



Inversion géoacoustique passive pour l'évaluation rapide de l'environnement : utilisation de sources d'opportunité

Amélie Barazzutti

► To cite this version:

Amélie Barazzutti. Inversion géoacoustique passive pour l'évaluation rapide de l'environnement : utilisation de sources d'opportunité. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. NNT: . tel-01456761v1

HAL Id: tel-01456761

<https://theses.hal.science/tel-01456761v1>

Submitted on 5 Feb 2017 (v1), last revised 5 Apr 2018 (v3)

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Science de la Terre et Univers, Environnement**

Arrêté ministériel du 25 mai 2016

Préparée au sein du **Laboratoire de Grenoble Images Parole Signal Automatique**
et de l'école doctorale **Terre Univers Environnement**

Inversion géoacoustique passive pour l'évaluation rapide de l'environnement : utilisation de sources d'opportunité

Présentée par

Amélie BARAZZUTTI

Thèse dirigée par **Cédric GERVAISE**
et codirigée par **Jérôme I. MARS**

Thèse soutenue publiquement le **14 Décembre 2016**,
devant le jury composé de :

Mme Elisabeth GIBERT-BRUNET

DR CNRS, GEOPS, Géosciences Paris Sud,

Présidente

M Thierry CHONAVEL

PR, Labsticc, Telecom-Bretagne,

Rapporteur

M Sergio JESUS

PR, SipLAB, Université de l'Algarve, Portugal,

Rapporteur

Mme Carole NAHUM

Dr, ICT III, Direction Générale de l'Armement, DS/MRIS

Examinatrice

M Yann STEPHAN

Dr, HDR, Service Hydrographique et Océanographique
de la Marine

Examineur

M Cédric GERVAISE

Dr, HDR, Chaire Chorus, GIPSA-Lab, Grenoble-INP,

Directeur de thèse

M Jérôme MARS

PR, GIPSA-Lab, Grenoble-INP,

Co-Directeur de thèse

ICA Laurent VIESTE

Direction Générale de l'Armement,

Invité

M Jean-Pierre SESSAREGO

DR, CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique,

Invité



UNIVERSITE GRENOBLE ALPES
ECOLE DOCTORALE TUE

T H E S E

pour obtenir le titre de **Docteur en sciences**

de l'Université Grenoble Alpes
Spécialité : **Science de la Terre et Univers, Environnement**

Présentée et soutenue par **Amélie BARAZZUTTI**

Inversion géoacoustique passive pour l'évaluation rapide de l'environnement : utilisation de sources d'opportunité

Thèse dirigée par Cédric GERVAISE et Jérôme I. MARS
préparée au Laboratoire de Grenoble Images Parole Signal Automatique
(GIPSA-LAB)

soutenue le 14 décembre 2016

Devant le jury composé de :

Elisabeth GIBERT-BRUNET, UMR 8148, GEOPS, Géosciences Paris Sud
Thierry CHONAVEL, UMR 6285, Labsticc, Telecom-Bretagne
Sergio JESUS, SiPLAB, Université de l'Algarve, Portugal
Yann STEPHAN, SHOM
Carole NAHUM, DGA/DS/MRIS
Jérôme MARS, GIPSA-lab, Grenoble-INP
Cédric GERVAISE, Chaire Chorus, GIPSA-lab, Grenoble-INP
Jean-Pierre SESSAREGO, CNRS, LMA
Laurent VIESTE, DGA

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Co-directeur
Directeur
Invité
Invité

Remerciements

Bon... cinq ans ne se résument pas en quelques lignes et j'essaie de penser à tous ceux qui m'ont soutenue, parfois sans le savoir, pendant ces cinq ans de travaux de thèse, cinq ans de double vie DGA/thèse.

Dans ma famille science : merci Cédric pour tout car sans toi, je serai juste une IETA. Ton soutien remonte à longtemps maintenant (bizutage sur les bornes de Cramer-Rao en 2A pour être exact ! Oui oui, je n'ai pas oublié), projet de fin d'étude exceptionnel en détection de Bélugas puis cette thèse que tu as accepté de coacher à distance dans un contexte assez inhabituel... Merci Jean-Pierre de m'avoir fait confiance dès décembre 2011 en me faisant l'honneur d'être mon premier directeur de thèse ! Loin d'être un directeur de thèse "potiche" (comme tu m'as dit un jour !!), tu m'as permis de démarrer cette thèse dans d'excellentes conditions. Merci Jérôme d'avoir été un de mes directeurs de thèse, merci pour tes conseils, ton soutien, ton aide, la motivation que tu m'as donnée (surtout dans la dernière ligne droite !), merci de m'avoir demandé si ça allait pendant la rédaction (bon, j'ai pas répondu... LOL), merci pour tes blagues à la relecture de ce manuscrit et tout et tout (bon sauf pour la charte graphique des présentations GIPSA que tu m'as imposée à ASA, *no comment*). Merci Yann de m'avoir laissée piloter le SEASOR pendant ERATO 2010, de m'avoir laissée commander le Pourquoi Pas ? le temps d'une radiale (le très célèbre scénario AMELOCHE ;) et de m'avoir permis d'être observateur +++ pendant les campagnes ERATO. Merci Julien et Barbara pour votre aide et vos conseils précieux pendant ces 5 ans. La DGA 2.0 se sentait un peu chercheur grâce à vous pendant les conférences. Promis Julien, *the DGA* ne t'écrit pas d'autres cartes postales ;) Thank you Kerri for your support :) Ready to work with you on our paper ! Merci à tous ceux qui m'ont donné des coups de pouces ponctuels mais tellement significatifs (Alexis, Florian, Gaultier, j'en oublie...).

Dans ma famille Défense : tout a commencé par un petit challenge, convaincre Laure que j'allais y arriver et que cette thèse rayonnerait sur mon travail à la DGA ("autant que de besoin" pour "monter en compétence" ;)). Merci, Laure, pour ta confiance. Ce projet personnel m'a apporté énormément au quotidien et pas simplement personnellement mais aussi pour mes postes GHOM, pour les échanges avec les industriels et avec les forces (ça m'a même servi en Géo ;). J'ai été très soutenue au sein du segment d'ingénierie Environnement Géophysique et par la DGA en général. Un énorme merci à Anne (AWK), Frédérick (FHS), Corinne (CLT), Laurent (LVE), Benoîte (BMN), Laurence (LGD), Stéphane (SJS), Odile (OGD) et tous mes collègues du SI ENV ! Merci Carole (CNM) pour nos discussions scientifiques, ton soutien moral et tes conseils. Merci Bib (EGT), pour notre exceptionnel travail d'équipe DS/DT. Tu ne t'en souviens peut-être pas mais on s'est rencontré sur un désaccord à propos d'un RAPID (en résumé : tu as râlé et j'ai paniqué ;) puis je t'ai présenté des militaires :p Merci Anne-is (ma copine baleine) pour ton soutien, ton aide et nos baleines ! J'espère qu'on pourra retravailler ensemble un jour. Et puis finalement, Flipper, c'est un peu ton copain aussi ? Merci à mon premier binôme HO Sabrina (SNA), mes copains Météo Pierre (PHT), Gaëlle (poulette), Sonia (Soso) et Maud (MPA), parce que finalement localiser un tir de 155mm par acoustique ou détecter une baleine, c'est presque pareil ! Merci Christelle (CMS) qui m'a beaucoup rassurée et un peu engraisée aussi quand j'étais en stress dans le bureau (pause balisto, "c'est ma vraie nature").

Enfin merci à ma Famille sans qui je n'en serais pas là, sans qui je n'aurais pas fait tout ça et sans qui je n'aurais pas ce caractère délicieux (n'est-ce pas ?? ! ;)) Merci les amis pour le soutien moral. Double merci (LOL) à ma Twin LN ("synthétise, synthétise") et surtout à mon Pascal (RDD), chargé des "discussions de labo au café de Paris 13", du soutien moral renforcé H24 7J/7, 99.999% de disponibilité (dans un marché DGA, il en faudrait deux comme toi !), parce qu'il faut le dire, tu as "un peu" subi ma zénitude légendaire, mes légères sautes d'humeur, mes mini crises de paniques ou d'énervement, et tout ça pendant 5 ans :D

Si j'ai oublié quelqu'un, ce n'est pas volontaire et je m'en excuse. J'ai une petite boule au ventre en sachant que je tourne cette page... Tout ça va me manquer...

Table des matières

Table des sigles et acronymes	xix
Résumé	1
1 Contexte et objectifs des travaux	5
1.1 L'environnement au sens large	5
1.2 L'environnement marin	8
1.3 Etat de l'art de l'inversion géoacoustique passive	17
1.4 Objectifs scientifiques	34
2 Inversion géoacoustique passive à partir d'émissions hautes fréquences de mammi- fères marins	37
2.1 Introduction de la méthode d'inversion géoacoustique passive développée et positionne- ment des travaux	38
2.2 Vocalises hautes fréquences de mammifères marins : première application de la méthode d'inversion et identification de la problématique de directivité	48
2.3 La directivité des sources : étude et prise en compte dans le schéma d'inversion géoa- coustique passive développé	53
2.4 Discussion	68
3 Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - propaga- tion multitrajet résolue	73
3.1 Déclinaison des outils pour des sources omnidirectionnelles avec propagation multitra- jets résolue dans le spectrogramme - méthode IGA-VMM-BR	74
3.2 Démonstration du schéma d'inversion sur données synthétiques	76
3.3 Etude de performances	79
3.4 Application du schéma d'inversion sur des émissions contrôlées en environnement réel	83
3.5 Discussion	90
4 Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - séparation haute résolution des multitrajets	95
4.1 Outils de traitement du signal pour la séparation haute résolution des trajets - méthode IGA-VMM-HR	96
4.2 Etude de performances HR vs. BR	101

4.3	Application du schéma d'inversion sur des émissions contrôlées en environnement réel	102
4.4	Discussion	106
5	Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - réponse impulsionnelle très basse résolution	109
5.1	Motivation des travaux	110
5.2	Matériel et méthodes	112
5.3	Outils développés pour la localisation de la source en présence de trajets non séparables	118
5.4	Faisabilité sur des émissions contrôlées représentatives des émissions de baleines à bosse (zone de Punta Ballena)	126
5.5	Application aux données réelles de la zone Cabo (Punta Gorda)	139
5.6	Discussion	143
6	Conclusion et perspectives	147
	Productions personnelles	151
	Conférences et communications	151
	Articles de revue	152
A	Définitions utiles et calculs	153
A.1	Le guide d'onde de Pékéris	153
A.2	Coefficient de réflexion dans le cas d'interfaces multiples	153
A.3	L'algorithme génétique	155
B	Fiches d'identité	159
	Références	163

Table des figures

1.1	L'environnement Géographique Hydrographique Océanographique et Météorologique au sein de la Défense. Les informations sur les zones méconnues doivent être envoyées rapidement, à longue distance, en environnement hostile.	8
1.2	L'environnement marin illustré	10
1.3	Image issue de Bonnel (2010) : quatre premières fonctions modales dans un guide d'onde parfait ($\Psi_m(z)$ équation 1.3)	12
1.4	Interface entre deux milieux (Loi de Snell-Descartes)	14
1.5	Domaine de validité approximatif des théories modes et rayons. Les étoiles positionnent les campagnes exploitées dans le cadre de la thèse dans ce plan fréquences / hauteur d'eau : rose - ERATO 2009 avec de fréquences de l'ordre de 10 kHz dans 130 m d'eau, noire - ERATO 2011 avec des fréquences de l'ordre de 1 kHz dans 100 m d'eau, bleue - CABO 2013 avec des fréquences supérieures à 300 Hz dans 110 m d'eau ou moins, verte - CABO 2015, campagne d'émissions de <i>playbacks</i> de 100 Hz à 1 kHz dans 70 à 200 m d'eau	14
1.6	Principe de la tomographie	16
1.7	A gauche : chant de la glace (porte qui grince). A droite : déplacement de glace (courtesy of C. GERVAISE)	19
1.8	Figure adaptée de Wenz (1962)	20
1.9	Densité de trafic mondial issue des données 203 du la base de données Llyod's (source SHOM)	21
1.10	Illustration issue de Oudompheng (2015) présentant les principales sources acoustiques de bâtiments marins et leur origine (V pour vibroacoustique, H pour Hydroacoustique)	24
1.11	Figure du haut : Signature acoustique d'un navire de surface effectuant une radiale devant le capteur en milieu petits fonds. Figure du bas : zoom sur une raie spectrale à 13.7 Hz permettant d'observer l'effet Doppler (illustrations issues de Vallez et al., 2008). On peut observer les striations caractéristiques de la radiale d'un navire, le temps de passage eu CPA ainsi que l'effet du mouvement du navire sur le contenu fréquentiel (figure inférieure). Les modes de propagation, dont le nombre augmente avec la fréquence, sont également visibles sur la figure supérieure.	25
1.12	1- Crevette claqueuse, 2- Colibri, 3- Rhinolophe (<i>Rhinolophus hipposideros</i>), 4- Poisson clown (<i>Amphiprion ocellaris</i>)	27
1.13	A gauche : son produit par les plumes d'un colibri Calliope (<i>Stellula Calliope</i>) lors d'un plongeon (son : "pouet" puis sifflement descendant). A droite : son produit par les plumes d'un colibri à queue large (<i>Selasphorus platycercus</i>) (son : un sifflement avec tremolo). Les sons sont disponibles sur le site internet du laboratoire Animal Aeroacoustic http://animalaeroacoustics.ucr.edu/gallery.html	27
1.14	A gauche : Série de clics de globicéphale enregistrés dans le Golfe du Lion lors de la campagne ERATO 2011 (Courtesy of SHOM), après t=3 s. La fréquence centrale se trouve autour de 2 kHz. Le train de clics, encadré en rose, est précédé d'un son bref à t=2.8 s, son entre une modulation et un ton pulsé (0.2 s environ, son : "pouet"). A droite : Série de clics de Beluga enregistre à Pointe Noire, Québec (Courtesy of C. Gervaise).	28

1.15	A gauche : Sifflement de phoque barbu. La modulation de fréquence dure plusieurs dizaines de secondes et descend de près de 4 kHz à environ 400 Hz (son : un peu comme une scie musicale. Tout ça sans respirer ?). A droite : modulation de fréquence de baleine à bosse enregistrée dans la zone de Cabo San Luca (voir paragraphe 5.2). La modulation de fréquence dure environ 1 s pour 300 Hz de chute fréquentielle (son : chien qui hurle).	29
1.16	Pavé temps-fréquence émis par un Beluga (Pointe Noire, Québec, courtesy of C. Gervaise) . .	29
1.17	Vocalises de dauphins communs issues des données de la campagne ERATO 2009 (section 2.2)	30
1.18	Principaux signaux émis par les cétacés et leur support fréquentiel qui détermine la portée (100 Hz : 50 à 100 kilomètres, 50 kHz : 200 mètres). Figure construite à partir de Mellinger <i>et al.</i> , 2007	30
1.19	Répartition mondiale du grand dauphin <i>Tursiops Truncatus</i> source : CCBY-SA3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1641308	34
2.1	Principe général de la méthode d'inversion géoacoustique passive à partir d'un unique hydrophone et de vocalises de mammifères marins. L'étape 1 de traitement individuel d'un signal fournit pour chaque signal traité un couple $(\theta, R(\theta))$. Cette étape est appliquée à N signaux (étape 2) pour estimer une courbe du coefficient de réflexion qui est l'observable attendu par l'algorithme d'inversion (étape 3).	40
2.2	En première approximation, la propagation se fait le long de lignes droites avec des réflexions à la surface et sur le fond	41
2.3	Vocalise de dauphin commun issue du jeu de données candidates (ERATO 2009 §2.2). Les 3 premiers trajets d'arrivée sont observables et indiqués par Echo 1, Echo 2 et Echo 3.	41
2.4	Prétraitement temps-fréquence-phase sur une vocalise de dauphin commun. La vocalise traitée ici est celle de la figure 2.3. Les pistes estimées par un outil de prétraitement (F. Dadouchi, communication personnelle, (voir notamment Dadouchi et al., 2013 , pour une description de l'outil)) sont indiquées en traits pleins blancs. Les 3 premiers trajets (notés Piste 1, Piste 2 et Piste 3) ont été détectés.	43
2.5	A gauche : schéma de la propagation selon 5 trajets sous les hypothèses de travail. A droite : RI obtenue pour cette propagation en multitrajets	43
2.6	Concept de localisation monocapteur de sources en milieu petits fonds (d'après Aubauer et al., 2000)	44
2.7	Chaque signal subit une succession de traitements pour en extraire une valeur du coefficient de réflexion local, fonction de la rance du réfléchi fond du signal propagé.	45
2.8	L'étape 1 est répétée sur N signaux afin d'obtenir une courbe du coefficient de réflexion dans la zone des sources ayant émis les signaux	46
2.9	Module du coefficient de réflexion entre deux milieux. L'angle critique θ_c est l'angle à partir duquel il commence à y avoir transmission dans le second milieu.	47
2.10	Détections de sifflements de dauphins (notées D) durant la campagne ERATO 2009. La notation MF-S indique les émissions actives réalisées dans le cadre du projet STEREO [courtesy of SHOM]	49
2.11	Un sifflement enregistré dans le Golfe de Gascogne. Les trajets sont identifiés dans l'ordre d'arrivée 1, 2 et 3. Cadre a1 : le deuxième trajet présente un niveau plus fort que le trajet direct. Cadre a2 : "zéro" du deuxième trajet alors que le direct et le troisième sont non nuls.	52

