2 – Représentation des positions des bouées proposées pour HERACLES avec le même budget que précédemment, mais donnant priorité sur la localisation à l'intérieur de Woodin au lieu du sud du Lagon. Les triangles (rouges) sont les bases moyennes, les disques rouges les bouées complémentaires. Les positions courantes des cétacés sont les barres, les rails de trafic sont en rouge.

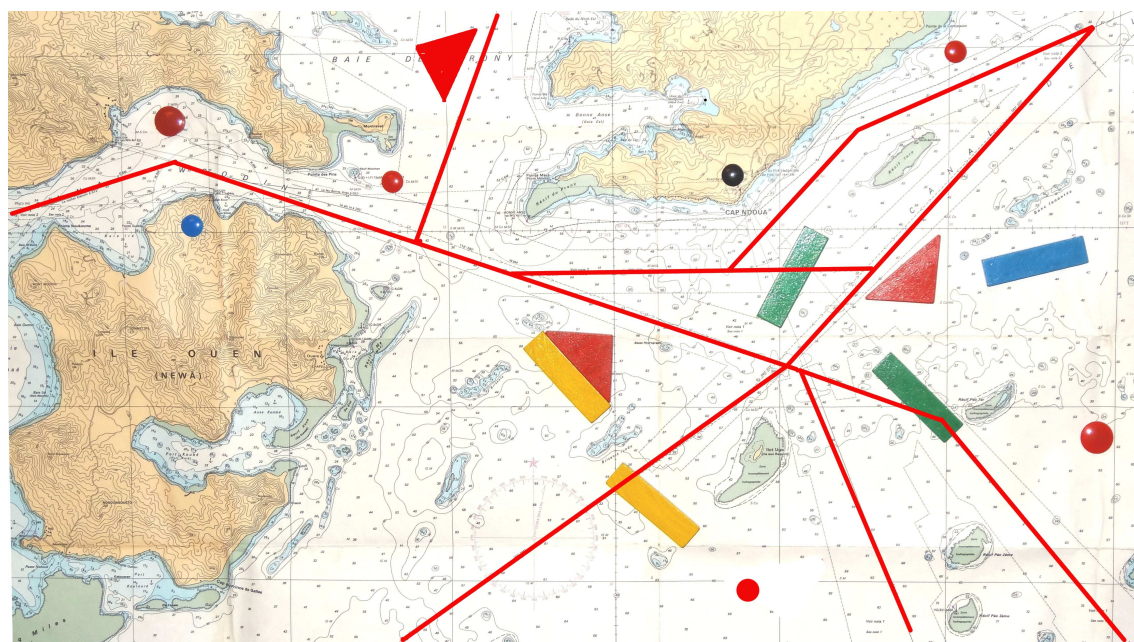


FIG. 5.3 – Représentation des positions des bouées proposées pour HERACLES avec le même budget que précédemment, mais donnant priorité sur la localisation à l'intérieur de la baie de Prony en face de Vale, au lieu du sud du Lagon. Les triangles (rouges) sont les bases moyennes, les disques rouges les bouées complémentaires. Les positions courantes des cétacés sont les barres, les rails de trafic sont en rouge.

Nous avons déjà une expérience de tel tube instrumenté : nous en avons conçu un pour une bouée de surveillance acoustique au sud de Port-Cros que nous installons (projet BOMBYX dans le cadre du sanctuaire cétacés Pelagos PI Glotin).

Notre équipe a donc de l'expérience sur les contraintes et des solutions pour réaliser de tels systèmes embarqués. Le rayonnement solaire sur le lagon alimentera facilement la batterie présente dans le tube et assurera aussi un fonctionnement nocturne qui est important : il donne le niveau acoustique de référence, les nuisances anthropiques étant alors plus faibles, et les détections de BB augmentées.

La technologie HERACLES est simple et robuste, peu coûteuse. Elle repose sur une carte mini PC 'BeagleBoard' (10 cm x 10 cm) que nous avons déjà programmée pour des mesures bioacoustiques dans le Parc National de Port-Cros (voir le rapport de master d'Olivier Dufour 2012 (maintenant en thèse dans DYNi financé ADEME sur sujet connexe). Les scripts d'enregistrement sont ceux que développent DYNi depuis 2007 en acquisition et traitement bas niveau des signaux. Ils sont très robustes pour des usages longue durée (testés sur Port-Cros durant près de un mois en continu sans interruption, fonctionnement sans bug pour plusieurs semaines donc sans interruption grâce au système OS Linux). Nous avons notamment un cycle complet de MASTER informatique que nous formons sur ce matériel dans notre département d'informatique composés de 10 collègues enseignants chercheurs.

Les sons seront directement enregistrés sur la carte de numérisation 48kHz et 16 bits intégrée à la Beagle Board (carte stéréo, permettant une extension stéréo dans une suite). Nous avons conçu depuis 2008 un boîtier électronique très simple alimenté sur l'USB de la beagle board qui alimente en tension le micro CR55 de Cetacean Research Technology (qui est d'ailleurs intéressé par notre alimentation USB-CR55). C'est avec ce matériel que nous enregistrons les cétacés du PNPC Pelagos, et que nous avons travaillé dans FGAB. Il en découle que cette technologie est donc validée sur les signaux de BB, ce qui est une avancée pour un bon rapport qualité / prix d'HERACLES.