2.12	Courbe de coefficient de réflexion estimée avec la méthode IGA-VMM-BR décrite au chapitre 3 à partir des sifflements de dauphins de la campagne ERATO 2009 en les traitant comme des sources isotropes. La ligne rouge est la limite physique maximale de valeur 1 pour un coefficient de réflexion du fond	52
2.13	Quelques bêtes aux émissions directives	54
2.14	Définition des angles en 3D décrivant l'orientation d'un animal dans l'espace. Dans le suite ce manuscrit, nous appelons "attitude" l'angle de tangage	55
2.15	Schéma issu de Au et al. (2010) (adapté de Purves and Pilleri (1983)) montrant la position des structures internes de la tête du dauphin	56
2.16	En 2D, le diagramme de directivité est positionné dans le plan de la source et de l'hydrophone par l'angle α appelé "attitude". Les angles d'émissions $\theta_{e,i=s}$ des trajets sont repérés par rapport à l'horizontale mais peuvent être exprimés en fonction de l'attitude α et de l'angle de réception θ_s comme présenté à droite. $\theta_{e,i=s} = -\theta_s - \alpha$ est la direction d'émission du trajet surface par rapport à l'axe principal du diagramme de directivité.	57
2.17	Diagramme de directivité d'un piston circulaire de 8 cm de rayon approché par harmoniques sphériques à l'aide de 4 modes (erreur relative inférieure à 2 %)	59
2.18	Reconstruction du diagramme mesuré par Branstetter et al. (2012) pour un sifflement de dauphin Tursiops à 6.9 kHz (noir : mesure ; vert : reconstruit avec 4 coefficients ; rouge : reconstruit avec 10 coefficients)	60
2.19	A gauche : Illustration adaptée du diagramme de directivité mesuré par Branstetter et al. (2012) sur un sifflement de dauphin Tursiops à 6.9 kHz. A droite : en rose le diagramme reconstruit à cette fréquence avec 10 coefficients $\alpha_n(f = 6.9 \text{ kHz})$	60
2.20	Bornes de Cramer-Rao pour l'estimation de l'attitude de la source avec un modèle de piston circulaire (gauche) et pour l'estimation du rayon du piston (droite). La source est à 66 m, l'hydrophone à 100 m de profondeur dans 130 m d'eau. L'hydrophone et la source sont distants de 200 m. Les angles d'émission du direct et du réfléchi surface sont respectivement -9.64° et 39.69° . On voit que les zones de faible performance du modèle (zones rouges) se situent au niveau des angles d'émission des trajets pour l'estimation des deux paramètres (indiquées en blanc sur les deux images) et également au niveau de l'angle médian pour l'estimation du piston (en blanc sur l'image de droite). Les zones bleues sont les zones où le modèle sera performant	63
2.21	A gauche : manque d'information lorsque l'attitude est confondue avec un des trajets. A droite : deux diagrammes de directivité possibles, engendrant la même observation lorsque l'attitude correspond à l'angle median entre le direct et le réfléchi surface	63
2.22	Résultats d'une simulation de Monte-Carlo pour l'estimation de l'attitude de la source (gauche) avec un modèle de piston circulaire de 6 cm et pour l'estimation du rayon du piston (droite). La source est à 40 m de profondeur et à 100 m de distance de l'hydrophone, lui-même à 70 m de profondeur. Les angles valent alors respectivement -20° pour l'angle d'émission du direct et 50° pour l'angle d'émission du surface. Ces résultats confirment l'étude des bornes de Cramer-Rao pour l'estimation de l'attitude α et du piston p avec des zones de dysfonctionnement au niveau des angles d'émission des trajets pour l'estimation des deux paramètres et également au niveau de l'angle médian pour l'estimation du piston	64
2.23	A gauche : signal synthétique créé selon les caractéristiques des sifflements de dauphins étudiés dans ERATO 2009 (cf. section 2.2) et avec un diagramme de directivité de piston circulaire de rayon 18 cm. On observe bien des zéros à certaines fréquences, signes de la directivité de la source. A droite : la différence entre le spectre du premier réfléchi surface et le spectre du direct observée (en rouge) et estimée par l'algorithme (en vert). Les paramètres optimaux estimés sont 62.98° et 18 cm pour une attitude vraie de 63° et un piston de rayon vrai 18 cm.	65

2.24	Différences entre les spectres du premier réfléchi surface et du trajet direct (bleu) et entre les spectres du premier réfléchi fond et du trajet direct (vert) pour des signaux synthétique (à gauche) et réels (à droite). A droite : le signal réel est une vocalise de la campagne ERATO 2009 dont la source a été localisée. A gauche : le signal synthétique a été réalisé avec les mêmes caractéristiques que le signal réel et avec un diagramme de piston de 8 cm.	65
2.25	Echec de l'estimation de la taille du piston et de l'attitude par la méthode proposée précédemment sur un sifflement de dauphin d'ERATO 2009 (à gauche). Le modèle du piston (différence surface-direct modélisée en vert, et mesurée en rouge, image de droite) ne représente pas correctement le diagramme de directivité du dauphin, notamment parce qu'il présente des extrema trop prononcés	66
2.26	Piston de 25 cm classique $H(f = 11 \text{ kHz}, \theta)$ en bleu, et atténué par une constante de 10^{-2} $H_{10^{-2}}(f = 11 \text{ kHz}, \theta)$ en rose (cf. éq. 2.34). Les zéros du diagramme de directivité sont moins prononcés sur le modèle atténué.	67
2.27	A et B : en vert, l'estimation (attitude et taille de piston) réalisée en utilisant le modèle de mesure basé sur le piston classique. Les observations sont en rouge. 2 sifflements réels d'ERATO sont traités : A et B (A étant le sifflement illustré dans 2.25). A2 et B2 : en vert, l'estimation effectuée avec le modèle de mesure basé sur le piston atténué pour les mêmes observations. L'observation pour la vocalise A2 est approchée par un piston, de 18 cm tandis que celle de B2 est approchée par un piston de 32 cm.	67
2.28	Pour un canal de Pékérís de vitesse de compression 1850 m/s et de densité 1.9 kg/m^3 , on estime le coefficient de réflexion à partir d'une collection de signaux synthétiques traités par la méthode IGA-VMM-BR : en noir la courbe théorique du coefficient de réflexion, en bleu la courbe obtenue si on considère la source isotrope - cette courbe est bien en dessous de 1 - et en rouge la courbe obtenue après correction des pertes de directivité selon le modèle. Le modèle est un piston circulaire de diamètre 20 cm. La surcorrection des énergies des trajets impacte directement l'estimation du coefficient de réflexion.	69
2.29	A gauche : la différence modélisée surface vs. direct est tracée en cyan, la différence modélisée direct vs. fond est tracée en vert clair. Elles sont basées sur le modèle du piston circulaire pour un rayon de 20 cm. Les différences mesurées (différences de spectre) sont en bleu foncé (surface vs. direct) et en vert foncé (direct vs. fond). Par construction, la différence modélisée direct vs. fond ne prend pas en compte la contribution du fond dans l'atténuation si bien que l'écart entre modèles et mesures fournit la valeur de R. A droite est représentée l'écart entre la différence modélisée et la différence mesurée pour les trajet fond et direct. Le bruit de mesure perturbe cet écart mais le coefficient de réflexion ressort tout de même comme le maximum de la distribution de cette courbe, indiqué par la ligne rouge.	70
2.30	Pour un canal de Pékérís de vitesse de compression 1850 m/s et de densité 1.9 kg/m^3 , on estime le coefficient de réflexion à partir du maximum de la distribution en fréquences de la différence entre mesure et modèle pour la différence fond moins direct. La courbe théorique du coefficient de réflexion est représentée en noir, la courbe obtenue en considérant la source comme isotrope est tracée en rouge - cette courbe est bien en dessous de 1. Le coefficient de réflexion (carrés bleus) est bien estimé par cette méthode.	70
3.1	En première approximation, la propagation se fait le long de lignes droites et suivant trois trajets : le direct, le premier réfléchi fond et le premier réfléchi surface. E_d (resp. E_f) est le niveau en μPa^2 du trajet direct (resp. fond) intégré sur la bande de fréquences du signal . . .	75
3.2	Phases du traitement individuel du signal mises en œuvre pour des sources omnidirectionnelles dans le cas de multitrajets résolus dans le spectrogramme	76
3.3	Configuration des signaux synthétiques. La source est à 35 m de profondeur, l'hydrophone à 70 m de profondeur dans 130 m d'eau. La distance source/récepteur varie de 20 m à 250 m avec un signal synthétique créé tous les 10 m	76

3.4	Signal synthétique à 150 m. En haut : le spectrogramme du signal avec la piste sélectionnée en rouge. Au milieu : la RI en linéaire et en dB rel. $1\mu\text{Pa}^2$ avec les 3 premiers trajets sélectionnés (carrés rouges). En bas : la RI en blanc représentée sur le spectrogramme du signal	77
3.5	Résultat de l'inversion des deux fonds simulés avec le module du coefficient de réflexion vrai (noir pointillé), mesuré (étoiles rouges) et estimés (rouge trait plein). A gauche : le fond le plus réfléchissant avec un angle critique de 35° . La vitesse de compression est estimée à 1833 m/s contre 1836 m/s, la densité à 2.08 kg/m^3 contre 2 kg/m^3 . A droite : le fond le plus absorbant avec un angle critique de 25° . La vitesse de compression est estimée à 1662 m/s contre 1650 m/s, la densité à 1.8 kg/m^3 contre 1.8 kg/m^3	78
3.6	Illustration des régions dans lesquelles les sources seraient localisables par la méthode IGA-VMM-BR pour un hydrophone à 60 m de profondeur (rond jaune) dans 100 m d'eau. Les zones blanches correspondent aux positions de la source telles que les 3 premiers trajets sont détectables par les outils de la méthode. Les zones noires sont les zones où les sources ne sont pas exploitables en raison d'une différence de temps trop faible	79
3.7	Critères monoparamètre du conditionnement du problème d'inversion pour un fond constitué d'un sédiment sur socle dur. En abscisse, l'écart en pourcentage entre la valeur supposée estimée pour le paramètre et la valeur vraie du paramètre. En ordonnée, l'erreur quadratique moyenne sur le coefficient de réflexion pour l'écart du paramètre à la valeur vraie	81
3.8	Critères biparamètres pour le conditionnement du problème d'inversion pour un fond constitué d'un sédiment sur socle dur. Les encadrés permettent d'identifier les critères biparamètres propres à chacune des couches (A pour le sédiment et C pour le socle) et les critères croisés (B)	82
3.9	L'antenne d'hydrophones ELISE et l'antenne TELEMAQUE (source : SHOM)	84
3.10	Mouvements effectués par le navire autour de l'antenne acoustique TELEMAQUE. Les couleurs de la trajectoire identifient les phases de l'expérimentation ainsi que la distance (en m) séparant la source de l'antenne au début de chaque phase. La radiale n° 8 est le segment vert clair en fin de déplacement, débutant à environ 490 m de l'hydrophone	85
3.11	Profondeur d'eau et immersion de la source durant la radiale n° 8 mesurée par le Pourquoi Pas ?. On observe bien la bathymétrie plate (ligne continue verte). La position de la source (ligne continue rouge) est relativement constante autour de 60 m de profondeur. Les profondeurs des hydrophones de l'antenne TELEMAQUE sont dessinés à titre indicatif par des losanges notés H1 à H6. Nous utilisons l'unique hydrophone H6 pour l'inversion géoacoustique passive.	86
3.12	Rampe de fréquence reçue par l'hydrophone H6 situé à 60 m d'immersion après propagation dans le canal (Golfe du Lion), le long de la radiale n° 8 pour une source à environ 150 m de distance de l'hydrophone. En haut : spectrogramme d'une émission contrôlée propagée en environnement réel. La piste utile sélectionnée est indiquée par la ligne blanche continue. Les 3 premiers trajets d'arrivée sont numérotés et fléchés. En bas : réponse impulsionnelle obtenue avec la piste temps-fréquence. Les pics de cette RI sont les temps d'arrivée des trajets. On peut voir plus de 3 trajets d'arrivée contrairement aux données de la campagne ERATO 2009	87
3.13	Comparaison entre l'estimation de la distance séparant la source STEREO de l'antenne d'hydrophones TELEMAQUE durant la phase n° 8 par la méthode IGA-VMM-BR (étoile) et par le GPS du bateau (ligne continue). On observe une bonne localisation de la source par notre méthode	88
3.14	Courbe du coefficient de réflexion mesuré sur la zone de la radiale en fonction des angles de rasance obtenue grâce au traitement d'un ensemble d'émissions contrôlées le long de cette radiale. En rouge sont indiqués les points que l'on aurait obtenus en utilisant uniquement le premier réfléchi fond. La zone 1 est la zone qui sera exploitée pour l'inversion géoacoustique passive. La zone 2 n'est pas utilisée car trop bruitée	88
3.15	Histogrammes des sites parcourus par l'algorithme génétique. En ordonnée, le nombre de visites - en abscisses les valeurs des sites visités. Les noms des paramètres sont explicités dans la section 3.3	89

3.16	Résultats de l'inversion géoacoustique par algorithme génétique des données de la phase n° 8 par la méthode IGA-VMM-BR ($\times$ pour les mesures et $\bullet$ pour l'estimation)	89
3.17	Représentation des couples de paramètres estimés par l'algorithme génétique sur 500 répétitions	91
3.18	Le signal émis est une rampe de fréquence identique à celle d'ERATO 2011, avec une émission tous les 25 m de 100 m à 250 m pour trois vitesses de sources : 0 m/s (courbe cyan), 2 m/s (courbe verte) et 10 m/s (courbe rose). Pour chaque émission, deux valeurs de coefficient de réflexion sont estimées par la méthode IGA-VMM-BR, le coefficient de réflexion correspondant à la rasance du premier réfléchi fond (un trait continu relie les points) et celui correspondant à la rasance du second réfléchi fond (un trait pointillé relie les points), ce qui permet d'atteindre des rasances plus élevées et donc d'évaluer l'impact du Doppler pour des angles d'émissions plus élevés. Le premier réfléchi fond ne permet d'atteindre que des rasances jusqu'à 38°. On observe une bonne correspondance entre les courbes aux différentes vitesses et la courbe théorique (noire).	92
4.1	Phases du traitement individuel du signal mises en œuvre pour des sources omnidirectionnelles dans la cas de multitrajets non résolus dans le spectrogramme	96
4.2	Impact de la taille de la fenêtre FFT sur une rampe de fréquence de pente 10 kHz/s, avec un recouvrement de 50 % à chaque fois (de gauche à droite : 256 points, 512 points, 1024 points et 2048 points). On observe que les fenêtres 256 et 512 sont mieux adaptées que 1024 et 2048	97
4.3	Représentation schématique de l'effet de déformation temporelle (<i>warping temporel</i>) sur une rampe de fréquence $s(t)$, avec t_w le temps déformé et f_i la fréquence de déformation, B la bande de fréquences et T la durée d'un écho	98
4.4	Application de la déformation temporelle basée sur la phase sur une modulation linéaire de fréquence de pente B de 10 kHz/s (de 1 à 2 kHz sur 0.1 s). Sur l'image 1 : RTF du signal d'origine avec sa bande B et sa durée T ainsi que la loi de fréquence instantanée (segment continu blanc). Sur l'image 2 : RTF du signal après déformation avec la fréquence de warping f_i tracée en pointillés blanc. Image 3 : spectre du signal déformé. On observe un pic au niveau du signal déformé, à la fréquence de warping f_i	99
4.5	Application de la déformation temporelle basée sur la phase sur une modulation linéaire de fréquences de pente B de 10 kHz/s (de 1 à 2 kHz sur 0.1 s) et son écho retardé de τ . Le warping est appliqué à l'instant d'arrivée du premier trajet. Sur l'image 1 : RTF du signal d'origine avec sa bande B et sa durée T ainsi que la loi de fréquence instantanée (segment continu blanc). Les 2 échos sont décalés de τ s mais ont la même loi de fréquence instantanée. Sur l'image 2 : RTF du signal après déformation avec la fréquence de warping f_i (pointillés blanc). On voit que le premier trajet est proprement transformé en fréquence pure à la fréquence f_i tandis que son écho retardé est courbé en raison du retard τ . Image 3 : spectre du signal déformé. On observe un pic au niveau du signal, à la fréquence de warping f_i indiquant le premier trajet. Le deuxième trajet est visible également sur le spectre mais décalé en fréquence	100
4.6	Haut : représentation temps-fréquence de l'émission reçue avant déformation, la source est à 550 m. Les trajets d'arrivée détectés par la méthode HR sont les traits blancs. Bas : RI estimée par la méthode BR (courbe grise fine) et par la méthode HR (courbe noire épaisse). Le cadre rouge souligne les 3 premiers trajets détectés par la méthode HR et invisibles en BR	102
4.7	Estimation de la distance source / récepteur (km). La ligne continue correspond à la localisation par GPS. Les points noirs correspondent à l'estimation de la position de la source par la méthode IGA-VMM-HR, les points gris à l'estimation de la position par la méthode IGA-VMM-BR	103
4.8	Estimation du coefficient de réflexion $ R(\theta) $ en fonction de l'angle de rasance θ avec la méthode IGA-VMM-BR (gris) et avec la méthode IGA-VMM-HR (noir). La limite des rasances accessibles en BR est indiquée par la droite verticale rouge	104

4.9	Histogrammes des sites les plus visités pour les 100 répétitions de l'AG, avec la vitesse de compression dans la première couche de sédiment c_p , son atténuation α_p , la vitesse de compression dans le socle c_s , son atténuation α_s , la vitesse de cisaillement c_{cis} et l'épaisseur h de la première couche de sédiment	104
4.10	Estimation du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance avec la méthode HR (moyen en croix noires et pour chaque fréquence en croix grises). Le coefficient mesuré est un coefficient moyen sur la bande de fréquence du signal	105
5.1	A gauche : rampe de fréquence décroissante monotone de 700 à 300 Hz sur 2 s d'une baleine à bosse dans la zone de Cabo San Lucas, candidate à l'inversion par notre schéma d'inversion. A droite : pour rappel, vocalise de dauphin commun de la campagne ERATO 2009 (2.2) présentant une propagation multitrajets. Les deux vocalises présentent une propagation multitrajets. Cependant, les trajets sur la vocalise de baleine à bosse sont difficiles à distinguer tandis qu'on identifie facilement les 3 premiers trajets (numérotés) sur la vocalise de dauphin	110
5.2	En haut : spectrogramme d'une vocalise de baleine à bosse. En bas : RI estimée par application de la méthode IGA-VMM-HR (voir chapitre 4). La trace de la vocalise est sélectionnée à partir du premier trajet (courbe blanche sur le spectrogramme). Elle permet de construire la loi de déformation, temporelle qui est ensuite appliquée sur une fenêtre glissante le long du signal d'origine (soit de 11 s à 12.5 s). Nous estimons ainsi la réponse impulsionnelle du canal (courbe du bas) qui permet d'obtenir les temps d'arrivée des trajets (croix rouges sur la RI). Les trajets identifiés sont retracés en rose sur le spectrogramme de la vocalise	111
5.3	Images extraites de Jiménez-López (2006) présentant les traitements de données bathymétriques effectués par Jiménez-López (2006) à partir d'une carte bathymétrique de l'Institut national de la statistique géographique et informatique (INEGI, carte des "Îles Revillagigedo" Key CB- 006, échelle 1 : 1000 000) et permettant de visualiser 3 classes de profondeurs (A) et la distance à la côte (B). La zone de Punta Gorda est la zone de la campagne CABO 2013	113
5.4	Profil de célérité mesuré in situ en février 2015 par les équipes de l'institut océanographique du Scripps et de l'université autonome de Baja California Sur au niveau de Punta Gorda (Courtesy of K. Seger)	113
5.5	Environnement bathymétrique de la zone de Cabo San Lucas à la résolution de 30 secondes d'arc (source : <i>The GEBCO 2014 Grid</i> , www.gebco.net). Les hydrophones sont tous les 2 placés à 5 m du fond et représentés par un carré jaune. Punta Ballena correspond aux données de la campagne CABO 2015 et Punta Gorda à la campagne CABO 2013.	114
5.6	Répétition d'un <i>song unit</i> d'un chanteur isolé dans la zone de CABO - 2013 (K. SEGER, communication personnelle). Le motif est la modulation de fréquence encadrée en rouge que l'on retrouve 3 fois dans cet extrait. <i>Courtesy of : Scripps Institution of Oceanography & Universidad Autónoma de Baja California Sur</i>	115
5.7	Dispositif de mouillage de l'hydrophone (K. Seger, communication personnelle)	115
5.8	Zone de Cabo San Lucas zoomée autour du point Punta Ballena. L'hydrophone de Punta Ballena est indiqué par le carré jaune, mouillé à 5 m du fond aux coordonnées [22.88413 N; -109.84315W]. Les points géolocalisés auxquels des rampes de fréquence ont été émises (bathymétrie : <i>The GEBCO 2014 Grid</i> , www.gebco.net) sont représentés par des triangles blancs numérotés WPxxx	116
5.9	Signal reçu sur l'hydrophone de Punta Ballena correspondant à une rampe linéaire de fréquences entre 100 Hz et 1000 Hz de 8 s de durée émise au point géolocalisé WP 230 (<i>Courtesy of Scripps</i>)	117
5.10	Rampe de fréquence croissante de 400 et 600 Hz de durée 0.2 s émise par une source située à 2 km de l'hydrophone et 30 m de profondeur et reçu sur un hydrophone situé à 5 m du fond dans 143 m d'eau	119

5.11	En haut : spectrogramme du signal synthétique (cf. remarque préliminaire 1) A l'œil nu, 4 trajets ressortent du spectrogramme (indiqués par des flèches blanches). La RI basse résolution (RI BR) dans l'image centrale confirme ces 4 arrivées numérotées. Pourtant, après application des outils de déformation temporelle, la RI haute résolution (RI HR) présentée dans l'image du bas indique la présence de plus de trajets avec notamment 3 trajets cachés dans les arrivées 2 et 3 détectés sur la RI BR. Le second pic détecté en BR contient en réalité 3 pics que la méthode HR permet de détecter. La zone encadrée isole les 4 premiers temps d'arrivées détectés en HR pour la suite de l'analyse.	120
5.12	Superposition de la RI théorique du signal synthétique (pics bleus) avec les arrivées détectées (pics rouges) sur la RI HR mesurée à l'aveugle avec les outils que nous avons développés pour la méthode IGA-VMM-HR. On constate que sous le premier temps d'arrivée mesuré se cachent en fait plusieurs trajets individuels. Les arrivées détectées sur la RI HR ne sont que des paquets et non des trajets individuels	121
5.13	Environnement synthétique constitué de profils de pentes droites de 0 % à 10 %. Les profils passent tous à 5 m sous l'hydrophone (carré jaune) et sont tracés en noir	122
5.14	Courbe du coût en fonction de la position théorique (r, z, p) évaluée (cf. équation 5.2) pour la localisation de la source située à 1 km et 30 m de profondeur après réception du signal propagé dans l'environnement synthétique (figure 5.13), sur un unique capteur. La collection des RI simulées permettant la localisation contient 2934 RI théoriques représentées par leur indice en abscisse. Les 5 premiers minima sont marqués d'une croix rose. Les RI sans valeurs correspondent aux RI exclues par l'algorithme de localisation	123
5.15	Résultats de localisation de la source (vraie position : 1000 m de distance, 30 m de profondeur, profil de 1 % marqué par un grand cercle rouge fin). Les 5 meilleures positions sont représentées dans le plan (distance, profil) à gauche et dans le plan (distance, profondeur) à droite par des ronds rouges. La position de la source est estimée à 990 m de distance et 32 m de profondeur sur le profil de 1 % (marquée par une croix rouge), ce qui est une bonne estimation réalisée à partir de la RI dégradée. Les 5 meilleures positions sont estimées entre les positions [896 m, 29 m, 0 %] et [1337 m, 40 m, 3 %], restent dans un secteur de pentes consécutives et sont peu dispersées en distance, profondeur ou même profils	124
5.16	RI théoriques des 5 meilleures positions de la 1 ^{ère} (en haut) à la 5 ^{ème} (en bas). Les RI sont synchronisées sur le même axe temporel. On constate qu'elles présentent toutes des paquets de trajets constitués ici du même nombre de trajets. Pour les mêmes temps d'arrivée, l'utilisation de la RI dégradée conduit à une bonne estimation de la position de la source sur le profil de 1 % (1 ^{ère} ligne en haut). Par contre, sur les profils proches, un même espacement de paquets correspond à une source plus proche sur la pente de 0 % (plus faible) et à une source plus éloignée sur la pente plus forte de 2 % (respectivement 2 ^{ème} et 3 ^{ème} ligne)	124
5.17	RI théoriques des 5 meilleures positions estimées pour une source à 2000 m et 30 m de profondeur, sur le profil 1 %, de la 1 ^{ère} (en haut) à la 5 ^{ème} (en bas). Les RI sont synchronisées sur le même axe temporel. On constate qu'elles présentent toutes des paquets de trajets mais le nombre de paquets n'est pas le même. De plus, le nombre de trajets individuels composant chaque paquets varie d'une RI à l'autre. L'utilisation de la RI dégradée ne conduit pas à une bonne estimation de la position de la source, la meilleure position étant estimée à 2693 m, 13 m de profondeur sur le profil de 4 % et la position la plus proche de la position réelle n'arrivant qu'en 3 ^{ème} position. Néanmoins, l'estimation de la position reste correcte et les RI ne sont pas dispersées.	125

- 5.18 On simule les RI dégradée pour différentes position de source : 1000 m sur le profil de pente 1% (rond rouge), 2000 m sur le profil de pente 1% (plus bleu), 2000 m sur le profil de pente 3% (étoile rose), 3000 m sur le profil de pente 1% (triangle vert) et 4000 m sur le profil de pente 1% (étoile cyan). La profondeur de la source est de 30 m pour chaque distance simulée. Les positions réelles sont les cercles larges de la couleur associée. Pour chaque signal testé, on trace les 5 meilleures positions dans le plan (distance, pente) à gauche et dans le plan (distance, profondeur) à droite. Les meilleures positions estimées se situent dans un secteur de pentes consécutives et ne sont pas dispersées. L'estimation de la profondeur se dégrade avec la distance mais cela est également dû à la grille irrégulière utilisée pour crée les RI théoriques. 126
- 5.19 Zone de Cabo San Lucas zoomée autour du point Punta Ballena. L'hydrophone de Punta Ballena est indiqué par le carré jaune, mouillé à 5 m du fond aux coordonnées [22.88413 N; -109.84315W]. Les points géolocalisés auxquels des rampes de fréquence ont été émises (bathymétrie : *The GEBCO 2014 Grid*, www.gebco.net) 127
- 5.20 A gauche : signal extrait des enregistrements de CABO 2015, correspondant à l'émission d'une rampe de fréquence entre 100 Hz et 1000 Hz de 8 s de durée par une source positionnée au point WP 230. A droite : Signal synthétique simulé par MATLAB et propagé par BELLHOP dans l'environnement simulé de Punta Ballena, reçu sur l'hydrophone de Punta Ballena. Le signal est une rampe équivalente à celle de l'image de gauche, émise par une source à 1.33 km de l'hydrophone et 5 m de profondeur (soit près du point WP 230 de la campagne CABO 2015). 128
- 5.21 RI dégradée (en noir) permettant de distinguer des paquets de trajets du signal reçu présenté en figure 5.20. En rouge sont tracés les trajets théoriques pour la source à 1.33 km et 5 m de profondeur simulés par BELLHOP. Il y a propagation multipaquets et chaque paquet d'arrivée cache bien plusieurs trajets individuels 129
- 5.22 Résultat du warping sur le signal représenté en figure 5.20 aux instants d'arrivée des 4 premiers paquets observés (cf. RI en figure 5.21). Les paquets, non visibles sur la représentation temps-fréquence du signal (figure 5.20), sont bien séparés grâce au warping et transformés en fréquence pure par l'opérateur de déformation temporelle lorsque la fenêtre glissante sur laquelle est appliquée la déformation passe au temps d'arrivée du paquet 130
- 5.23 Cartographie du coût estimé pour les RI théoriques pour une source évaluée en chaque point de la grille. Chaque point longitude/latitude représente le coût de la meilleure RI selon les profondeurs évaluées. La source est simulée à 1.33 km de l'hydrophone et à 5 m du fond (triangle blanc). L'unique hydrophone utilisé pour la localisation est indiqué par le carré jaune. Plus le coût est faible, plus la RI théorique est proche de l'observation et la couleur du point est rouge. Lorsqu'une RI théorique est trop courte ou ne permet pas d'associer au moins un trajet à chaque paquet observé, alors celle-ci est exclue des solutions possibles. Cela explique les zones non colorées dans la figure. La symétrie de l'estimation est bien visible avec les deux zones rouges symétriques par rapport à l'axe de symétrie tracé en pointillés noirs. Cet axe est un axe de symétrie de la bathymétrie. Les profils de part et d'autres de cet axe apporte des informations équivalentes à l'algorithme de localisation. 131
- 5.24 Dans le cône de recherche (i.e. entre les profils indiqués par des pointillés noirs et jusqu'à 5 km) est représenté le coût associé aux positions évaluées pour la localisation d'une source simulée à 1.33 km de l'hydrophone (soit près du point WP 230). Chaque point représente le coût de la meilleure RI, en profondeur, à cette coordonnée longitude / latitude. La position simulée est indiquée par le triangle blanc. On remarque la ligne de dégénérescence selon les profils et une augmentation de la distance avec la pente. Deux zones sont encadrées : cadre "type A" qui correspond à une bonne estimation de la position et cadre "type B" qui encadre les positions plus éloignées de la vérité. 132
- 5.25 RI de type 1 en bleu, proche de la vraie localisation de la source simulée. RI de type B en rouge, mauvaise estimation de l'algorithme. Ces RI montrent que différentes combinaisons de N trajets individuels dans M paquets mènent à une même RI dégradée observée. 132

5.26	Dans le cône de recherche (i.e. entre les profils indiqués par des pointillés noirs et jusqu'à 5 km) le coût associé aux positions évaluées est représenté en haut pour une source simulée vers le point WP225 (environ 850 m de l'hydrophone) et en bas pour une source simulée vers le point WP 232 (environ 2.7 km de l'hydrophone). Chaque point représente le coût de la meilleure RI, en profondeur, à cette coordonnée longitude / latitude. La position simulée est indiquée par le triangle blanc. On remarque la ligne de dégénérescence selon les profils et une augmentation de la distance avec la pente	133
5.27	Calcul de la réponse impulsionnelle dégradée selon la méthode IGA-VMM-HR (image centrale en dB, image de droite en linéaire). La rampe a été émise au point WP 230 soit vers 1.33 km de l'hydrophone. La signature temps-fréquence utilisée pour construire l'opérateur de déformation temporelle est tracée en blanc sur la représentation temps-fréquence du signal traité (image de gauche). Les 3 premiers parquets d'arrivée supposés sont fléchés en rouges	135
5.28	Résultats de localisation de la source pour 6 émissions successives réalisées au niveau du point WP 230 noté sur les figures à côté du triangle jaune indiquant sa position. On reconnaît la trajectoire de dégénérescence de l'algorithme de localisation selon des profils contigus. Pour la majorité des émissions, la zone du point WP 230 est la zone identifiée. La couleur indique la similarité entre la RI dégradée observée et la meilleure RI théorique selon la profondeur pour le point considéré. Le rouge indique la meilleure position.	136
5.29	Somme des cartes d'erreur RI simulée / RI observée présentées en figure 5.28. La localisation converge vers le point WP 230 indiqué par un triangle rose. Le biais peut être attribué aux approximations sur la bathymétrie et la profondeur du récepteur. En haut : résultat en échelle de couleur. En bas : résultats en contours en vert pour des coûts jusqu'à 2 fois le minimum, en jaune jusqu'à 5 fois, en orange jusqu'à 10 fois puis en rouge au-delà. Les pointillés indiquent la zone de recherche	137
5.30	Somme des cartes d'erreur RI simulée / RI observée sur 4 émissions successives au point WP 225 (distance d'environ 850 m) : en haut en échelle de couleurs continues et en bas en classes de résultats (vert pour les coûts jusqu'à 2 fois le minimum, jaune jusqu'à 5 fois, orange jusqu'à 10 fois, rouge au-delà). La localisation converge vers le point WP 225 (triangle rose). Avec seulement 2 paquets exploités, des régimes de minima secondaires peuvent être cependant observés (zone encadrée en rose sur les images)	138
5.31	Séquence présentant la répétition d'un <i>song unit</i> d'un chanteur isolé dans la zone de Punta Gorda (K. SEGER, communication personnelle). Le motif est la modulation de fréquence encadrée en rouge que l'on retrouve 3 fois dans chaque extrait <i>CABO 2013 - Courtesy of : Scripps Institution of Oceanography & Universidad Autónoma de Baja California Sur</i>	139
5.32	Réponses impulsionnelles dégradées des 3 rampes de fréquence. Les RI sont différentes mais ont des durées comparables.	140
5.33	Résultats à basse résolution de la localisation des 6 signaux sélectionnés. L'échelle de couleur s'étale du bleu au rouge, le rouge correspond à la meilleure correspondance entre RI simulée et RI observée. Les zones non colorées sont les zones exclues par l'algorithme de localisation (ex : RI trop courtes). L'emprise de recherche est indiquée par le cercle rose à 12 km. La bathymétrie est indiquée en isobathes. Les profils sont tracés en pointillés roses.	141
5.34	Résultats de l'application de l'algorithme de localisation sur la grille haute résolution d'emprise restreinte pour la première émission. En haut, le résultat est présenté comme dans les figures précédentes (en échelle de couleur du meilleur en rouge, au moins bon en bleu). Dans l'image du bas, nous avons tracé des contours pour les coûts inférieurs à 1.5 fois le minimum (vert), 2 fois le minimum (jaune), 3 fois le minimum (orange), rouge au-delà (le tout homogène à la seconde).	142

5.35	Résultats de l'application de l'algorithme de localisation sur la grille haute résolution d'emprise restreinte pour les 2 autres émissions : à gauche en échelle de couleur standard, à droite en classes de coûts. La première ligne est le signal central de la séquence, la ligne du bas correspond à la dernière rampe de la séquence étudiée. Les classes de coûts correspondent à des coûts inférieurs à 1.5 fois le minimum en vert, à 2 fois le minimum en jaune, à 3 fois le minimum en orange, au-delà en rouge (le tout homogène à la seconde).	143
5.36	Résultats de l'application de l'algorithme de localisation sur des données simulées, en haut : sur une simulation correspondant aux données réelles (distance de 10 km, profil de 130°); en bas : sur une source simulée à la même distance mais sur le profil de 30°	144
A.1	Interface entre deux milieux (Loi de Snell-Descartes)	154
A.2	Réflexions et transmission dans un milieu à 3 fluides (Loi de Snell-Descartes)	155
A.3	Individu pour l'algorithme génétique sur l'exemple de l'inversion géoacoustique (à gauche). Population de départ (à droite)	156
A.4	Quelques nouveaux individus sont introduits à chaque génération (un peu de diversité!) avec des croisements, des mutations	157
A.5	Le meilleur des meilleurs	157
B.1	Dauphin Commun	159
B.2	Baleine à bosse	159
B.3	Béluga	160
B.4	Phoque barbu	160
B.5	Colibri Calliope	161
B.6	Colibri à queue large	161

Liste des tableaux

2.1	Statistiques issues du traitement de cent sifflements de dauphins communs enregistrés durant la campagne ERATO 2009	50
3.1	Statistiques sur l'application d'un algorithme génétique (20 individus, 100 générations, 100 répétitions de l'algorithme génétique)	90
4.1	Statistiques sur l'application de l'AG (20 individus, 100 générations, 100 répétitions de l'AG) pour la méthode HR, la dernière colonne rappelle les résultats de l'inversion par la méthode BR 105	
5.1	Mesures effectuées le 4 février 2015 (début 15h48) dans la zone nommée Punta Ballena (<i>Courtesy of Kerri SEGER</i>)	117
5.2	Statistiques issues du traitement de cent sifflements de dauphins communs enregistrés durant la campagne ERATO 2009	145

Table des sigles et acronymes

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BF	Basse Fréquence
CPA	Closest Point of Approach
DGA	Direction Générale de l'Armement
ENSTA	Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne
ERATO	Evaluation Rapide de l'Environnement Acoustique par Tomographie Océanique
HF	Haute Fréquence
IGA-VMM-BR	Inversion GéoAcoustique - à partir de Vocalises de Mammifères Marins - Basse Résolution
IGA-VMM-HR	Inversion GéoAcoustique - à partir de Vocalises de Mammifères Marins - Haute Résolution
LIDAR	LIght Detection And Ranging
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord
RI	Réponse Impulsionnelle
REA	Rapid Environmental Assessment
RSB	Rapport Signal sur Bruit
RTF	Représentation Temps-Fréquence
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SONAR	SOund NAvigation and Ranging
SNR	Signal to Noise Ratio

Résumé

Contexte en deux mots

Quel avion vole sans météo ? Quel bateau navigue sans carte ?¹ Qui n'est pas vigilant à l'état des routes lors de chutes de neige ou encore aux alertes météorologiques ? Les populations civiles et militaires sont sensibles à leur environnement. Elles doivent tenir compte de ses propriétés physiques, de sa dynamique et de ses bouleversements qui impactent leurs activités et la sécurité des biens et des personnes. Bien connaître cet environnement et pouvoir prévoir ses évolutions représentent donc un atout majeur.