5.6 Transmission temps-réel des sons

La beagle board permet la connection d'un modem GSM. Chaque bouée relayera par défaut environ 3 minutes de signal toutes les 9 minutes (FS de 32kHz), jour et nuit, tous les jours. Les dates de transmissions des bouées pourront être décalées / reprogrammées pour en cas assurer une observation en continu en jouant sur une minute de décalage entre les bouées, ce qui offre alors une écoute en continu lors de présence des cétacés. Du fait de la communication montante et descendante GSM, la fréquence d'échantillonnage pourra aussi être revue en ligne, et varier de 10kHz pour une transmission pratiquement continue à 48kHz pour le suivi d'espèces émettant en plus haute fréquence (dauphin, baleine bec (début de bande seulement)).

Les données transiteront par le très efficace réseau téléphonique que nous avons testé

sur site, et qui doit sa qualité à l'excellente situation de l'antenne réceptrice d'OPT, sur le cap NDOUA à environ 150 mètres d'altitude ce qui assure une connection depuis pratiquement tout point du Lagon.

Les calculs de détection et de localisation sont alors exécutés sur nos calculateurs Toulonnais qui seront maintenus et adaptés pour être constamment les plus efficaces en fonction des différents bruits. Les résultats sont alors mis immédiatement sur un serveur web protégé, accès programmé pour qui sera désigné par PS. L'ensemble transmission + calcul n'exédera pas 3 minutes, les liaisons internet étant très efficaces. En cas de souhait, un serveur de calcul pourrait être déplacé sur PS.

Des détails techniques de la bouée sont sur le devis que l'on a proposé et fait chiffrer à Osean, PME qui est à 5 minutes de l'université de Toulon.

5.7 Coût du matériel, son installation et fonctionnement

Livraison

La livraison des tubes, environ 10 kg chacun, 60 cm de long sur 10 de diamètre, pourrait-être assurée comme matériel scientifique depuis l'université de Toulon vers ses collègues régulièrement en mission ou en détachement à l'IRD de Nouméa, ce qui assure un circuit logistique efficace (plusieurs instruments transitent régulièrement entre ces deux sites) et réduit les coûts

Le coût est d'environ 600 euros le metre cube de fret (à préciser), par exemple avec la société SDV Logistique Internationale du Havre.

1 metre cube semble suffisant pour l'envoi du premier lot de 8+1 tubes electronique complet.

5.7.1 Ressource humaine

Un CDD sera nécessaire, pour finaliser les détails techniques en relation avec notre expertise et celle de PME Toulonnaise. Il devra installer le matériel, vérifier son fonctionnement, et intervenir sur l'informatique, voir le remplacement d'éléments durant l'opération. Il serait sur le site durant la pose et le fonctionnement la première année.

Nous détaillons cet aspect car nous savons que ces projets peuvent être accéléré par des acteurs efficaces sur le terrain et connaissant l'installation, adaptent les calculs à la géométrie et qualité de l'installation qu'il maîtrise. Il pourra en cas de mauvais choix de géométrie proposer et effectuer un déplacement d'une bouée sur une autre position, ce qui est un avantage majeur de la solution par bouée, contrairement aux cables à fixer sur fond avec un atterrissage toujours très complexe et abîmant le littoral (tranchée, béton immobile).

En l'occurrence, nous suggérerions un post doctorant expert en installation d'observation bioacoustique des baleine à bosses, qui fini sa thèse sous la codirection de H. Glotin cette année : Yann Doh. Il est diplômé en acoustique du master de l'école centrale de Marseille. Il a participé à nos programmes PELAGOS DECAV et BOMBYX durant sa thèse, avec des réalisations efficaces sur le terrain, mais aussi des avancées algorithmiques nettes. Il a de plus réalisé en été 2013 une installation de 9 hydrophones cablés vers les hôtel de St Marie à Madagascar, ce qui nous permet d'avoir des enregistrement en continu des passages de cétacés. Remarquons à ce sujet que la solution par cable ne convient pas pour Le Lagon Sud car nous avons besoin d'observer sur une plus grande zones les BB, et de plus aucun site d'atterrissage avec courant et protection n'est disponible sur le littoral ou îlot, c'est pourquoi nous n'avons pas retenu cette solution cablée qui est efficace sur St Marie. Ce doctorant pourrait également former à l'usage du système de l'université des acteurs de PS ou autre.

Un coût annuel d'un post doc s'élève à 65 Keuros. Nous avons discuté de ce projet, et l'intéressé Y. Doh est très motivé par ce projet qui cadre parfaitement avec ses compétences scientifiques et techniques, et ses projets personnels.

Coût total avec fonctionnement

Le fonctionnement du système n'engendre pas plus de coût qu'un abonnement téléphonique classique, environ 35 euros par mois, et ce pour chaque bouées. Pour le premier lot de 8 bouées et trois mois de fonctionnement, il s'agit donc d'environ 30x8x3 soit 720 euros de fonctionnement.

Il serait bon de prévoir un lot de panneau solaire, antenne et tube en cas de besoin de remplacement. Ce qui monte à 9 le nombre de système électronique, 8 systemes flotteurs à poser et 8 en fonction, plus le postdoctorant la premiere année. A terme, nous pensons que le système est suffisamment simple pour être branché et mis à l'eau par l'équipe depose les années suivante. A noter que la relève des bouées en fin de saison est compris dans le devis, et que les corps morts sont réutilisés d'une année à l'autre.