Il est donc nécessaire de pouvoir mesurer les propriétés de l'environnement, anticiper son évolution, le modéliser, en faire des statistiques, des bulletins, etc., en d'autres termes : réaliser des produits et jeux de données qui alimenteront les systèmes et les experts pour leur analyse. L'environnement recouvre les domaines de la géographie et de l'hydrographie (relativement statiques), et les domaines de la météorologie et de l'océanographie (plutôt dynamiques), mais également toutes les interactions entre ces domaines².

Le paradoxe dans le domaine militaire est que, souvent, les zones d'intérêt Défense sont peu (voire pas du tout) connues. L'information d'environnement est pourtant importante, du fait du caractère décisionnel qu'elle revêt et de son influence sur le succès d'une opération. Projetées sous faibles préavis, les Forces doivent donc être capables d'étudier rapidement les caractéristiques de la zone d'intérêt. C'est le concept de *Rapid Environmental Assessment* particulièrement développé dans le milieu maritime.

L'environnement marin est en interface avec les terres émergées, l'atmosphère, les fonds marins (et même forcé par la lune...). Il est ainsi le siège de nombreux phénomènes d'échelles spatiales et temporelles variées. C'est aussi 70% de notre planète encore peu connus (comment mesurer précisément tout ce volume ?). Les ondes électromagnétiques s'y propagent mal (quelques mètres pour les longueurs d'ondes du LIDAR), il ne reste donc que le son pour voir sous l'eau et étudier le milieu marin, en particulier les propriétés qui nous importent.

Motivations des travaux

Très tôt, l'homme a eu l'idée de se servir de l'impact de l'environnement marin sur la propagation du son dans l'eau pour estimer les propriétés de cet environnement (utiliser l'effet pour remonter à la cause). Contrairement à des mesures in situ qui restent ponctuelles et de validité limitée, l'instrumentation acoustique permet de lever de grands volumes rapidement et avec moins de moyens. L'analyse de la propagation acoustique pour estimer les propriétés du fond marin et de la colonne d'eau est appelée tomographie acoustique océanique. Les propriétés de l'environnement marin (vitesses du son dans les sédiments et dans la colonne d'eau, densités, atténuations, etc.) peuvent être directement reliées à des observations acoustiques par des modèles. Dans les méthodes d'inversion géoacoustique actives, un son est volontairement émis à un endroit et réceptionné à un autre endroit. L'inversion géoacoustique (inversion du problème) permet ainsi d'étudier les propriétés du canal dans lequel a eu lieu la propagation du son.

Les méthodes d'inversion géoacoustique passive sont des alternatives respectueuses de l'environnement et discrètes, de ces méthodes actives. Elles visent à inférer les propriétés du milieu marin à partir de son impact sur la propagation de signaux émis par des sources d'opportunité, c'est-à-dire par des

1. et vice versa

2. Certains l'étendent au spatial, à la géographie humaine, ... le périmètre du domaine n'est pas figé, on prend ici une dichotomie Défense

sources déjà présentes dans le milieu. Ces méthodes réduisent les moyens à déployer et donc les coûts afférents. Elles limitent l'énergie nécessaire puisque seules des récepteurs sont mis en œuvre (pas de source). Cette économie énergétique autorise des écoutes sur de longues périodes dans des zones qui ne seraient pas toujours accessibles.

Sans émission ni lourd moyen, elles se prêtent donc très bien à l'évaluation rapide et discrète de l'environnement (REA³). Cependant, le contexte passif réduit à zéro ou presque le niveau de connaissance de la source et du signal émis. On ne dispose que du signal reçu. Ainsi, contrairement à l'actif, la position de la source, son déplacement, la forme d'onde et le niveau émis sont inconnus. Les méthodes d'inversion géoacoustique passive sont donc construites à partir du signal reçu uniquement. L'objectif ultime en inversion géoacoustique passive est de s'approcher des performances atteintes par les méthodes actives tout en limitant le matériel nécessaire pour respecter les contraintes de coût et de discrétion. Le bruit ambiant et le bruit de bateau sont des sources d'opportunité omniprésentes et déjà utilisées dans le cadre de l'inversion géoacoustique passive. La richesse des signaux offerte par les mammifères marins est quant à elle encore peu exploitée. Ils proposent pourtant une grande diversité de signaux (type, forme, fréquences, durée, etc.). Ils sont présents dans le monde entier et sont, à quelques exceptions près (petit rorqual par exemple), de bons communicants. Nous avons choisi d'exploiter le potentiel de ces sources d'opportunité pour l'inversion, en particulier un type de signal encore non exploité : la modulation hautes fréquences de mammifères marins.

L'objectif des travaux menés dans le cadre de cette thèse est de étudier la faisabilité et les limites de l'inversion géoacoustique passive mono-capteur à partir de modulations de fréquences de mammifères marins (HF et BF). On s'attache à conserver un unique capteur pour rester proche du concept de REA et notamment de REA discret.

Organisation du manuscrit et synthèse

Le chapitre 1, Contexte et objectifs des travaux, présente le cadre des travaux et la problématique d'inversion géoacoustique passive. Il permet de comprendre comment nous en sommes arrivés à proposer d'utiliser des signaux de mammifères marins pour estimer les propriétés géoacoustiques du fond marin ainsi que les motivations de ces travaux. Le son et sa propagation sont utilisés depuis longtemps pour étudier l'environnement marin, comme en inversion géoacoustique. Pour assurer la discrétion et préserver l'environnement acoustique sous-marin, la communauté s'intéresse à des méthodes d'inversion géoacoustique passive, méthodes ne nécessitant pas d'émissions actives mais exploitant les sources sonores déjà présentes dans le milieu. Ainsi, des méthodes passives exploitant le bruit ambiant ou le bruit rayonné par un navire existent déjà et donnent de bons résultats. Les signaux biologiques (et principalement les émissions de mammifères marins) sont encore peu exploités. Pourtant, comme tout signal qui se propage dans le canal, ils sont porteurs d'informations sur celui-ci.

Après cette introduction, nous verrons dans le chapitre 2, intitulé Inversion géoacoustique passive à partir d'émissions hautes fréquences de mammifères marins, les grands principes de la méthode développée durant la thèse, les hypothèses de travail ainsi que les outils développés pour l'appliquer sur des modulations hautes fréquences de mammifères marins. La méthode et les outils développés sont positionnés dans l'état de l'art de l'inversion géoacoustique passive. Un seul hydrophone est utilisé pour respecter les contraintes de déploiement et de discrétion. Chaque signal candidat est d'abord traité individuellement. La piste du signal est extraite du premier écho reçu puis utilisée pour estimer la réponse impulsionnelle (RI) du canal. La RI permet d'extraire les temps d'arrivée des trajets avec lesquels la source peut être localisée. Après correction des pertes de transmission, le rapport entre le réfléchi fond - portant une information sur la nature du fond - et le trajet direct - référence non impactée par le fond - donne une estimée du coefficient de réflexion sur le fond en fonction de l'angle de rasance du trajet. Une collection de signaux permet d'obtenir ainsi une courbe du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance. Cette courbe sert d'observable pour la phase d'inversion géoacoustique. Les paramètres optimaux du modèle de fond choisi sont estimés durant cette dernière étape. Ce chapitre introduit également le jeu de données sur la base duquel la méthode a été pensée. Les signaux candidats pour notre schéma d'inversion sont des modulations hautes fréquences de dauphins

3. *Rapid Environmental Assessment*

(pente de 20 kHz/s, centrées autour de 10 kHz) présentant des multitrajets résolus par les moyens de traitement mis en œuvre. Nous avons analysé plus d'une centaine de modulations candidates à l'inversion et avons tenté d'appliquer le schéma d'inversion développé. Les sources sont localisées mais la courbe du coefficient de réflexion obtenue n'est pas physiquement valable (coefficient de réflexion en grande majorité supérieur à 1). La difficulté des sources que l'on souhaite utiliser provient de leur directivité que nous illustrons sur les vocalises analysées. Une étude sur la directivité est effectuée en deuxième partie de chapitre pour comprendre les verrous techniques à lever pour utiliser des sources directives en inversion géoacoustique passive. Les diagrammes de directivité des sources telles que le dauphin, sont encore peu (voire pas du tout) décrits dans la littérature. Sans être en mesure de présenter des résultats sur données réelles, nous présentons néanmoins les méthodes envisagées dans le cadre de la thèse pour contourner cette difficulté et pouvoir exploiter des sources directives dans notre méthode d'inversion géoacoustique passive mono-capteur. Un diagramme mesuré peut être modélisé sur une base d'harmoniques sphériques et, lorsque le diagramme est connu, l'utilisation du premier réfléchi surface, non perturbé par le fond, permet d'estimer les pertes de directivité à corriger.

Laissant dans un premier temps de côté les difficultés liées à la directivité de ces sources, nous présentons en détail dans le chapitre 3, intitulé Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - propagation multitrajet résolue, la mise en œuvre de la méthode d'inversion et les outils déclinés pour traiter des modulations hautes fréquences émises par une source omnidirectionnelle et présentant des multitrajets résolus dans la représentation temps-fréquence du signal. Des traitements simples basés sur le spectrogramme permettent d'extraire les observables nécessaires à la méthode d'inversion : les temps d'arrivée des trajets, les niveaux d'arrivée des trajets. Le milieu est considéré isocélère avec une bathymétrie plate ce qui permet de relier ensuite géométriquement les longueurs des trajets d'arrivée à la position de la source et aux différences de temps d'arrivée. Après correction des pertes de transmissions, le rapport entre les niveaux réfléchis fond et le niveau du trajet direct donne une estimation du coefficient de réflexion local pour le signal étudié. L'application à une collection de signaux permet d'obtenir une courbe du coefficient de réflexion estimé sur une zone d'intérêt de quelques centaines de mètres, portée contrainte par les outils mis en œuvre. Les performances de la méthode sont évaluées théoriquement et confortées par les résultats sur données simulées en environnement synthétique. La méthode est également appliquée avec succès sur des émissions contrôlées dans le Golfe du Lion. Dotée de ces outils dits basse résolution, cette déclinaison de la méthode sera nommée IGA-VMM-BR (pour Inversion GéoAcoustique à partir de Vocalises de Mammifères Marins Basse Résolution).

Pour étendre la portée de la méthode présentée dans le chapitre 3, et sous les mêmes hypothèses de milieu isocélère sur fond plat, nous ajoutons un étage de séparation haute résolution des trajets basé sur des opérateurs de déformation temporelle (*warping*). Ces outils sont présentés dans le chapitre 4, intitulé Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - séparation haute résolution des multitrajets, qui concerne les cas d'application plus complexes dans lesquels la propagation multitrajets n'est pas résolue par les outils de traitement simples de la méthode IGA-VMM-BR (chapitre 3). Cette situation est observée notamment au-delà de la portée de la méthode IGA-VMM-BR et dans certaines configurations source/hydrophone (ex : hydrophone près d'une interface). Un étage de séparation haute résolution des trajets est alors requis pour disposer d'une réponse impulsionnelle exploitable, c'est-à-dire permettant l'identification des trajets individuels (temps d'arrivée et énergie). Des outils basés sur la déformation temporelle du signal ont été développés et appliqués en amont de l'estimation de la RI, permettant une haute résolution des multitrajets. La loi de fréquence instantanée du signal sert de loi de déformation permettant de transformer chaque trajet d'arrivée en fréquence pure. Grâce aux propriétés des outils de déformation utilisés, une fois les observables extraits du signal déformé, il n'est pas nécessaire de revenir dans l'espace non déformé et le reste de la méthode reste inchangé à celle du chapitre 3. Les performances de cette méthode, nommée IGA-VMM-HR (Inversion GéoAcoustique à partir de Vocalises de Mammifères Marins Haute Résolution), sont décrites et comparées à la méthode BR. La séparation haute résolution des trajets permet d'étendre la portée et la durée d'écoute utile de la méthode IGA-VMM-BR. Les performances de la méthode sont illustrées sur le même jeu d'émissions contrôlées dans le Golfe du Lion que pour la méthode IGA-VMM-BR.

Enfin, dans le chapitre 5, Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - réponse impulsionnelle très basse résolution, nous descendons en fréquences pour profiter du caractère moins directif des vocalises basses fréquences de baleines à bosse. L'idée est en effet de s'affranchir de la directivité des signaux hautes fréquences tout en s'approchant des signaux candidats identifiés dans le chapitre 1 avec des sources moins directives, les baleines à bosse. Cependant, le cas étudié

est complexe car les signaux que l'on souhaite exploiter présentent des trajets non résolus au sens des deux méthodes présentées précédemment (IGA-VMM-BR et IGA-VMM-HR). Le jeu de données visé contient des vocalises de baleine à bosse enregistrées dans la zone de Cabo San Lucas (Mexique). L'unique hydrophone est positionné très près du fond si bien que même pour une source proche, les trajets ne sont pas individuellement séparables (le premier réfléchi surface et le direct sont très proches). A cela s'ajoute une bathymétrie irrégulière, bien différente du plateau du Golfe du Lion. La méthode doit donc être revue à plusieurs niveaux : 1) la localisation de la source, 2) l'estimation du coefficient de réflexion. La piste du signal est toujours exploitée pour estimer la réponse impulsionnelle du canal, point de départ de notre méthodologie générale pour obtenir les observables nécessaires : les temps d'arrivée des trajets et leur énergie. Pour disposer de la meilleure résolution possible de cette RI, l'étape de séparation haute résolution basé sur la déformation temporelle du signal est appliqué avant l'estimation de la RI. Néanmoins, au lieu de trajets individuels clairement identifiés et localisés relativement dans le temps grâce à la RI, seuls des temps d'arrivée de groupes de trajets sont obtenus. Sans connaître la position de la source, il n'est pas possible d'identifier les trajets composant chaque groupe. Nous proposons un procédé de localisation basé sur la comparaison de cette RI très basse résolution avec des répliques de RI (haute résolution) correspondant à des sources réparties tout autour de l'hydrophone (*matched impulse response*). Nous simulons, à l'aide de l'outil de simulation de propagation acoustique BELLHOP[®], la propagation dans l'environnement bathymétrique de la zone CABO avec un profil de célérité mesuré. Grâce à l'apport d'information par la bathymétrie accidentée de la zone, les sources peuvent être positionnées dans les 3 dimensions $[r, z, \phi]$ avec r la distance, z la profondeur et ϕ la direction de la source. La méthode de localisation est évaluée sur données synthétiques dans l'environnement de simulation des données réelles puis appliquée à des émissions contrôlées.

Pour finir, le chapitre 6, Conclusion et perspectives, présente la synthèse des travaux et les perspectives envisagées.

Contexte et objectifs des travaux

... ou comment en est-on arrivé à utiliser des vocalises de dauphins pour caractériser les fonds marins ?

Sommaire

1.1	L'environnement au sens large	5
1.1.1	Pourquoi s'intéresse-t-on à l'environnement ?	5
1.1.2	Que recouvre le domaine environnement ?	6
1.1.3	Les spécificités du milieu militaire, contexte de la thèse	7
1.2	L'environnement marin	8
1.2.1	L'influence du milieu marin sur la propagation	10
1.2.2	Comment connaître l'état du milieu pour anticiper la propagation acoustique ?	14
1.3	Etat de l'art de l'inversion géoacoustique passive	17
1.3.1	De l'actif au passif	17
1.3.2	Les alternatives à l'inversion active	18
1.3.3	L'inversion géoacoustique passive autonome	19
1.4	Objectifs scientifiques	34

1.1 L'environnement au sens large

"L'intelligence est parfois définie comme la capacité d'un individu à s'adapter à son environnement avec succès - ou à ajuster son environnement à ses besoins." Bruce Lee

1.1.1 Pourquoi s'intéresse-t-on à l'environnement ?

Le 6 juin 1944, les Alliés débarquaient en Normandie et, comme l'illustrent les exemples qui suivent, l'environnement n'a pas été sans impact sur cette opération majeure de l'Histoire. Les parachutistes, chargés de couvrir la zone du débarquement ont été dispersés loin du point de chute prévu. Des vagues de plus d'un mètre ont entraîné le naufrage de la majorité des chars amphibies lâchés à cinq kilomètres de la plage. Le plafond nuageux a gêné l'appui aérien des bombardiers, chargés de détruire les positions allemandes. Les courants ont fait dériver l'infanterie américaine jusqu'à un kilomètre à l'est du point prévu [LCL Gue \(2016\)](#). Considérations très militaires ? Pas uniquement. Paris 1910, en raison de plusieurs phénomènes météorologiques et géographiques, la Seine sort de son lit, atteignant huit mètre soixante-deux au niveau du pont d'Austerlitz. Les dégâts matériels sont énormes ainsi

que les conséquences économiques pour la région, si bien qu'en 2016, un exercice a été conduit à Paris pour préparer les moyens publics à réagir en cas de nouvel événement de cet ampleur. Juin 2016, la Seine dépasse les six mètres en quelques jours, transports en commun fermés, évacuations d'œuvres d'art, routes maritimes et routières impraticables mais aussi, malheureusement, des victimes. L'Histoire, jusqu'à nos jours, regorge d'événements qui ont marqué la mémoire collective et pour lesquels l'environnement a été décisif (Retraite de Russie en 1812, naufrage du Titanic en 1912, tempête de 1998, canicule de 2003, panique à Paris sous la neige en 2010... Aucun avion ne vole sans carte et sans météo, les conditions climatiques impactent la conduite sur route, ...). Les populations civiles et militaires sont sensibles à leur environnement. Elles doivent tenir compte de ses propriétés physiques, de sa dynamique et de ses bouleversements qui impactent leurs activités et la sécurité des biens et des personnes.

La connaissance, la compréhension de l'environnement (au sens large) et la maîtrise de ses impacts sur les hommes et leurs activités sont donc des enjeux essentiels. Les hommes surveillent l'état de l'environnement pour mieux le préserver mais aussi et surtout pour s'adapter au mieux à cet environnement ("au mieux" au sens économique, sécurité, écologique, ...). Briefing météorologique, avis aux navigateurs, neige en montagne, risque de verglas sur les routes, alertes orages, vagues et état de la mer, autant d'informations interprétées sur l'état de l'environnement auxquels nous sommes tous vigilants à titre personnel ou professionnel. Dans certains domaines, comme le domaine militaire ou celui de la sécurité, la maîtrise de l'impact de l'environnement sur les opérations (personnels et systèmes) est d'autant plus importante que l'information revêt un caractère décisionnel et engageant. On choisira par exemple de ne pas mettre en œuvre certains systèmes, d'évacuer une zone ou encore de positionner un capteur de manière à optimiser son fonctionnement selon les conditions d'environnement.

1.1.2 Que recouvre le domaine environnement ?

Améliorer notre connaissance de l'environnement et la maîtrise de ses impacts sur nos matériels et nos activités nécessitent de s'intéresser à toute la chaîne de l'information d'environnement - depuis l'acquisition de la donnée jusqu'à son exploitation (par exemple dans les systèmes d'armes).

L'acquisition de la donnée d'environnement passe par le développement, le déploiement et le recueil de mesures de capteurs *in situ* (e.g. radiosonde météo) ou déportés (e.g. satellite). La couverture reste partielle; même les images satellites présentent des trous d'information en présence de nuages à certaines longueurs d'onde. L'acquisition est principalement ponctuelle, contrainte dans le temps et dans l'espace que ce soit par les moyens de mesures, de stockage ou de transmission des mesures. On ne sait pas stocker les mesures indéfiniment au niveau du capteur sans les transmettre mais on ne sait pas non plus toujours transmettre de gros volumes de données sur les réseaux disponibles. La durée de validité d'une mesure est également limitée dans le temps surtout pour les milieux dynamiques comme l'atmosphère et les océans. Néanmoins, la donnée mesurée représente la vérité terrain (ou tout du moins une vérité capteur¹ (voir [Demoulin et al., 2000](#); [Le Gac, 2003](#))), sur ses emprises temporelle et spatiale de validité. De plus, cette donnée peut être réexploitée dans les produits climatologiques et/ou statistiques. Pour disposer d'une vision continue de l'information d'environnement (ce que l'acquisition ne permet pas), on a recourt à la modélisation (prévisions). L'environnement est mis alors en équations (Navier-Stokes, etc.) et des modèles sont développés et validés pour représenter au mieux l'état de l'environnement à l'instant donné et pour prévoir son évolution. Ils offrent une vision continue jusqu'en quatre dimensions (x , y , z et t ²). Ils sont propres aux milieux dynamiques comme les océans et l'atmosphère³. Néanmoins, un modèle ne décrit pas la vérité terrain et est limité par ses approximations et ses résolutions temporelle et spatiale qui ne permettent pas de voir les phénomènes de plus petite échelle. En météo, certains modèles de prévisions fournissent des sorties horaires, d'autres tri-horaires, et atteignent des résolutions de 1 km. Les modèles ont besoin des mesures *in situ* 1) pour comparer mesures et modèles et ainsi confirmer les résultats issus de la modélisation, 2) pour l'assimilation de données qui permet de recalculer le modèle à $t+1$ à l'aide d'observations à t . Un modèle n'est pas

1. Sur des mesures indirectes, on voit ce que le capteur voit, ce qui dépend de ses caractéristiques.

2. les 4 dimensions décrivent un volume qui évolue dans le temps, x , y , z étant les coordonnées spatiales et t le temps

3. En géographie, un modèle de données n'est pas un système d'équations mais une structure normalisée de l'information géographique à une certaine échelle... (Ah la Géo...)

projetable directement sur une zone d'intérêt car certains flux (ex : forçages) et une adaptation à la zone lui sont indispensables pour fonctionner. Le monde entier ne peut être couvert avec des modèles à mailles fines en raison de certaines limitations actuelles (mise en place, coût des calculs, volumes de données, etc.). De plus, l'état de l'art ne permet pas de décrire certains phénomènes qui ne sont alors pas prévisibles/prédictibles par les outils actuels (ex : apparition et dissipation du brouillard, paramètre très important notamment pour l'aviation et les performances IR). Si l'information d'environnement est complexe et s'adresse à des experts du domaine, elle doit également pouvoir être mise en forme pour être exploitable par les destinataires finaux souvent non avertis (le grand public, le décideur, le Pacha⁴, le système d'arme...). Pour cela, la phase de production est primordiale (production au sens réalisation de produits à destination de quelqu'un). On distingue les produits formatés destinés à être ingérés par des systèmes (messages météo, produits cartographiques, profils JJVV⁵), des produits expertisés, interprétés de type briefing, réalisés par des experts du domaine, dans lesquels l'information est synthétisée pour répondre à une question ("va-t-on pouvoir faire un barbecue", "pourra-t-on atterrir dans 2h sur la piste lambda"). Enfin, cette information, quelque soit sa nature, doit parvenir au destinataire final (le consommateur de l'information). Se pose alors la question de la diffusion de l'information avec les contraintes de flux, de confidentialité, de formats, d'accès à l'information... mais ceci est un autre vaste problème.

1.1.3 Les spécificités du milieu militaire, contexte de la thèse

"Qu'il pleuve ou qu'il fasse beau, on a toujours les mêmes rangeo !" dicton de l'Armée de Terre

La connaissance de l'environnement représente un atout considérable pour les opérations. Le Livre Blanc sur la Défense et la Sécurité Nationale de 2008 (*Le Livre Blanc*, 2008) stipulait ainsi que "L'évolution technologique des armements, la plus grande complexité des actions à mener et la maîtrise des dommages collatéraux placent les données d'environnement géophysiques⁶ au coeur de la maîtrise des systèmes de défense. Il y a dix ans, seuls quelques systèmes d'armes y avaient recours. Aujourd'hui, il n'est pas un système d'armes qui ne soit pas concerné par cette capacité." *Le Livre Blanc* (2008) précise plus loin que "Les efforts porteront en particulier sur le développement de moyens de recueil et d'analyse réactifs pour faciliter des déploiements rapides."

Le milieu militaire possède en effet quelques spécificités dans le domaine de l'environnement, qui sont illustrées dans l'image 1.1. En très schématique, plus on s'approche du théâtre d'opération (géographiquement et temporellement), plus l'information d'environnement doit être fine et locale tandis que les producteurs de données sont éloignés et les réseaux de communication sont contraints. De plus, l'environnement est transverse et les experts (METOC⁷, prévisionnistes, cartographes, topographes) soutiennent des domaines opérationnels très variés (e.g. dissémination NRBC, performances IR/EM, lutte sous la mer, etc.) dont les besoins en informations d'environnement sont également variés.

Les zones d'intérêt Défense sont souvent peu (voire pas du tout) connues et le préavis permettant d'étudier la zone est souvent très court. De plus, les échelles temporelle et spatiale de monitoring de l'environnement ne sont souvent pas les mêmes que dans le domaine civil. Du fait de la sensibilité de certains systèmes d'armes et du caractère engageant des décisions qui peuvent être prises au regard de la situation d'environnement, certains phénomènes qui sont surveillés régulièrement mais peu fréquemment par le milieu civil, seront suivis de près dans le milieu militaire (e.g. le profil de plage suivi à J+1 ou J+3 tandis que l'érosion des côtes est suivie à l'échelle de la dizaine d'années). Des moyens d'évaluation rapide de l'environnement sont donc nécessaires pour fournir l'information utile au déploiement des forces dans le *tempo* adapté aux phases des opérations. Décliné initialement pour le domaine maritime, le concept OTAN du *Rapid Environmental Assessment* (REA⁸) décrit différentes catégories d'évaluation rapide de l'environnement d'une nouvelle zone d'intérêt, permettant le recensement des informations nécessaires au soutien des opérations. Le terme "rapide" s'applique au délai de réponse disponible entre la demande et le début de l'utilisation de l'information. Cette opération de

4. Commandant d'un bâtiment de la Marine

5. format World Meteorological Organization BATHY des profils bathythermiques

6. géographie, hydrographie, océanographie, météorologie

7. expert METéorologie-OCéanographie

8. Concept de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord d'évaluation rapide de l'environnement

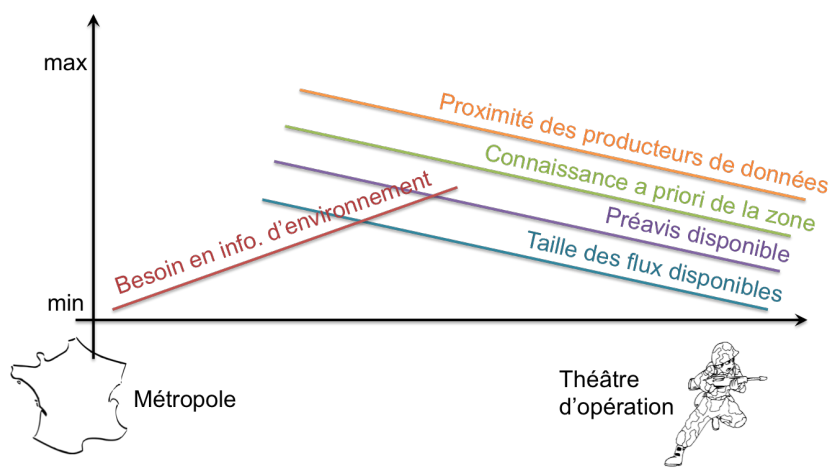


FIGURE 1.1 – L'environnement Géographique Hydrographique Océanographique et Météorologique au sein de la Défense. Les informations sur les zones méconnues doivent être envoyées rapidement, à longue distance, en environnement hostile.

recensement débute en amont du déploiement des forces et s'étend jusqu'au recueil des informations d'environnement par les unités au combat. Un 1^{er} niveau consiste en une recherche "bibliographique" sur l'information disponible sur une zone d'intérêt (archives, données de télédétection, modélisation, ...); on établit un dossier sur la connaissance *a priori* de la zone. Un 2^{ème} niveau consiste en des campagnes de levés et de mesures programmées avant l'arrivée de la force opérationnelle. Il est mené quelques mois ou semaines avant l'opération. A quelques jours ou quelques heures de l'opération, les moyens mis en œuvre devront être discrets (REA discret avec AUV⁹, drones, forces spéciales...). Enfin un REA opérationnel se déroule en même temps que l'opération et consiste en un recueil de données par les unités au combat.

Dans la Défense, l'environnement est couramment divisé en 4 domaines :¹⁰ géographique, hydrographique, océanographique, météorologique, auxquels certains ajoutent parfois le spatial, et couvre également les interfaces (interactions) entre ces domaines. La géographie et de l'hydrographie sont des domaines relativement statiques; ils évoluent lentement. Les océans et l'atmosphère sont au contraire très variables dans le temps et dans l'espace. Ces milieux sont les plus contraignants en termes de REA (une plage est métamorphosée après une tempête) et nécessitent le développement de méthodes permettant de garantir une information la plus à jour possible sur leur état (physique, chimique, etc.). En interface avec tous les domaines, l'environnement marin est particulièrement important d'autant plus qu'il est le lieu d'enjeux opérationnels et économiques (zone arctique, mer Méditerranée, ...).

1.2 L'environnement marin

"Quel océan fera-t-il demain ?"

L'environnement marin recouvre 70 % de la surface de la Terre, contient 97 % de l'eau de la Terre et joue un rôle majeur dans la régulation du climat. Il produit la majeure partie de l'oxygène que

9. Autonomous Underwater Vehicle

10. GHOM pour Géo : l'étude du terrain et des sols, Hydro : études des fonds immergés, Océano : études des masses d'eau, Météo : étude de l'atmosphère, mais aussi parfois de l'espace. Certaines nations rattachent même d'autres spécialités à l'environnement comme la géographie humaine que la France place plutôt dans le domaine du renseignement. On utilise ici le découpage du métier ENvironnement de la DGA

nous consommons. 80 % du commerce mondial s'effectuent par voie maritime. Et pourtant 90 % des fonds marins restent à explorer. L'environnement marin c'est aussi pour la Marine Nationale plus de 30000 marins, 213 bâtiments, 10 sous-marins, 200 aéronefs (cf. Dossier d'Information Marine 2014) qui interviennent dans toutes les mers et océans pour assurer des missions variées de lutte sous la mer, lutte au-dessus de la surface, guerre des mines, action de l'état en mer, sécurité maritime, navigation, etc.

Beaucoup d'analogies peuvent être trouvées entre l'atmosphère et l'océan si ce n'est que le milieu marin est un milieu relativement opaque car, sous l'eau, la propagation des ondes électromagnétiques est rapidement limitée¹¹. Il ne reste alors plus que le son pour "voir" sous l'eau. Sous impulsion militaire, des systèmes de détection acoustique passifs sont mis au point dès la Première Guerre Mondiale pour détecter les sous-marins (Paul Langevin - 1915). Les sonars actifs arrivent un peu plus tard avec les progrès de l'électronique. Les Marines nationales ne sont pas les seules à exploiter ce principe : la pêche détecte les bancs de poissons par acoustique, les hydrographes relèvent les obstacles à la navigation à l'aide de sonars latéraux. Des instruments de mesures indirectes par acoustique ont en effet très vite été développés. Les sondeurs multifaisceaux permettent aux instituts hydrographiques d'établir des cartes de navigation précises permettant de garantir la sécurité de la navigation pour tous les usagers de la mer. Les sondeurs de sédiment sont utilisés par l'industrie pétrolière pour détecter gaz et liquide ou par la géologie marine pour caractériser le sous-sol. Finalement, tout cela est un peu du biomimétisme car les premiers sonars sont les mammifères marins et terrestres qui utilisent depuis toujours le son pour communiquer, se localiser et détecter.

La Défense et les hydrographes ne sont pas les seuls concernés par la propagation acoustique sous-marine. Les énergies renouvelables, l'économie, l'écologie, la biologie, la pêche sont autant de domaines intéressés. Pour certains, le son est un moyen de mesure ou de détection, pour d'autres c'est une gêne (furtivité, préservation de l'environnement). C'est le cas, par exemple, de l'installation des infrastructures d'énergie renouvelable. L'engouement pour ces énergies renouvelables a entraîné la construction de centrales offshore pour lesquelles des pieux doivent être enfoncés dans le sol (*pile-driving*) ce qui crée un niveau de bruit important pouvant nuire à la faune sous-marine (voir [Madsen et al., 2006](#); [Petersen and Malm, 2006](#); [Wilhelmsson et al., 2006](#)). Dès 1948, [Loye and Arndt \(1948\)](#) propose les bulles d'air pour faire écran au bruit. Le sujet du *pile-driving* reste un sujet d'importance actuellement avec de nombreux travaux. Le défi pour toutes ces applications est de bien maîtriser la propagation du son. Tout se joue donc autour des paramètres de l'environnement marin qui vont dicter et perturber la propagation acoustique.

Qu'est-ce qui régit la propagation du son dans l'eau ? La propagation des ondes acoustiques dans l'eau obéit aux lois de la mécanique de fluide et est donc décrite par l'équation de Helmholtz (cf. équation 1.1).

$$\nabla^2 p(\vec{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2(\vec{r})} p(\vec{r}, \omega) = -\delta(\vec{r} - \vec{r}_s) \quad (1.1)$$

Le paramètre primordial dans cette équation est la célérité du son qui est fonction de la température, de la pression et de la salinité (et évolue dans le même sens que ces grandeurs). L'environnement marin est très variable dans le temps et dans l'espace. Il est le siège de phénomènes générés à des échelles variables avec des processus lents et de grande échelle comme la circulation thermohaline et d'autres rapides comme les ondes internes, des processus prévisibles comme la marée et d'autres plus difficiles à anticiper (upwelling, courant de Navidad). L'ensemble des phénomènes observés dans les océans influent sur la structure physico-chimique de la colonne d'eau et donc sur la propagation du son. De manière très simplifiée, on peut dire que le son suit le minimum de température. Toutefois, où est ce minimum ? Que se passe-t-il lorsqu'un tourbillon se forme ? Que se passe-t-il au passage d'un front océanique ou en présence de *meddies*¹² au large de Gibraltar ?

Une autre difficulté est que l'environnement marin, c'est de l'eau mais pas seulement¹³ ! C'est aussi une interface atmosphérique et une interface avec le fond. Que se passe-t-il lorsque le vent refroidit la couche superficielle ? En environnement petits fonds, la principale source d'erreur pour l'estimation

11. A l'inverse, peu de capteurs acoustiques, sauf par exemple le SODAR, existent pour le milieu atmosphérique dans lequel le son se propage moins bien

12. poche d'eau salée arrivant de la Méditerranée

13. Il est ainsi décrit par les 3 domaines d'étude : hydrographie, océanographie et météorologie marine

des performances sonar est la description géoacoustique du fond, en tout cas des premières couches, par lequel le son, qui y pénètre, est atténué. La connaissance d'autres paramètres que la célérité dans l'eau (ou les paramètres dont elle dépend) est donc indispensable, notamment la nature du fond, les vitesses de compression, densités et atténuations des couches de sédiment.

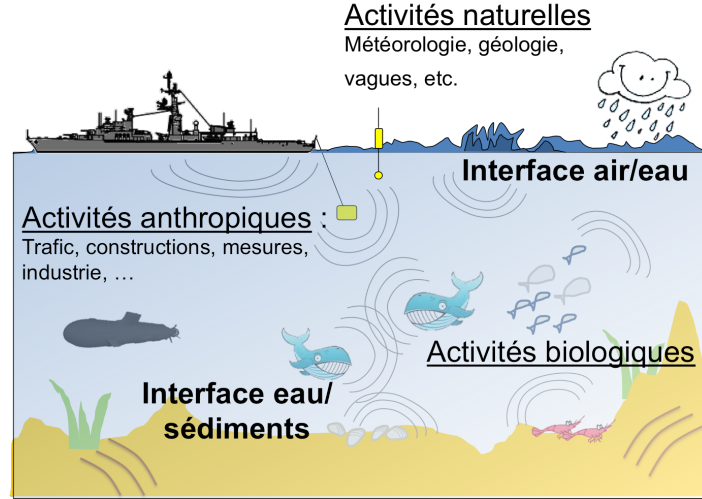


FIGURE 1.2 – L'environnement marin illustré

Enfin, l'environnement marin est un mélange d'activités intenses biologiques, naturelles et anthropiques (figure 1.2) qui, acoustiquement parlant, se gênent (*Opzeeland et al. (2012)*) et brulent l'acoustique. Tout élément impactant la propagation du son présente donc un intérêt et nécessite d'être connu (i.e. décrit, modélisé, ...).