5.7.2 Travaux du CDD

Le CDD devra suivre un pan de réalisation répartir son travail comme suit :

- + 2 mois pour préparer les scripts informatiques des bouées (communication GSM, réglage à distance, gestion de l'alimentation),
- + 2 mois pour concevoir réception et calculs en RT sur le serveur de calcul avec notre brevet (que nous proposons d'assumer en convention pour réduire les coûts),
- + 1 mois pour production RT de la fiche de résultats cryptés pour PS sur https, cela se fera en appui avec notre expertise en développemnt système embarqué et crypté de mon département informatique

- + 3 mois pour intégrer et assembler sur site les bouées et les tester,
- + 4 mois pour la saison sur site pour intervenir / régler si défaut.
- + frais mission = 1 AR avion pour lui et 1 AR pour moi qui viendrait 2

Total CDD / homme sur site + mission sur site = environ 65 keuros

5.8 Conclusion : coût de la bouée et coût complet

Le prix d'une bouée électronique complète plus pose = environ 10 000 euros (= (électronique + pose et fixation) = 8730 + 1250 = 10 000 euro³

Il faut rajouter le frais de port de l'électronique de Toulon à PS, un lot commun pour toutes les bouées. Les bouées ne sont pas déplacées vers Toulon, sauf une qui fait l'aller retour pour mise au point.

En comptant 3*3 bouées + 4 bouées, le coût bouée est d'environ 135 Keuros
A cela s'ajoute le coût homme pour monter et vérifier / ajuster les bouées et les calculs (cf supra) =

- + 65 K (CDD post doc de 1 an et expertise UTLN en convention de recherche)
- + 5 K de fonctionnement (GSM)
- + 5 K de transport Métropole - Reunion

Le grand total tout inclu s'élève donc à 210 Keuros.

³Nous tenons à remercier Oséan pour leur écoute et avoir bien voulu recevoir notre proposition basée sur Beagle Board avec GSM qui réduit considérablement les coûts comparés au WIFI ou radio et qui est opportuniste vis à vis de la superbe installation OPT (qui est sans doute la plus belle du pacifique sud ouest).

Chapitre 6

Conclusion : anticipation des nuisances anthropiques et suivi de la population

6.1 Impact des collisions

Une collision d'une BB avec un navire marchand est létale. Ce risque de collision est visible sur les cartes : les zones de pose favorites des BB semblent se concentrer à la croisée de forts passages maritimes. Il déjà été noté il y a un ou deux ans un cas de collision avec un cétacé, et malheureusement ceci devrait s'intensifier avec le trafic qui augmentera. Nous avons montré comment HERACLES permettra de localiser les BB en temps sur la zone de plus dense trafic.

HERACLES sera doté d'une interface web html qui relayera, à qui de droit désigné par PS (opérateurs NGV, navires marchands, etc) l'information de position calculée sur le serveur UTLN, au travers d'une interface graphique simple gérée depuis ce serveur. La maintenance du serveur UTLN est un service compris par l'équipe DYNi si une convention de recherche est établie avec PS.

Les différents groupes de BB seront placés avec les mesures de précisions associées (en espace et nature du groupe). Pour le cas des groupes peu chanteurs, les autres sons qu'ils émettent, notamment plat de nageoire et saut, formeront des amères acoustiques propices à tracer les déplacements de ces groupe. Ainsi le risque de collision sera diminué pour l'ensemble des groupes.

Mais une nuisance moins visible est tout aussi dangereuse pour la population : la nuisance acoustique qu'il faut tout autant prévenir que le risque de collision comme nous le décrivons dans la partie suivante ¹.

¹En décalage de ce rapport, à noter cette nouvelle marquante du week end de mi-novembre transcrite par Opération Cétacé, le Lagon Sud peut être (et sera sans doute de plus en plus) le théâtre d'échouage, ici des baleines à bec de longman (baleines très sensibles acoustiquement, parfois stressées par sonar avec remontée rapide et létale par embolie) :

6.2 Impact des sons du trafic maritime sur les cétacés

Plusieurs échouages de cétacés sont à craindre dans le Lagon, probablement suite à des nuisances acoustiques et ou chimiques (souvent conjonction de facteurs). HER-ACLES devrait permettre en détectant des événements acoustiques anthropiques d'établir une corrélation entre certaines nuisances et ces échouages et donc de proposer des mesures de précautions.

Le type des nuisances acoustiques sur les cétacés sont transcrites dans "Drowning in sound" suivant un appel international lancé en 2013 par 150 ONG dont² :

- European Coalition for Silent Oceans (ECSO),
- Latin American Ocean Noise Coalition,
- North American Ocean Noise Coalition,
- Pacific Region Ocean Noise Coalition.

Leur rapport 2013 alerte sur l'importance croissante des bruits anthropiques dans les océans et leur impact sur la faune marine et en particulier sur les mammifères marins qui dépendent du son pour communiquer, se déplacer, se nourrir et se reproduire.