1.2.1 L'influence du milieu marin sur la propagation

1.2.1.1 Ce qui régit la propagation acoustique

1.2.1.2 Quelques mots sur les modes et les rayons

Ce paragraphe vise à donner quelques explications sur la propagation modale et l'approximation par des rayons (notions que nous mentionnons dans l'état de l'art), sans être un cours. Il est basé sur différentes sources dont les cours d'acoustique de J. BONNEL et C. GERVAISE, les livres de X. LURTON. Tout commence par la résolution de l'équation de Helmholtz, alias l'équation d'onde.

$$\nabla^2 p(\vec{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2(\vec{r})} p(\vec{r}, \omega) = -\delta(\vec{r} - \vec{r}_s) \quad (1.2)$$

avec $c(x, y, z)$ la célérité du son dans la colonne d'eau. Dans un milieu homogène infini, on aura $c = \text{constante}$, dans un milieu invariant en distance, on a un profil de célérité $c(z)$. Lorsque le milieu est *range-dependant* alors $c = c(r, z)$. Il existe des cas simples comme celui de l'onde plane $p(t) = p_0 \exp 2\pi j f_0 (t - x/c)$ (f_0 la fréquence de l'onde sinusoïdale) qui se propage selon la direction x uniquement. Dans le cas général, la résolution est plus compliquée. La théorie des modes et la théorie des rayons sont en fait deux résolutions différentes avec des conditions d'application et des approximations différentes.

Les modes - Lorsque la célérité c ne dépend que de l'immersion z (milieu invariant en distance), on peut résoudre 1.2 sans source avec la théorie des modes en supposant une solution avec séparation des variables de la forme $p(r, z) = \Phi(r)\Psi(z)$. On sépare ainsi la description de la propagation dans le plan horizontal et celle dans le plan vertical avec les interactions aux interfaces. Ces interactions aux interfaces font apparaître des modes de résonances dont le nombre augmente avec la fréquence du signal et diminue avec la hauteur d'eau. Après "quelques" manipulations, la solution modale exacte de l'équation de Helmholtz 1.2 sans terme source est donnée par une somme des contributions de ces modes plus ou moins excités par la source considérée :

$$p(r, z) = \frac{i}{4\rho(z_s)} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_s) \Psi_m(z) H_0^{(1)}(k_{rm}r) \quad (1.3)$$

avec H_0 la fonction de Hankel, k_{rm} le nombre d'onde horizontal (composante horizontale du module du vecteur d'onde $\vec{k}$), ρ la densité, z_s la profondeur de la source. La théorie des modes est applicable à toutes les fréquences mais elle est plus lourde à mettre en œuvre aux hautes fréquences en termes de calculs car le nombre de modes propagatifs augmente avec la fréquence. Les vitesses de groupe et de phase sont des propriétés intéressantes de la propagation modale car elles représentent la relation de dispersion et contiennent donc des informations sur le milieu (équations 1.5 et 1.4).

$$\nu_{pm}(f) = 2\pi \frac{f}{k_{rm}(f)} \quad \text{vitesse d'un front d'onde} \quad (1.4)$$

$$\nu_{gm}(f) = 2\pi \frac{\partial f}{\partial k_{rm}(f)} \quad \text{vitesse de groupe i.e. d'un paquet d'ondes} \quad (1.5)$$

Pour la propagation d'un signal large bande, chaque fréquence se propage à une certaine vitesse, différente des autres. Le milieu marin agit comme un guide d'onde dispersif et le signal reçu par un capteur après propagation est déformé et contient plusieurs composantes modulées - les modes (eq. 1.6).

$$S(f) = \sum_{m=1}^N A_m(f) e^{-2\pi j \Phi_m(f)} \quad (1.6)$$

avec $\Phi_m(f) = r k_{rm}(f)$ la phase de chaque mode dépendant de la distance r source-récepteur et du nombre d'onde horizontal k_{rm} . L'amplitude A_m du mode m dépend des propriétés du canal de propagation et de la géométrie source-récepteur.

([Le Gall and Bonnel, 2013](#)) Quand on trace l'intensité acoustique créée par une source large bande en fonction de la distance et de la fréquence, on observe des striations correspondant aux interférences entre les modes. La pente de ces striations $\partial f / \partial r$ est souvent caractérisée par le scalaire $\beta(f, r)$ appelé invariant du guide d'onde, avec r la distance, f la fréquence. Cet invariant traduit la dispersion dans le guide d'onde. En milieu petits fonds, il est peu dépendant des propriétés du canal (comme les vitesses de compression) et est souvent estimé à $\beta = 1$ (valeur pour un canal idéal de Pékéris).

Les rayons - La théorie des rayons correspond à une approximation de la solution de 1.2 aux hautes fréquences. Aux hautes fréquences, la longueur d'onde devient petite devant les variations des caractéristiques du milieu (hauteur d'eau, variabilité bathymétrique). On fait donc l'hypothèse qu'on peut s'affranchir de la dépendance fréquentielle dans l'équation d'onde. Par analogie avec l'optique, manipuler les rayons en acoustique est très similaire à la manipulation des rayons lumineux de l'optique géométrique, perpendiculaires aux fronts d'onde. Cette approximation aux hautes fréquences permet de transformer l'équation de Helmholtz en une équation iconale (terme A dans l'équation 1.7) qui décrit la trajectoire des rayons sonores selon la célérité et une équation du transport (terme B dans l'équation 1.7) qui décrit l'évolution de l'amplitude des rayons. Comme cette approximation sera utilisée dans les travaux présentés, nous allons nous attarder un peu sur la théorie.

Pour résoudre 1.2, on postule cette fois une solution de la forme $p(\vec{r}, \omega) = A(\vec{r}, \omega) e^{i\omega\tau(\vec{r})}$, avec $A(r)$ l'amplitude, ω la pulsation, τ le retard. On effectue un développement limité en 0 de l'amplitude

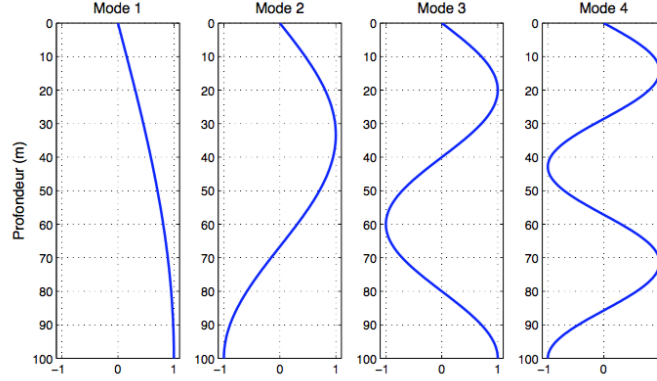


FIGURE 1.3 – Image issue de [Bonnell \(2010\)](#) : quatre premières fonctions modales dans un guide d'onde parfait ($\Psi_m(z)$ équation 1.3)

$A(\vec{r}, \omega)$ en $1/i\omega$ pour pouvoir supprimer les dépendances en fréquence aux hautes fréquences (pulsation ω grande). Le champ de pression p devient $p(\vec{r}, \omega) = e^{i\omega\tau(\vec{r})} \sum_{j=0}^{\infty} A_j(\vec{r})/(i\omega)^j$. On injecte cette solution dans 1.2 sans terme source. La règle de Leibniz permet d'écrire le produit scalaire entre 2 vecteurs : $\Delta(fg) = (\Delta f)g + 2\vec{\nabla}f\vec{\nabla}g + (\Delta g)f$, ainsi la première partie de 1.2 peut être développée :

$$\begin{aligned} \Delta p(\vec{r}, \omega) &= \Delta \left(e^{i\omega\tau(\vec{r})} \right) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(\vec{r})}{(i\omega)^j} + 2\vec{\nabla}(e^{i\omega\tau(\vec{r})})\vec{\nabla} \left(\sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(\vec{r})}{(i\omega)^j} \right) + \Delta \left(\sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(\vec{r})}{(i\omega)^j} \right) e^{i\omega\tau(\vec{r})} \\ \Delta p(\vec{r}, \omega) &= A + B + C \end{aligned} \quad (1.7)$$

Pour plus de lisibilité, on détaille le calcul de A, B et C.

$$A = e^{i\omega\tau(\vec{r})} \left(\vec{\nabla}^2(\tau(\vec{r}))i\omega + (\vec{\nabla}\tau(\vec{r}))^2(i\omega)^2 \right) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(\vec{r})}{(i\omega)^j} \quad (1.8)$$

$$B = 2\vec{\nabla}(\tau(\vec{r}))i\omega e^{i\omega\tau(\vec{r})} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\vec{\nabla}A_j(\vec{r})}{(i\omega)^j} \quad (1.9)$$

$$C = e^{i\omega\tau(\vec{r})} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\Delta A_j(\vec{r})}{(i\omega)^j} \quad (1.10)$$

On développe toute l'équation d'onde 1.2 en regroupant les termes pour faire apparaître les degrés de dépendance à la fréquence (1.11) :

$$\Delta p(\vec{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2(\vec{r})} p(\vec{r}, \omega) = A'\omega^2 + B'\omega + \sum C_j \omega^{1-j} \quad j = 1 : \infty \quad (1.11)$$

pour rappel 1.11 vaut 0 pour tout ω . Les coefficients du polynôme sont donc nuls et l'approximation aux hautes fréquences - hypothèse d'application de la théorie des rayons - fait conserver :

$$A' = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \left| \vec{\nabla}\tau(\vec{r}) \right|^2 = \frac{1}{c(\vec{r})^2} \quad (1.12)$$

$$B' = 0 \quad \Leftrightarrow \quad 2\vec{\nabla}\tau(\vec{r}) \cdot \vec{\nabla}A_0(\vec{r}) + A_0(\vec{r})\nabla^2\tau(\vec{r}) = 0 \quad (1.13)$$

Après ces quelques manipulations, on obtient l'équation iconale - ou Eikonale - décrite par 1.12 et l'équation du transport décrite par 1.13. Pour résoudre l'équation iconale, on utilise la méthode des caractéristiques. On choisit la ligne caractéristique $\vec{r}(s) = [r(s), z(s)]$ qui est une trajectoire selon l'abscisse curviligne s . On évalue τ de 1.12 sur cette caractéristique et on pose

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{1}{c} \quad (1.14)$$

$$\frac{d}{ds}\tau(r(s), z(s)) = \frac{dr}{ds}\frac{\partial\tau}{\partial r} + \frac{dz}{ds}\frac{\partial\tau}{\partial z} \quad (1.15)$$

$$\frac{dr}{ds} = c\frac{\partial\tau}{\partial r} \quad (1.16)$$

$$\frac{dz}{ds} = c\frac{\partial\tau}{\partial z} \quad (1.17)$$

Si une solution vérifie 1.15, 1.16 et 1.17 alors elle est solution de 1.12 car :

$$\frac{d}{ds}\left(\frac{1}{c}\frac{d\vec{r}}{ds}\right) = -\frac{1}{c(\vec{r})^2}\vec{\nabla}c(\vec{r}) \quad (1.18)$$

et l'équation 1.18 relie bien la trajectoire $\vec{r}(s)$ à la célérité $c(\vec{r})$ du milieu. Cette équation est résolue numériquement par des outils comme BELLHOP[®] dans les cas complexes où c est fonction de r et de z . Dans le cas d'un milieu isotrope ($c = \text{constante}$), c'est plus simple et 1.18 revient à chercher des trajets sous forme de segments (1.20).

$$\frac{d^2}{ds^2}\vec{r} = 0 \quad (1.19)$$

$$\frac{d}{ds}\vec{r} = \text{cte} \Rightarrow \text{le vecteur tangent unitaire est constant} \quad (1.20)$$

La résolution de l'équation du transport 1.13 permet d'obtenir $A_0(s)$ et ainsi exprimer $p(s, \omega)$. Ce qui a été fait pour un rayon doit être répété pour les N rayons propres dont la trajectoire passe par le point (r, z) : $p(r, z, \omega) = \sum_{j=1}^N p_j(r, z, \omega)$.

La propagation en rayons est plus intuitive. Une source envoie le son dans toutes les directions selon des trajets qui auront des longueurs différentes et donc des temps de trajets différents. A un instant t , le signal reçu est vu comme une somme d'échos (rayons) j retardés de τ_j et atténués par les interfaces et la colonne d'eau. Si $h(t)$ caractérise le filtre appliqué lors de la propagation du signal émis $e(t)$ dans le canal, alors le signal reçu $s(t)$ vaut $s(t) = h(t) \otimes e(t) = \sum_1^N a_j \cdot e(t - \tau_j)$, a_j l'amplitude du rayon j qui dépend de la fréquence. On retrouve comme en optique la loi aux interfaces entre deux strates, Snell-Descartes : $\cos(\theta_1)/c_1 = \cos(\theta_2)/c_2$ (1 et 2 identifiant les deux milieux de la figure 1.4), avec un angle de réflexion critique défini par $\theta_c = \arccos(c_1/c_2)$ en dessous duquel les rayons ne pénètrent pas le fond (réflexion totale).

Il existe d'autres méthodes de résolution de l'équation 1.2 notamment dans les cas où le profil de célérité varie horizontalement (approximation de l'équation parabolique, [Lurton \(1998\)](#)).

Pour les méthodes décrites ci-dessus, le schéma 1.5 indique les régions de validité des modes et des rayons selon la fréquence et la hauteur d'eau. Les étoiles positionnent les campagnes exploitées dans le cadre de la thèse dans ce plan fréquences / hauteur d'eau avec : en rose : ERATO 2009 (cf. 2.2, campagne dédiée à l'inversion géoacoustique lors de laquelle des vocalises de dauphins ont été détectées et enregistrées, signaux candidats à notre schéma d'inversion géoacoustique passive), en noir : ERATO 2011 (cf. 3.4.1, campagne d'émissions contrôlées dans le Golfe du Lion, émissions représentatives des vocalises de dauphins que l'on souhaite exploiter dans notre schéma d'inversion géoacoustique passive), en bleu : CABO 2013 (cf. 5.2, campagne dédiée à l'enregistrement d'émissions de baleines à bosse dans la région de Cabo San Luca à des fins de monitoring passif), en vert : CABO 2015 (cf. 5.4), campagne d'émissions de *playbacks* de baleine à bosse.

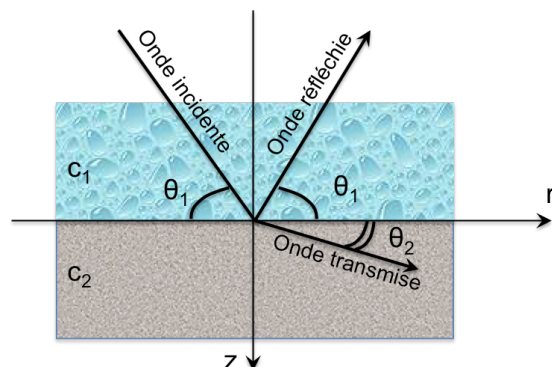


FIGURE 1.4 – Interface entre deux milieux (Loi de Snell-Descartes)

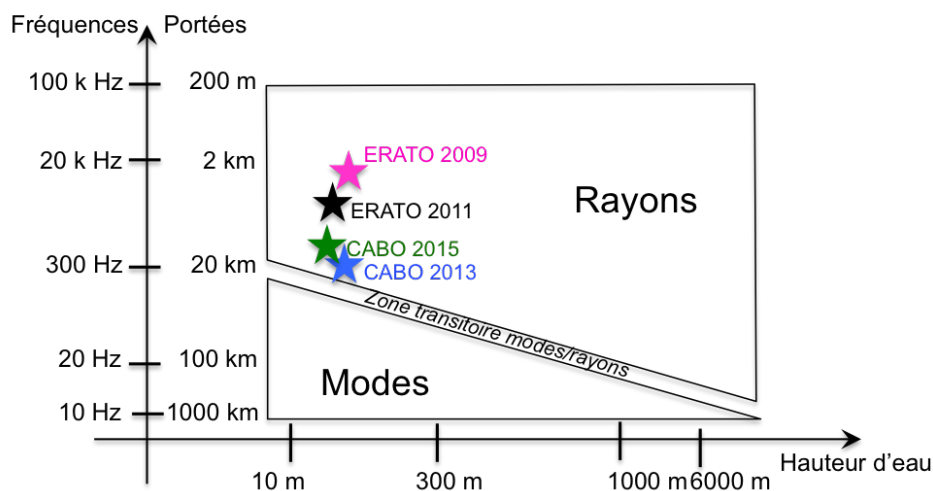


FIGURE 1.5 – Domaine de validité approximatif des théories modes et rayons. Les étoiles positionnent les campagnes exploitées dans le cadre de la thèse dans ce plan fréquences / hauteur d'eau : rose - ERATO 2009 avec de fréquences de l'ordre de 10 kHz dans 130 m d'eau, noire - ERATO 2011 avec des fréquences de l'ordre de 1 kHz dans 100 m d'eau, bleue - CABO 2013 avec des fréquences supérieures à 300 Hz dans 110 m d'eau ou moins, verte - CABO 2015, campagne d'émissions de *playbacks* de 100 Hz à 1 kHz dans 70 à 200 m d'eau

1.2.2 Comment connaître l'état du milieu pour anticiper la propagation acoustique ?

Naissance de la tomographie acoustique océanique et de l'inversion géoacoustique.

Comme vu précédemment pour l'environnement au sens large (GHOM), l'étude des océans passe par des mesures *in situ* et par la mise en place de modèles permettant de prédire les variations. Acquisition et modélisation sont liées par les besoins de comparaisons mesures/modèles et par l'assimilation de données au sein des systèmes opérationnels d'analyse et de prévision (tel que le système SOAP mis en œuvre par le SHOM). Côté modélisation, les modèles côtiers deviennent opérationnels (modèle

HYCOM¹⁴). Côté observations et mesures, il est difficilement envisageable d'accéder aux paramètres utiles à partir de mesures directes seules malgré le développement de nombreux réseaux de capteurs (bouées, profileurs, gliders, ...) et l'essor de l'imagerie satellitaire.

S'inspirant de la sismologie, [Munk and Wunsch \(1979\)](#) sont les premiers à proposer une méthode d'observation de l'océan à partir de mesures de propagation acoustique nommée tomographie acoustique océanique par analogie avec la procédure médicale de tomographie. Ils utilisent les variations des temps de trajets entre des sources basse fréquence (100 à 200 Hz) et des récepteurs de positions connues pour estimer les variations de la vitesse du son puis en déduire les variations de température ou de densité. Depuis [Munk and Wunsch \(1979\)](#); [Munk et al. \(1995\)](#), le concept de tomographie acoustique océanique - ou inversion géoacoustique - s'est développé. Les zones d'étude ont également évolué. De l'hauturier, les intérêts se sont progressivement tournés vers les milieux petits fonds (inférieurs à 200 m) pour répondre aux nouveaux besoins et enjeux stratégiques, civils et militaires. Plus proches des préoccupations actuelles en matière d'environnement, de gestion et de protection des ressources, d'activités économiques mais aussi d'activités de Défense, ces milieux sont paradoxalement encore mal connus. Complexes et très variables, ils sont le siège de nombreuses interactions entre les masses d'eau, l'atmosphère et les fonds marins générant des phénomènes de petites échelles (< 1 km) qui contribuent à la variabilité spatiale et temporelle des zones côtières. Pour s'adapter à ces nouveaux milieux, [Bagge-roer et al. \(1993\)](#) proposent une méthode non plus basée sur les temps de trajets mais sur l'observation du champ de pression le long d'une antenne d'hydrophones à une fréquence donnée pour estimer les paramètres géoacoustiques par comparaison de ce champ mesuré avec un champ simulé par un modèle théorique. Cette technique de traitement du signal, appelée *matched field processing* (MFP), a été introduite pour la localisation de source ([Bucker, 1976](#)) mais offre une grande variété d'applications en acoustique sous-marine ([Chapman and Ozard, 1995](#); [Tolstoy, 1993](#)). Les méthodes de *matched field inversion* permettent ainsi d'inférer les propriétés géoacoustiques du fond et de la colonne d'eau. Elles mettent en œuvre une fonction de coût basée sur le MFP qui compare le champ acoustique perçu au niveau d'un récepteur et les répliques de ce champ modélisées par un modèle de propagation acoustique pour différents jeux de valeurs de propriétés d'un modèle géoacoustique d'environnement ([Chapman, 1991](#); [Chapman and Ozard, 1995](#); [Dosso et al., 1993](#); [Henson et al., 1995](#); [Tolstoy, 1996](#)). Autre approche, réduisant le nombre de capteurs nécessaires et les traitements multi-capteurs lourds et coûteux, [Hermand \(1999\)](#); [Hermand and Gerstoft \(1996\)](#); [Porter et al. \(1997,9\)](#); [Potty et al. \(2000\)](#) proposent de comparer la réponse impulsionnelle d'un signal large bande propagé dans le milieu avec des réponses impulsionnelles mesurées. Cette technique est appelée *matched impulse response processing*.

La tomographie acoustique active a ainsi fait ses preuves sur des applications réelles et de nouvelles méthodes sont encore proposées avec des sources basses fréquences dont la propagation peut être modélisée par la théorie des modes¹⁵ [Bonnel et al. \(2013a\)](#); [Warner et al. \(2015\)](#).

Mais alors qu'est-ce que la tomographie ou l'inversion géoacoustique ? - La tomographie (*tomos* - la tranche et *graphein* - écrire) est une technique d'imagerie (donc non intrusive), utilisée en particulier dans l'imagerie médicale, en géophysique et en astrophysique. Elle permet de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées par tranche depuis l'extérieur de cet objet ([Wikipédia, 2016](#)).

On considère un **objet d'étude** que l'on veut connaître mais auquel on ne peut pas accéder directement, parce que c'est techniquement impossible (ex : une étoile) ou encore parce qu'y accéder signifie prendre de gros risques (ex : un organe humain). On choisit un **phénomène physique** qui peut interagir avec l'objet et servir de vecteur d'information (ex : on ne prendra pas les ondes électromagnétiques pour étudier les fonds marins car elles se propagent mal dans l'eau). Dans certain cas, la source du phénomène physique est dans l'objet d'étude (ex : en astérosismologie, l'étoile fournit le phénomène physique). Dans d'autres cas, on devra déployer la source (ex : en imagerie radiomagnétique). Un ou plusieurs **capteurs** sont déployés pour mesurer le phénomène physique. Cette **mesure** subit ensuite un certain nombre de traitements pour en extraire des observables. Les **observables**

14. *Hybrides COordinates Model*- Des produits d'HYCOM sont visibles sur le site de PREVIMER. Le modèle HYCOM est développé par un consortium international et la communauté des utilisateurs est constituée de chercheurs principalement situés aux Etats-Unis et en Norvège ; quelques laboratoires utilisent aussi ce code au Royaume-Uni, au Portugal, en Grèce et en France.

15. Modes et rayons sont expliqués dans le paragraphe 1.2.1.2

sont des caractéristiques du signal que l'on sait relier aux propriétés de l'objet d'étude par un modèle direct. On a la sortie de ce modèle mais pas les entrées. L'inversion du problème direct est la recherche des causes expliquant les effets observés, c'est-à-dire l'estimation des propriétés de l'objet d'étude qui expliqueraient au mieux (au sens du modèle choisi) les observables dont on dispose.

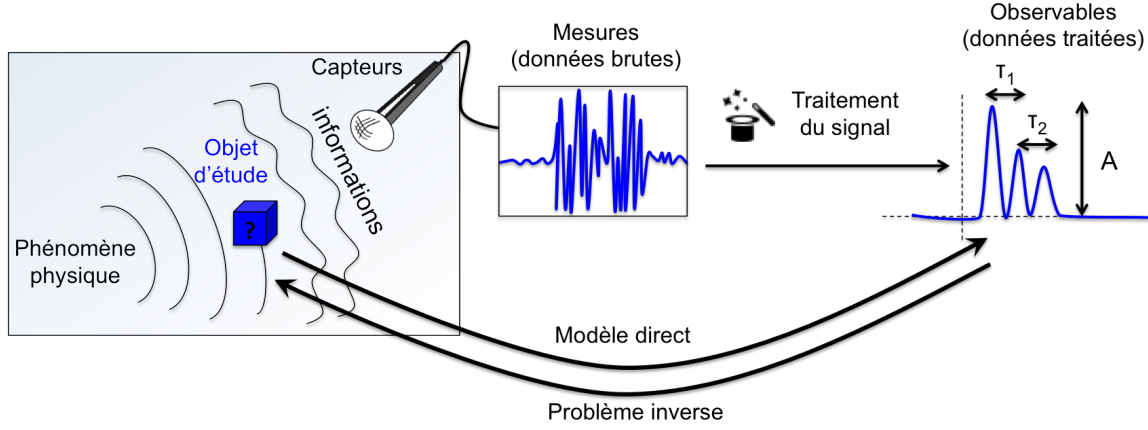


FIGURE 1.6 – Principe de la tomographie

Il y a donc deux grandes étapes en tomographie :

1. **l'élaboration du modèle direct** qui relie les observables $\vec{d}_{obs}$ issus des mesures aux propriétés $\vec{\theta}$ de l'objet d'étude (éq. 1.21)

$$\vec{d}_{obs} = f(\vec{\theta}) + \vec{b} \quad (1.21)$$

avec $\vec{d}_{obs}$ le vecteur des n_d observables, c'est à dire des mesures du phénomène physique après l'application des traitements, $\vec{\theta}$ le vecteur des n_p propriétés de l'objet d'étude que l'on souhaite estimer. $\vec{d}_{obs}$ et $\vec{\theta}$ sont reliés par le modèle de mesure f . $\vec{b}$ représente le bruit dû aux erreurs de mesures et aux erreurs intrinsèques du modèle.

La difficulté dans cette étape est le choix du modèle. Certains *a priori* sont parfois nécessaires pour choisir le meilleur modèle (ex : un modèle de fond mais avec combien de couches?). Le modèle peut être adapté en fonction de la source du phénomène physique mesuré. Cela peut permettre des approximations et des simplifications mais cela peut aussi restreindre ce que l'on "verra" de l'objet d'étude.

Des méthodes existent pour évaluer les performances d'un modèle comme les bornes de Cramer-Rao qui donnent la borne inférieure sur la variance d'un estimateur sans biais. (Voir l'application à la tomographie acoustique dans ([Baggeroer, 2011](#); [Gaucher and Gervaise, 2003](#); [Gaucher et al., 2004](#))). Une étude du conditionnement du problème permet de comprendre sa sensibilité selon les paramètres. Il s'agit d'évaluer les conséquences d'une erreur d'estimation sur un ou plusieurs paramètres pour évaluer l'erreur de prédiction (erreur sur la sortie du modèle). Plus cette erreur est grande, plus le modèle sera sensible au paramètre et ainsi plus ce paramètre sera facile à estimer. À l'inverse, si l'erreur d'estimation d'un paramètre n'entraîne que peu de différence sur la prédiction alors le modèle y est peu sensible et il va être difficile d'estimer correctement ce paramètre.

2. **la résolution du problème inversion (= inversion)**. On cherche le vecteur $\vec{\theta}_{est}$ tel que $\vec{d}_{obs} = f(\vec{\theta}_{est})$. On aimerait un opérateur g tel que $g(\vec{d}_{obs}) = \vec{\theta}_{est}$, soit $g = f^{-1}$ la fonction inverse du modèle de mesure. Bien sûr, en général, on a plutôt un problème non-linéaire, non inversible, sous-contraint, sans unicité de solution... On ne sait donc pas exprimer g . La méthode va alors consister à prédire des observations $\vec{d}_{pre}$ à partir de paramétrisations estimées $\vec{\theta}_{est}$ et de comparer la prédiction $\vec{d}_{pre}$ à la donnée observée $\vec{d}_{obs}$. Le vecteur de paramètre le plus probable, le plus crédible, $\vec{\theta}_{opt}$ est celui qui permet de faire coller au mieux $\vec{d}_{pre}$ et $\vec{d}_{obs}$. On cherche

$\vec{\theta}_{pre}$ qui minimisera l'erreur $\vec{e}$ entre l'observation et la prediction (éq. 1.24). La fonction de coût (fonction d'ambiguïté) choisie peut être :

$$\min_{\vec{\theta}_{est}} \left(\vec{d}_{obs} - \vec{d}_{pre} \right) \quad (1.22)$$

$$\min_{\vec{\theta}_{est}} \left(\vec{d}_{obs} - f(\vec{\theta}_{est}) \right) \quad (1.23)$$

$$\min_{\vec{\theta}_{est}} \sum_{n_d} \|\vec{d}_{obs} - f(\vec{\theta}_{est})\|_2 \quad (1.24)$$

avec n_d le nombre de mesures disponibles après traitement (i.e. la taille du vecteur $\vec{d}_{obs}$).

Pour réaliser l'optimisation (estimer $\vec{\theta}_{opt}$), lorsque l'inversion mathématique du modèle n'est pas possible, on applique des méthodes d'optimisation qui permettent de parcourir l'espace des paramètres pour trouver le minimum global de la fonction de coût. Le parcours dans l'espace des paramètres peut se faire de manière exhaustive ou, pour réduire les temps de calculs, de manière plus élaborée comme dans les algorithmes génétiques.

1.3 Etat de l'art de l'inversion géoacoustique passive

"Quand un bruit vous ennuie, écoutez-le" John Cage

1.3.1 De l'actif au passif

La tomographie acoustique océanique active est donc une méthode de mesure indirecte permettant de couvrir rapidement des volumes supérieurs à ceux couverts par les moyens de mesure *in situ*. Liée au concept d'évaluation rapide de l'environnement (REA), elle permet d'évaluer rapidement l'environnement en vue de prédire les performances des moyens acoustiques déployés. Elle nécessite d'émettre un signal connu, de manière répétitive, à une position connue et avec un fort rapport signal sur bruit. Or les émissions actives présentent deux inconvénients majeurs : la pollution acoustique et l'indiscrétion. Elles sont en effet maintenant considérées comme pollution acoustique et fortement suspectées d'être dangereuses pour la faune marine causant des perturbations pouvant aller de la simple gêne jusqu'à des pertes définitives d'audition [Southall et al. \(2007\)](#) et [Mellinger \(2016\)](#). Ainsi, en Europe, la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (CE, 2008) et (CE, 2010) organise et régle l'action des états afin qu'ils définissent les références d'un bon état écologique, qu'ils mettent au point les méthodes d'observation permettant l'acquisition des états initiaux et le suivi du résultat des actions de régulation qui seront décidées pour atteindre le bon état écologique. Cette directive définit, parmi un ensemble de descripteurs du bon état écologique, le descripteur *11a* qui exprime la pollution anthropique sur l'environnement marin à l'aide d'un ensemble d'indicateurs. L'objectif est de garantir que l'introduction d'énergie de sources sonores sous-marines s'effectue à des niveaux qui ne nuisent pas au milieu marin. Partant du constat que le bruit anthropique nuit à la santé des mammifères marins mais également que les interférences entre les sources biologiques et anthropiques gênent les études hydroacoustiques, [Opzeeland et al. \(2012\)](#) proposent une étude permettant d'extraire les niches acoustiques encore disponibles pour des émissions anthropiques. Ils proposent de décrire les caractéristiques vocales de mammifères marins d'Arctique et d'Antarctique en termes de fréquences, de durée et de période d'activité (nocturne, diurne) et montrent que les espèces ne se gênent pas entre elles. En effet, les espèces présentent des émissions distinctes en termes de durée, bande de fréquences et période d'émission avec peu de recouvrement inter-espèce. La superposition des caractéristiques anthropiques avec les caractéristiques de l'instrumentation acoustique classique (sonar, sondeur de sédiments, etc.) permet de décrire les niches acoustiques disponibles pour de nouvelles émissions anthropiques. Il reste peu de place et la conclusion des auteurs s'oriente vers une limitation des émissions acoustiques anthropiques. Au-delà de l'aspect écologique, la réduction des émissions est intéressante pour les besoins de discrétion. En effet, émettre signifie risquer d'être détecté par un tiers et donc se mettre en danger. Enfin, d'un point de vue économique, les techniques actives nécessitent de déployer des moyens, humains et matériels coûteux et consommateurs d'énergies.

1.3.2 Les alternatives à l'inversion active

Pour palier les limites des méthodes d'inversion active, des alternatives sont explorées avec pour objectif de réduire les émissions (donc la pollution sonore et le risque de détection), le matériel à déployer, et donc de limiter les coûts afférents. L'objectif est d'atteindre des résultats comparables à ceux des méthodes actives.

Gervaise et al. (2007) proposent une classification de ces méthodes d'inversion géoacoustique alternatives selon la connaissance *a priori* nécessaire sur la source, les traitements appliqués et le système de réception nécessaire. Ils proposent ainsi trois classes qui ont été évaluées dans le cadre de l'étude amont ERATO¹⁶ de la DGA :

- actif discret : la source est contrôlée. La forme d'onde est choisie pour limiter les risques d'interception et être cachée dans le bruit ;
- passif assisté : la source est une entité coopérante. Sa position est connue mais pas nécessairement le signal émis (forme d'onde, niveau, directivité, etc.) ;
- passif autonome : la source est une source d'opportunité, totalement inconnue. On ne dispose que du signal reçu. On ne connaît ni le signal émis (niveau, forme d'onde, durée), ni la date d'émission, ni la position de la source, ni son déplacement.

Une première alternative est donc la tomographie acoustique discrète. Elle consiste à choisir judicieusement le signal émis et le rapport signal sur bruit (RSB) pour permettre à un récepteur coopérant d'estimer la réponse impulsionnelle du canal tout en évitant l'interception du signal. *Cros et al.* (2005) proposent une méthode efficace de synthèse de signaux adaptés à la tomographie discrète qui consiste à mimer une composante du bruit du milieu. *Cros et al.* (2006) camoufle un signal actif synthétique dans le bruit rayonné par le trafic maritime. D'autres sources de bruit d'opportunité comme les vagues déferlantes peuvent être envisagées. Ces deux solutions de tomographie discrète montrent de bons résultats pour l'estimation de la réponse impulsionnelle du canal.

Même si la tomographie acoustique discrète requiert moins d'énergie, elle nécessite de déployer des moyens d'émission en plus des moyens de réception. Le risque de détection par un tiers reste présent.

La deuxième alternative est l'inversion géoacoustique passive assistée. Elle consiste à exploiter une source coopérante dont on connaît la position mais pas nécessairement le signal émis. Pour estimer la réponse impulsionnelle du canal, *Ioana and Quinquis* (2004) utilise la signature temps-fréquence du bruit rayonné par une source coopérante de position connue, enregistrée sur un unique hydrophone. *Jesus et al.* (2006); *Marinis et al.* (2002) exploitent les raies énergétiques rayonnées par un navire de position connue enregistrée sur une antenne verticale pour estimer le profil de célérité de la colonne d'eau en milieu petits fonds. Ils démontrent la faisabilité de l'inversion géoacoustique à partir d'une source coopérante avec les mêmes algorithmes qu'en inversion géoacoustique active.

Dans les années 90, *John L. Spiesberger* (1990); *Spiesberger* (1999) développent un algorithme qui permet d'estimer simultanément la position d'un oiseau - le carouge à épauvette *Agelaius phoeniceus* - et les paramètres de l'environnement grâce à la réponse impulsionnelle estimée entre la source et le réseau de microphones. La faisabilité de la tomographie acoustique océanique passive non assistée a depuis été démontrée (voir notamment *Gaucher*, 2005). Rien n'est connu sur la source si ce n'est le signal propagé reçu, enregistré sur un ou plusieurs récepteurs. Non intrusives, discrètes, ces méthodes passives exploitent les sources naturellement présentes dans l'environnement. Comme il n'est pas nécessaire d'émettre, elles requièrent des moyens beaucoup plus légers (simples "oreilles"), moins consommateurs en énergie et sont ainsi adaptées à des enregistrements sur de longues périodes. Les méthodes passives, pour lesquelles seuls les récepteurs sont à déployer, permettent d'étudier des régions peu accessibles, hostiles (ex : conditions climatiques extrêmes) ou même en contexte non permissif (ex : zones de conflits militaires). Tous ces avantages conviennent aussi bien à la discrétion requise par les activités militaires qu'à la préservation de la faune recherchée en écologie marine. Ces alternatives présentent cependant des difficultés techniques liées à la méconnaissance des caractéristiques et de la position de la source. De plus, on ne contrôle pas la présence des sources d'opportunité, ni leur répartition.