Différentes sources de bruits anthropiques sont représentés dans la figure 6.1 :

- Les explosions sont des bruits impulsifs très puissants, à large bande de fréquence, utilisés par les militaires, les scientifiques et les industries gazières et pétrolières à des fins d'exploration, de destruction, ou de test de résistance.
- Les réseaux de canons à air comprimé (Airgun arrays) produisent des sons brefs, puissants et répétés en injectant de l'air à haute pression dans l'eau. Dirigées en général sur le fond de l'océan, les ondes sonores peuvent pénétrer à des centaines de kilomètres et donner par réflexion une image par échographie de la croûte terrestre. Ces images sont utilisées pour la prospection par les industries gazières et pétrolières ou pour les recherches géologiques.
- Les nouvelles industries exploitant l'énergie marine renouvelable produisent d'importantes ondes sonores et des champs magnétiques dont l'impact sur la faune est encore inconnu.
- Les sonars militaires peuvent émettre pendant des heures des séries de sons longs d'une centaine de secondes dans différentes bandes de fréquences : moyennes pour les sonars MFA (Mid-Frequency Active) ou plus basses (0.1 à 10 kHz) pour les sonars LFA (Low-Frequency Active). Les LFA produisent des sons de forte puissance (230 dB) qui portent sur plusieurs kilomètres.
- Le trafic maritime produit des bruits à basse fréquence (10 Hz à 1 kHz), dont la puissance augmente avec la vitesse des navires, et capables de se propager

<http://www.operationcetaces.nc/index.php?mact=News,cntnt01,detail,0cntnt01articleid=29cntt01returnid=96>

²La liste complète des partenaires et les références utiles peuvent être consultées à l'adresse : www.oceannoisecoalition.org

sur de longues distances. Ces fréquences coïncident avec celles utilisés par les mammifères marins et forment un brouillard acoustique.

6.3 Impact de la pollution sonore sur les cétacés

Le bilan de plusieurs années d'observations (www.oceannoisecoalition.org) montre que la moitié des espèces de cétacés sont touchées par les perturbations anthropiques. Ces effets inclus :

- l'embolie cérébrale, pulmonaire,
- formation de bulles dans le sang, conduisant à des embolies,
- sourdité passagère ou permanente et perte d'aptitude à la chasse, la communication, la fuite de prédateur ou l'évitement de bateau. En exemple de ce dernier, plusieurs collisions sont inexplicables en Méditerranée car l'animal est parfois vu plusieurs minutes avant l'impact, sans que l'animal ne réagisse, comme sourd.
- échouage en conséquence des faits ci-dessus,
- comportement d'isolement, écartement des routes classiques,
- comportement agressif, qui peut conduire à des blessures létales.

6.4 HERACLES : un observatoire acoustique sur le long terme à PS

Cette section résume les impacts des nuisances acoustiques sur les cétacés et met en évidence l'intérêt d'un suivi acoustique du Lagon Sud.

L'océan Pacifique fait l'objet d'attention particulière, notamment du fait d'enjeux économiques (recherche pétrolière, extraction minière, télécommunications) dont les sons générés peuvent être à l'origine d'échouage de cétacés (Southall et al., 2013). Ces bruits sous-marins peuvent également venir masquer les sons émis par les baleines à bosse, essentiels à leurs activités de reproduction (par exemple, Tyack, 1981 ; Darling et al., 2006 ; Adam et al., 2013). Il peut y avoir également des projets locaux susceptibles d'impacter l'environnement (voir l'exemple de la construction de la route du Littoral à la Réunion, le projet minier Ambatovy à Madagascar, et celui de la Province Sud : les bruits de fixations de diverses infrastructures sont très nuisibles, il faut les surveiller). Dans le contexte de la population des BB, puisque c'est une espèce qui privilégie les habitats côtiers, il faudra estimer et prédire leurs réactions par rapport à ces nuisances côtières qui vont s'intensifier.

La Nouvelle Calédonie rayonne sur un vaste domaine maritime d'un point de vue scientifique (présence de grands instituts de recherche). Elle peut devenir une référence en terme de suivi de sa population en BB et en générant des observations à long terme qui seraient une référence sur des domaines maritimes distants mais

Comparative Scale of Known Ocean Noises and Their Noise Levels

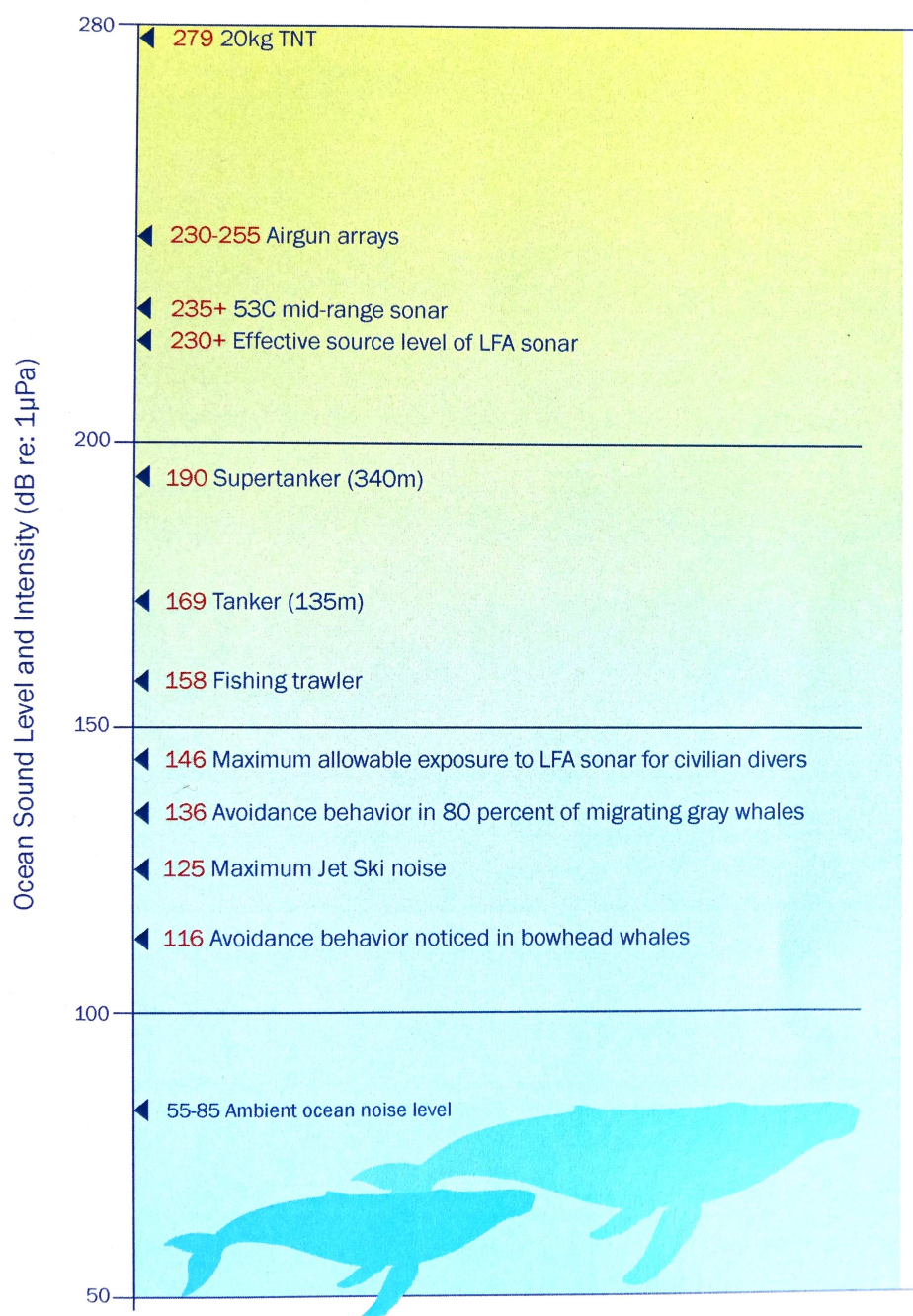


FIG. 6.1 – Niveau sonore en décibels (dB) de différentes sources de bruits anthropiques

connexes de par la migration des BB.

Le système HERACLES de part sa nature d'enregistrement en continu, permet de surveiller les activités anthropiques nuisibles pour les cétacés. Les données de HERACLES permettront donc d'établir des corrélations entre présence humaine et événements cétacés. Les bouées d'HERACLES au sud Ugo pourront capter des sons du large (canaux de propagation repérés).

HERACLES permet de mettre en place des indicateurs pour l'étude sur l'impact sur les BB du changement local mais aussi global (le réchauffement climatique par exemple), en s'intéressant à la durée de leur période de reproduction (les individus dédient-ils le même nombre de jours, ou plus ou moins, à cette activité de reproduction dans le Lagon Sud?). HERACLES est l'observatoire qui par tout temps, jour et nuit, accumulerait des observations permettant ces suivis à long terme.

6.5 Mesures à prendre pour limiter la pollution sonore

Le bruit est reconnu comme une forme de pollution par l'UNCLOS (United Nation Convention on the Law Of the Sea), et un consensus de plus en plus large se fait autour de la nécessité de limiter cette pollution sonore, avec comme exemples :

- L'ASCOBANS (Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic and North Seas) a voté trois résolutions en 2003, 2006 et 2009 pour réduire l'impact sur les cétacés des bruits provoqués par les recherches sismiques, les activités militaires, le trafic maritime, et les projets d'exploitation de l'énergie en mer.
- L'IWC (International Whaling Commission) a appelé en 2004 à une coopération internationale pour surveiller le bruit océanique.
- Le Parlement Européen a adopté une résolution en 2004 appelant les états membres à prendre des mesures pour réduire l'utilisation des sonars à forte puissance.
- L'ACCOBAMS (Agreement on the Conservation of Cetaceans of the Black Sea, Mediterranean Sea and the contiguous Atlantic Area) a reconnu en 2004 que le bruit est un danger pour les baleines et les autres espèces marines, puis a créé un groupe de travail en 2007 pour développer des outils de mesure de l'impact du bruit sur les cétacés puis en 2010 pour réduire l'impact des bruits dans l'océan.
- Les Nations Unies incluent depuis 2005 l'impact du bruit dans leurs rencontres sur la législation des océans. Le bruit anthropique a été considéré comme une des cinq menaces les plus importantes sur les cétacés.
- L'IMO (International Maritime Organization) a reconnu les effets néfastes du bruit du trafic maritime sur l'environnement marin, et cherche depuis 2012 des

- pistes pour réduire l'impact sonore du trafic commercial.
- La CBD (Convention on Biological Diversity) a présenté lors de sa 11^e conférence les conséquences négatives à court et long terme du bruit sur l'environnement marin et a encouragé les gouvernements à prendre des mesures pour limiter l'impact sonore sur les océans.

6.6 Politique globale de protection

Plusieurs instances s'engagent, comme l'Europe, dans une politique volontaire pour la conservation de la biodiversité. Suite au Grenelle de la Mer, la France développe ses aires marines protégées, prend des dispositions visant à protéger l'environnement marin et à diminuer les impacts des activités humaines.

HERACLES s'inscrit entièrement dans cette démarche. En 'monitorant' la distribution des BB sur plusieurs années, il sera possible de donner une image claire d'impacts potentiels d'activités humaines, et de proposer des schémas prédictifs de fréquentation notamment, lors de projets d'aménagement du territoire (route, agrandissement du port de Nouméa), d'installation ou d'exploitation d'entreprises (projet minier, trafic maritime). Il s'agit également de donner des indicateurs (durée et taux de présence, répartition géographique,...) aux gestionnaires d'aire marines protégées, aux élus, qu'il s'agisse de la Nouvelle Calédonie ou non. En effet, une fois instrumenté de son observatoire HERACLES, PS pourrait devenir une référence de gestion des BB dans le Pacifique, et exporter son modèle de surveillance et de gestion dans la région.

6.7 Economie locale

Les bénéficiaires d'HERACLES seront également les acteurs économiques qui développent et proposent des produits directs ou indirects autour de la présence des baleines. Cela s'inscrit dans la stratégie touristique de la charte des whale watchers³

Les bénéficiaires sont également le grand public, au sens où les informations seront valorisées auprès d'eux, afin que la population prenne conscience de l'importance de la présence des baleines à bosse dans leur région. Il s'agit aussi qu'ils en apprennent davantage sur les pressions anthropogéniques, et participent à leur diminution. Des données pédagogiques pourront être mise en place, comme nous les proposons au travers de notre projet sabiod.org, avec son interface sabiod.telemeta.org qui met en place les sons, les métadonnées pour un large publique. Ces données, diffusées sur le contrôle de Province Sud, serait différées et floutées, mais leur intérêt pédagogique n'en serait pas amoindri : écoute sur mobile / tablette, synthèse et démonstrations des richesses en cétacés de PS.

³A noter que les nuisances des bruits de moteurs de whale watchers à l'approche et sur site d'observation pourront être quantifier via des séries d'une année de mesure par Heracles.

6.8 Conclusion générale en faisabilité

Dans le chapitre 3, nous avons résumé les qualités de nos détections d'événement de type 1, 2, 3, 4 : elles sont effectives au plus loin à 30 km pour les chants (cf Denise et al. PlosOne 2012).

Le chapitre 4 a démontré la faisabilité de la localisation. Ces informations seront renvoyées via internet en page web à qui de droit et les gestionnaire avant tout. Pour répondre aux attentes les gestionnaires, nous pourrons gérer les données à une échelle de temps plus grande : une analyse des données démographiques à une périodicité de 3 ans est suffisante. Les traitements à cette échelle de plusieurs années sera réalisable avec HERACLES du fait de la pérenité des données sur les serveurs de recherche de l'UTLN (et copie chez PS).

Chapitre 7

Annexes

Les fichiers son enregistrés et traités pour ce rapport sont accessibles avec leur représentation scalogram et spectrogram sur le serveur UTLN et téléchargeable en simple clique.

Nous en donnons trois cas pour illustrer, et laisser au lecteur s'il le souhaite apprécier la qualité des détections / analyse du signal qui permettront d'identifier les chants, comme nous l'avons montré dans notre récent article Doh et al. "Classification des chants de BB par codage parcimonieux" Ed Lavoisier, sous presse, édition spéciale TSI symposium SERENADE.

7.1 Données et traitement du 20 juillet

http://sabiod.univ-tln.fr/pimc/RAPPORT_D/EC/AV20130720_13312_J62_Q8_T948.0957/

le repertoire se présente sous cette forme avec une image par portion de temps,
à zommer avec CTRL+ ou charger sur son bureau :

[DIR]coeffs_matrices/05 – Dec – 201318 : 43

IMG

part1_65536_windownsb40_T948.0957_Q8_J62.png02 – Dec – 201311 : 151.4M

IMG

part2_2752512_windownsb40_T948.0957_Q8_J62.png02 – Dec – 201311 : 171.4M

IMG

part3_5439488_windownsb40_T948.0957_Q8_J62.png02 – Dec – 201311 : 201.5M

IMG

part4_8126464_windownsb40_T948.0957_Q8_J62.png02 – Dec – 201311 : 231.4M

IMG

part5_10813440_windownsb40_T948.0957_Q8_J62.png02 – Dec – 201311 : 251.4M

Lien vers WAV et le fichier et les matrices contenant les coefficients (format matlab)
du Layer 1 scattering pour chaque partie :

http://sabiod.univ-tln.fr/pimc/RAPPORT_D/EC/AV20130720_13312_J62_Q8_T948.0957/coeffs_matrices/DECA/Dec-201318:4027M

layersC1_part1.mat05 – Dec – 201318 : 301.5M

layersC1_part2.mat05 – Dec – 201318 : 311.5M

layersC1_{part3}.mat05 – Dec – 201318 : 311.5M

layersC1_{part4}.mat05 – Dec – 201318 : 311.5M

layersC1_{part5}.mat05 – Dec – 201318 : 311.5M

7.2 Données et traitement du 22 juillet

[Lien vers le fichier et les matrices contenant les coefficients du layer 1 pour chaque partie :](http://sabiod.univ-tln.fr/pimc/RAPPORT_DEC_{AV}20130722<sub>103948J62Q8T948.0957/</i></p></div><div data-bbox=)

*[## **7.3 Données et traitement du 25 juillet**](http://sabiod.univ-tln.fr/pimc/RAPPORT_DEC_{AV}20130722<sub>103948J62Q8T948.0957/coeffs_{matrices}/</i></p></div><div data-bbox=)*

[Lien vers le fichier et les matrices contenant les coefficients du Layer 1,2 et 3 pour chaque partie :](http://sabiod.univ-tln.fr/pimc/RAPPORT_DEC_{AV}20130725<sub>093238J62Q8T948.0957/</i></p></div><div data-bbox=)

*[## **7.4 Devis**](http://sabiod.univ-tln.fr/pimc/RAPPORT_DEC_{AV}20130725<sub>093238J62Q8T948.0957/coeffs_{matrices}/</i></p></div><div data-bbox=)*

Les devis des sociétés avec qui nous avons travaillé d’octobre à novembre sur l’élaboration d’HERACLES sont joint à ce rapport : devis d’Osean et devis de la société de pose de bouée experte dans le Lagon Sud.

Bibliographie

- [ACG⁺13] O. Adam, D. Cazau, N. Gandilhon, B. Fabre, J. T. Laitman, and JS Reidenberg. New acoustic model for humpback whale sound production. *Journal of Applied Acoustics*, 74(10) :1182–1190, 2013.
- [ALSS05] W. W. L. Au, M. O. Lammers, A. Stimpert, and M. Schotten. The temporal characteristics of humpback whale songs. *J. Acoust. Soc. Am.*, 118(3) :1940, 2005.
- [APAM12] T. A. Abbot, V. E. Premus, P. A. Abbot, and O. W. Mayer. Receiver operating characteristic for a spectrogram correlator-based humpback whale detector-classifier. *J. Acoust. Soc. Am.*, 132(3) :1502–1510, 2012.
- [BGRS99] K. S. Beyer, J. Goldstein, R. Ramakrishnan, and U. Shaft. When is ”nearest neighbor” meaningful? In *Proc. of the 7th International Conference on Database Theory (ICDT)*, pages 217–235. Springer-Verlag London, 1999.
- [BH84] C.S. Baker and L.M. Herman. Aggressive behavior between humpback whale (*megaptera novaeangliae*) wintering in hawaiian waters. *Canadian Journal of Zoology*, 62 :1922–1937, 1984.
- [BM11] M. F. Baumgartner and S. E. Mussoline. A generalized baleen wale call detection and classification system. *J. Acoust. Soc. Am.*, 129 :2889–2902, 2011.
- [CALR13] D. Cazau, O. Adam, J. T. Laitman, and J. S. Reidenberg. New understanding the intentional acoustic behavior of humpback whales : a production-based approach. *J. Acoust. Soc. Am.*, 143(3) :2268–2273, 2013.
- [CC04] C. W. Clark and P. J. Clapham. Acoustic monitoring on a humpback whale (*megaptera novaeangliae*) feeding ground shows continual singing into late spring. *Proceedings - Royal Society of London. Biological sciences*, 271(1543) :1051–1057, 2004.
- [CM90] P. J. Clapham and D. K. Mattila. Humpback whale songs as indicators of migration routes. *Marine Mammal Science*, 6(2) :155–160, 1990.
- [DB01] J.D. Darling and M. Bérubé. Interactions of singing humpback whales with other males. *Marine Mammal Science*, 17(3) :570–584, 2001.

- [DN80] S. Davis and P. Nermelstein. Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences. *IEEE Trans ASSP*, 28 :357–366, 1980.
- [FBM94] P. Flandrin, R. G. Baraniuk, and O. Michel. Time-frequency complexity and information. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Processing*, volume 3, pages 329–332, 1994.
- [FCHG95] A.S. Frankel, C.W. Clark, L.M. Herman, and C.M. Gabriele. Spatial distribution, habitat utilization and social interactions oh humpback whales, megaptera novaeangliae, of hawaii, determined using acoustic and visual techniques. *Canadian Journal of Zoology*, 73 :1134–1146, 1995.
- [GGP⁺08] H. Glotin, L. Gauthier, F. Pace, F. Benard, and O. Adam. New automatic classification for humpback whale songs. In Pavia university and ONR, editors, *PASSIVE 08*, page 93, 2008.
- [Gil04] D. Gillepsie. Detection and classification of right whale calls using an edge detector operating on a smoothed spectrogram. *Can. Acoust.*, 32 :39–47, 2004.
- [Gra10] G. Gravier. Spro : a free speech signal processing toolkit, 2010. Vers. 5.0. <https://gforge.inria.fr/projects/spro> (date last viewed 06/07/12).
- [Gre61a] Donald D. Greenwood. Auditory masking and the critical band. *Journal of the Acoustical Society of America*, 33 :484–502, 1961.
- [Gre61b] Donald D. Greenwood. Critical bandwidth and the frequency coordinates of the basilar membrane. *Journal of the Acoustical Society of America*, 33(1344–1356), 1961.
- [Hel96] D. A. Helweg. Geographic and temporal variation in songs of humpback whales. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100(4) :2609, 1996.
- [HS06] J. G. Harris and M. D. Skowronski. Automatic speech processing methods for bioacoustics signal analysis : a case study of cross-disciplinary acoustic research. In *ICASSP*, volume 5, pages 793–796, 2006.
- [KL51] S. Kullback and R.A. Leibler. On information and sufficiency. *Annals of Mathematical Statistics*, 22(1) :79–86, 1951.
- [MBPS09] J. Mairal, F. Bach, J. Ponce, and G. Sapiro. Online dictionary learning for sparse coding. *ICML*, pages 689–696, 2009.
- [MC00] D. K. Mellinger and C. W. Clark. Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 107 :3518–3529, 2000.
- [MIK98] E. Mercado III and A. Kuh. Classification of humpback whale vocalizations using a self-organizing neural network. In *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, volume 2, pages 1584–1589, 1998.

- [MOBN⁺08] J.L. Miksis-Olds, J.R. Buck, M.J. Noad, D.H. Cato, and M.D. Stokes. Information theory analysis of australian humpback whale song. *J. Acoust. Soc. Am.*, 124 :2385–2393, 2008.
- [MOCT08] A. Mallawaarachchi, S. H. Onga, M. Chitre, and E Taylor. Spectrogram denoising and automated extraction of the fundamental frequency variation of dolphin whistles. *J. Acoust. Soc. Am.*, 124 :1159–1970, 2008.
- [MOS⁺08] S. K. Madhsudhana, E. M. Oleson, M. S. Soldevilla, M. A. Roch, and J. A. Hildebrand. Frequency based algorithm for robust contour extraction of blue whale b and d calls. In *Proc. of the IEEE Oceans, Kobe, Japan*, volume 3, page pp 8, 2008.
- [MSS⁺94] L. Medrano, M. Salinas, I. Salas, P. Ladron De Guevara, A. Agayo, J. Jacobsen, and C. S. Baker. Sex identification of humpback whales, megaptera novaeangliae, on the wintering grounds of the pacific ocean. *Canadian Journal of Zoology*, 72 :1771–1774, 1994.
- [MUB08] S. Mazhar, T. Ura, and R. Bahl. An analysis of humpback whale songs for individual classification. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(5) :3774, 2008.
- [NCB⁺00] M.J. Noad, D.H. Cato, M.M. Bryden, M.N. Jenner, and K.C.S. Jenner. Cultural revolution in whale songs. *Nature, London*, 408 :537, 2000.
- [ORBL07] J. N. Oswald, S. Rankin, J. Barlow, and M. O. Lammers. A tool for real-time acoustic species identification of delphinid whistles. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122 :587–595, 2007.
- [PAB⁺08] G. Picot, O. Adam, M. Bergounioux, H. Glotin, and FX Mayer. Automatic prosodic clustering of humpback whales song. In IEEE explorer, editor, *PASSIVE 08*, page 6p, 2008.
- [Pay82] R. S. Payne. New light on the singing whales. *National Geographic*, 161(4) :463–466, 1982.
- [PBG⁺10] F. Pace, F. Benard, H. Glotin, O. Adam, and P. White. Subunit definition and analysis for humpback whale classification. *Journal of Applied Acoustics*, 71, november 2010.
- [PM71a] R. Payne and S. McVay. Songs of humpback whales. *Science*, 173 :585–597, 1971.
- [PM71b] R. S. Payne and S. McVay. Songs of humpback whales. *Science*, 173(3997) :585–597, 1971.
- [PWA09] F. Pace, P. White, and O. Adam. Characterisation of sound subunits for humpback whale song analysis. In *4th International Workshop on Detection and Localization of Marine Mammals using Passive Acoustics*, page 56, 2009.
- [PWA11] F. Pace, P. R. White, and O. Adam. Classification of humpback whale (megaptera novaeangliae) calls using hidden markov models. In *5th International Workshop on Detection, Classification, Localization*,

and Density Estimation of Marine Mammals using Passive Acoustics, page 29, 2011.

- [RH93] L. Rabiner and B. H. Huang. *Fundamentals of Speech Recognition*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- [RL07] J. S. Reidenberg and J. T. Laitman. Discovery of a low frequency sound source in mysticeti (baleen whales) : Anatomical establishment of a vocal fold homolog. *Anat. Rec.*, 290 :745–759, 2007.
- [RT08] P. Rickwood and A. Taylor. Methods for automatically analyzing humpback song units. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(3) :1763–1772, 2008.
- [SBT06] P. Suzuki, J. R. Buck, and P. L. Tyack. Information entropy of humpback whale songs. *J. Acoust. Soc. Am.*, 119(3) :1849–1866, 2006.
- [Sha48] C.E. Shannon. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27 :379–423,623–656, 1948.
- [SW09] A. D. Shapiro and C. Wang. A versatile pitch tracking algorithm : from human speech to killer whale vocalizations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126 :451–459, 2009.
- [TCH86] P. O. Thompson, W. C. Cummings, and S. J. Ha. Sounds, source levels, and associated behavior of humpback whales, southeast alaska. *J. Acoust. Soc. Am.*, 80 :735–740, 1986.
- [Tya81] P. Tyack. Interactions between singing hawaiian humpback whales and conspecifics nearby. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 8(2) :105–116, 1981.
- [UC06] I. R. Urazghildiiev and C. W. Clark. Acoustic detection of north atlantic right whale contact calls using the generalized likelihood ratio test. *J. Acoust. Soc. Am.*, 120 :1956–1963, 2006.
- [WW78] H.E. Winn and L.K. Winn. The song of the humpback whale megaptera novaeangliae in the west indies. *Mar. Biol.*, 47 :97–114, 1978.