C'est cette dernière alternative (géoacoustique passive) qui va nous intéresser. Le paragraphe suivant dresse un bilan de l'état de l'art dans ce domaine, état de l'art dans lequel les travaux seront

16. Evaluation Rapide de l'Environnement Acoustique par Tomographie Océanique

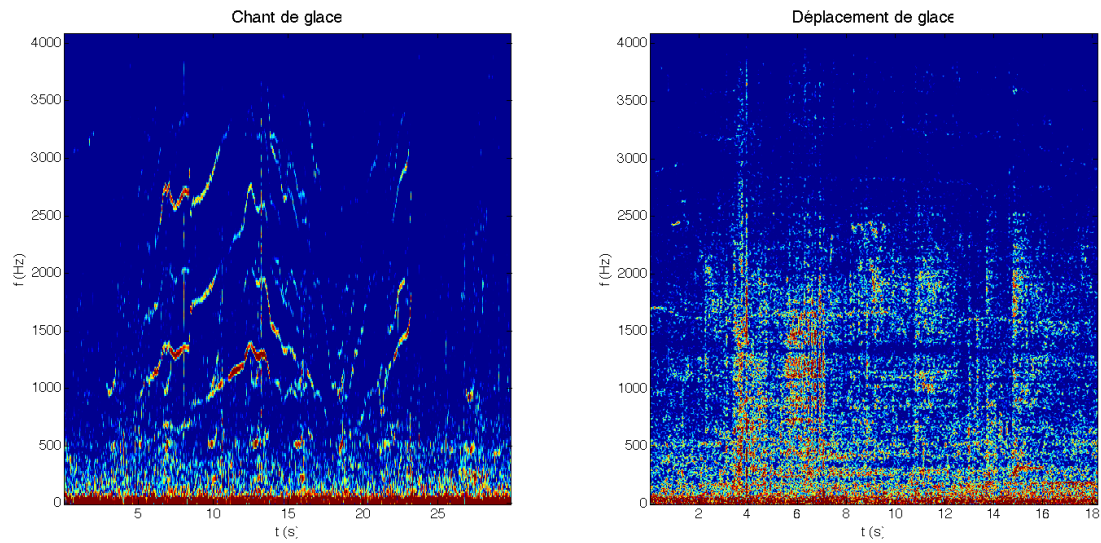


FIGURE 1.7 – A gauche : chant de la glace (porte qui grince). A droite : déplacement de glace (courtesy of C. GERVAISE)

positionnés dans le paragraphe 2.1.2.

1.3.3 L'inversion géoacoustique passive autonome

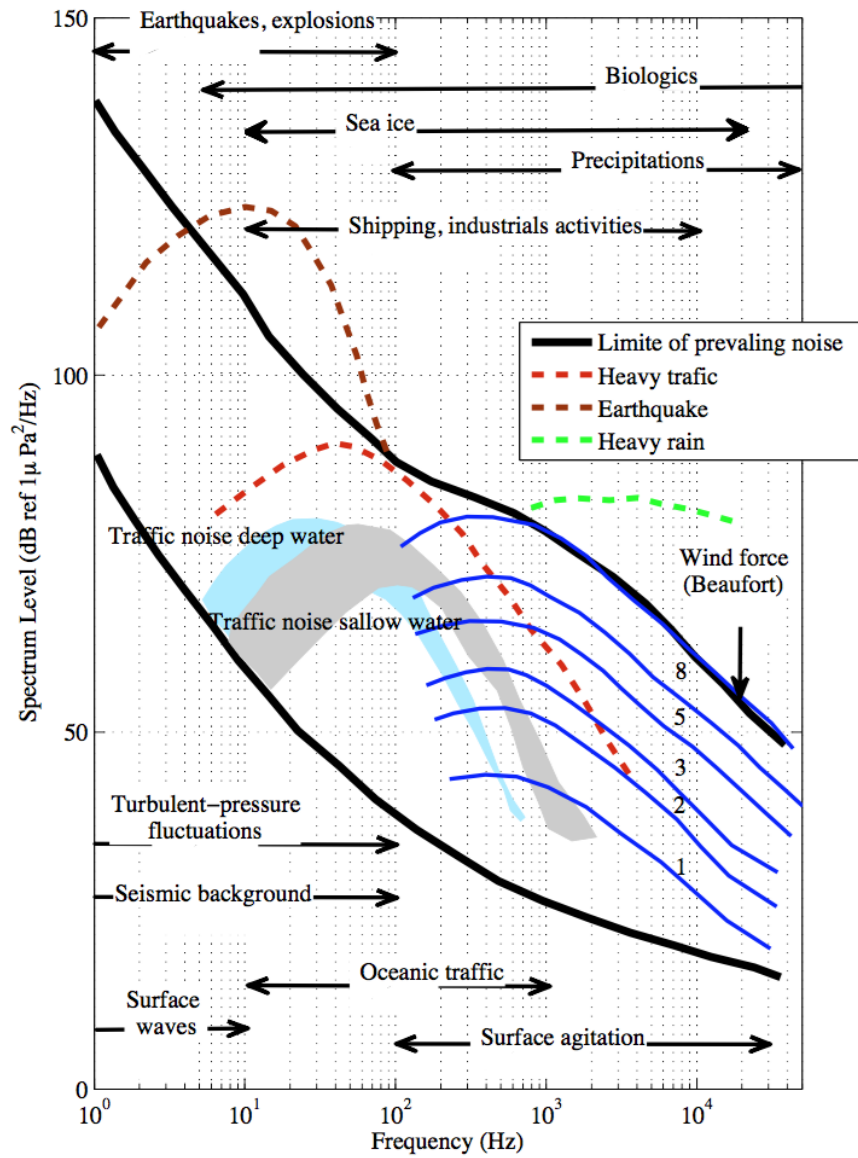
L'océan est loin d'être un monde de silence. Les sources d'opportunité sont nombreuses et sont autant de sources potentiellement exploitables par des méthodes d'inversion géoacoustique passive. On peut les regrouper en trois classes : les sons d'origine naturelle non biologique, les sons d'origine anthropique et les sons d'origine biologique. Pour chaque classe sont décrits dans ce paragraphe les grands axes de travail et les sources privilégiées pour l'inversion. Pour toutes les méthodes d'inversion, les enjeux sont les mêmes : localiser la source à partir du signal reçu, corriger a posteriori ce qui a perturbé le signal durant la propagation, atteindre des performances comparables à celles des méthodes actives et réduire les moyens matériels. Nous allons présenter les différentes classes de sources sonores que l'on peut (ou pourrait) utiliser en tomographie acoustique passive.

1.3.3.1 Sons d'origine naturelle non biologique (géophonie)

La géophonie est l'ensemble des sons provenant des éléments naturels comme les phénomènes météorologiques, les vagues qui déferlent, les bulles qui éclatent, la glace qui se détache, la Terre qui tremble et le bruit ambiant. Elle couvre toute la gamme des fréquences de quelques Hz pour les séismes à plusieurs dizaines de kHz pour les précipitations, les bulles et l'eau ([Wenz, 1962](#)).

Description de la source - L'origine du bruit ambiant naturel ne peut souvent pas être attribué à une seule source mais à une somme de signaux d'amplitude, de fréquence et de phase aléatoires. On lui associe trois principaux contributeurs indépendants qui correspondent à trois bandes de fréquences caractéristiques (communément admis depuis [Wenz, 1962](#)) :

- le bruit des turbulences océaniques et courants domine les infrasons (<10 Hz) ;
- le trafic maritime se concentre principalement dans la bande [10 Hz ; 1000 Hz]. Notez que ce contributeur est un contributeur anthropique. Il est traité dans le bruit ambiant car omniprésent

FIGURE 1.8 – Figure adaptée de [Wenz \(1962\)](#)

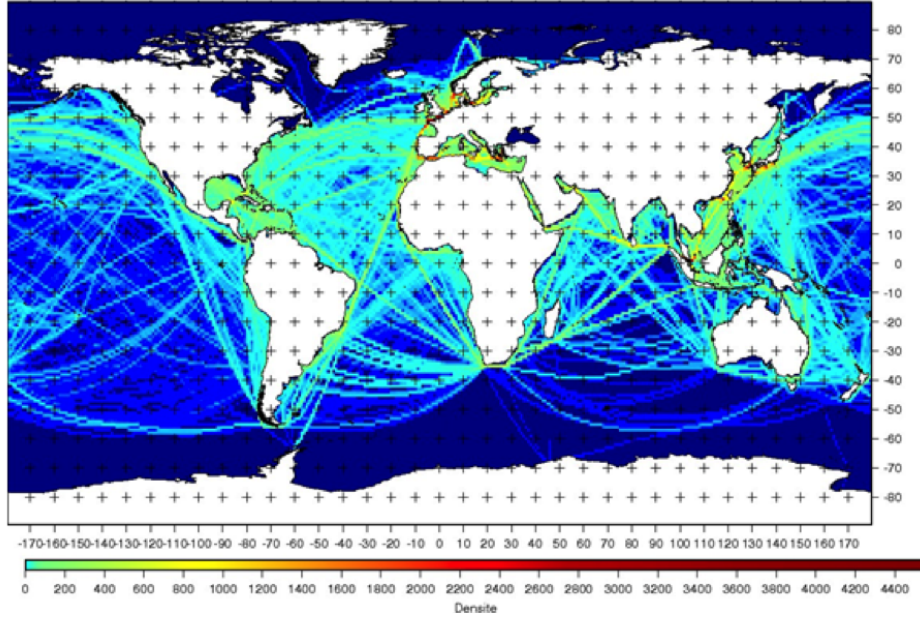


FIGURE 1.9 – Densité de trafic mondial issue des données 2013 de la base de données Llyod's (source SHOM)

dans le milieu marin même s'il est surtout concentré autour des rails de trafic et des ports. Des modèles statistiques de bruit de trafic existent. Ils peuvent être réalisés à partir des cartes de densité de navire (e.g. base de données de la Llyod's Maritime Intelligence Unit. Initialement renseignée par la collecte de mouvements de navires affiliés à la Lloyd's sur le terrain, les données récentes incluent les nouveaux systèmes d'observation AIS terrestre et satellite (voir figure 1.9) sans pour autant pouvoir être exhaustives). Comment passer de la densité de trafic au bruit de trafic ? Dans son modèle (CABAT¹⁷), le SHOM convertit cette densité en modèle de bruit de trafic statistique à partir d'une classification des différents navires en fonction de leur vitesse et de leur longueur puis en appliquant la formule de Ross qui intègre également la fréquence. Selon la fréquence, un modèle adapté de propagation acoustique est appliqué pour estimer les pertes de propagation. Dans chaque maille du modèle, les contributions des mailles voisines sont prises en compte en plus du bruit rayonné dans la maille elle-même (*Salvatera and Boutonnier, 2013*).

Le bruit de trafic ne cesse d'augmenter avec l'intensification du trafic maritime, l'augmentation de la taille de navires. *Hildebrand (2009)* mentionne également que l'augmentation de l'acidité des océans entraîne une diminution de l'absorption du son et donc augmente la portée du son, particulièrement dans la bande de fréquences concernant le bruit de trafic.

- l'agitation de la surface océanique, liée notamment aux conditions météorologiques, couvre une large bande fréquentielle de 0.2 Hz à 100 kHz. Le bruit dû à l'agitation de la mer (< 25 kHz) a été modélisé par *Knudsen et al. (1948)* comme un ensemble de courbes fonction de l'état de mer (équation 1.25).

$$NL = 56 + 19\log(S) - 17\log(f) \text{ en } dB \text{ re. } 1\mu Pa/\sqrt{Hz} \quad (1.25)$$

avec S l'état de mer ($1 < S < 6$), f la fréquence dans la bande [1 kHz ; 25 kHz] et NL le niveau de bruit dans une bande de 1 Hz. Les mécanismes principaux à l'origine de ce contributeur sont les vagues déferlantes et la pluie (*Hildebrand, 2009*). Le bruit thermique prédomine aux hautes fréquences (> 60 Hz).

17. Calcul de Bruit Ambiant de Trafic

Le bruit ambiant intervient dans l'équation du sonar (équation 1.26 en passif) et fait donc partie des paramètres d'entrée des outils de prédiction de portée sonar. Il peut être mesuré ou modélisé (comme ci-dessus) et des statistiques de bruit ambiant existent (e.g. modèle du SHOM).

$$SNR(R, \theta) = ASL(\theta) - TL(R) - NL + AG + PG \quad (1.26)$$

avec ASL le niveau apparent de la source dans la direction d'émission θ (en dB rel. $1\mu\text{Pa}$ @1 m), TL les pertes de transmission fonction de la distance R , NL le niveau de bruit ambiant, AG et PG respectivement le gain du récepteur et le gain de traitement.

Exploitation en inversion géoacoustique passive - Le bruit ambiant est rarement considéré comme du signal utile ; en général, on cherche à l'éliminer. Pourtant, il a été largement étudié en inversion géoacoustique passive et est une des premières sources exploitées. Pourquoi ? Comme tout son qui se propage, il interagit avec le canal et ses interfaces, et contient donc de l'information relative à son milieu de propagation. [Buckingham and Jones \(1987\)](#) partent de ce constat et proposent dès les années 80 une méthode pour déterminer l'angle critique de réflexion sur le fond à partir de la directionnalité verticale du bruit ambiant sur une antenne, fortement contrôlée par le fond en milieux petits fonds. Ils mesurent la distribution verticale de puissance du bruit ambiant dans la bande [100 Hz-1 kHz] et en déduisent l'angle critique de réflexion α_c sur le fond qui est relié à la vitesse de compression dans le sédiment par la relation $c_2 = c_1/\cos(\alpha_c)$.

Dans un contexte petits fonds, le bruit ambiant dépend de la distribution des sources de bruit mais aussi des caractéristiques des interfaces et de la colonne d'eau. [Carbone et al. \(1998\)](#) exploitent la mesure de cohérence du bruit ambiant large bande sur 2 hydrophones seulement et cherchent à maximiser le degré de similarité entre la fonction de cohérence mesurée et celle issue d'un modèle de bruit ambiant *a priori*. [Harrison and Simons \(2002\)](#) mesurent le coefficient de réflexion du fond à partir du rapport entre les composantes montante et descendante du bruit ambiant enregistré sur une antenne verticale. Ce rapport donne une estimation du coefficient de réflexion local ($R[\theta_b(\theta_0)] = A(-\theta_0)/A(\theta_0)$) en fonction de l'angle de rasance et de la fréquence. Contrairement à [Carbone et al. \(1998\)](#), aucun modèle de bruit ambiant n'est requis mais une antenne d'hydrophones est nécessaire pour la formation de voies. En appliquant la même approche sur une antenne verticale dérivante, [Harrison \(2004\)](#) obtient en plus une image de la structure sédimentaire du fond marin le long d'un profil. [Sanjana et al. \(2013\)](#) appliquent la méthode de [Harrison and Simons \(2002\)](#) sur trois environnements petits fonds à partir du bruit mesuré sur une antenne verticale. Ils estiment avec succès les pertes de réflexion à partir de la directionnalité du bruit ambiant dans ces zones ainsi que l'angle de réflexion critique.

[Roux et al. \(2005\)](#) utilisent la corrélation du bruit ambiant entre deux antennes d'hydrophones pour imager les couches superficielles du fond. [Siderius et al. \(2006\)](#) ; [Gerstoft et al. \(2008\)](#) et [Siderius et al. \(2010\)](#) estiment la hauteur d'eau et une image de la structure sédimentaire du fond en appliquant cette méthode sur les composantes montante et descendante du bruit ambiant enregistrées sur une antenne verticale dérivante. Ils tirent parti de la composante horizontale du bruit de surface. En effet, le bruit ambiant est principalement généré par le vent et les vagues, ce qui crée un bruit de surface modélisé par une surface infinie de sources. [Traer et al. \(2011\)](#) analysent l'impact sur cette méthode des réflecteurs discrets. Des post-traitements de données de l'échosondeur passif sont proposés par [Yardim et al. \(2010\)](#) ; [Yardim et al. \(2012\)](#), permettant d'extraire des images la profondeur et la puissance des principaux réflecteurs du fond. Toujours à partir d'une antenne verticale, [Quijano et al. \(2013\)](#) ; [Quijano et al. \(2012\)](#) proposent une méthode permettant d'estimer tous les paramètres (épaisseurs des couches, densité, vitesse de compression et atténuations) et les incertitudes associées par application d'une méthode d'inversion Bayésienne des pertes de propagation estimées à partir du bruit ambiant.

[Fried et al. \(2008\)](#) utilisent quant à eux une antenne horizontale d'hydrophones fixée sur le fond et évaluent l'angle critique à l'interface eau/sédiment.

On peut retenir que l'utilisation du bruit ambiant est intéressante car plus qu'une source d'opportunité, c'est une source omniprésente dans le milieu marin. Cependant, les méthodes développées nécessitent a minima 2 capteurs, voire le plus souvent une antenne verticale.

D'autres sources d'opportunité peuvent être utilisées comme les tirs sismiques, les transitoires émis lors d'un détachement d'iceberg. [Kinda and Bonnel \(2015\)](#) montrent que les hauteurs de marée peuvent

être estimées à partir du bruit rayonné par un rail de trafic enregistré sur un unique hydrophone. Le rail de trafic maritime est une source omniprésente qui induit des striations dans le plan temps-fréquences que les auteurs relient à la hauteur de marée.

1.3.3.2 Son d'origine anthropique (anthropophonie)

L'anthropophonie est l'ensemble des sons produits par l'Homme comme le bruit produit par le trafic maritime, par les activités militaires, l'instrumentation acoustique, les constructions d'infrastructures. Pourquoi ne pas utiliser notre propre production sonore pour réaliser l'inversion géoacoustique ?

Description du bruit de navire - Le bruit de bateau est la principale production sonore anthropique exploitées dans le cadre de l'inversion géoacoustique passive. Les navires génèrent des sons provenant de différentes origines (rotation et cavitation des hélices, moteurs, écoulement hydrodynamique sur la coque, ...). Même les bateaux les plus silencieux émettent suffisamment de bruit pour pouvoir servir de source à l'inversion géoacoustique. [Oudompheng \(2015\)](#) décrit, à travers une étude bibliographique, les sources composant la signature acoustique d'un navire de surface. Les deux grandes origines physiques du bruit rayonné par un navire sont les sources dites vibroacoustiques et les sources hydroacoustiques. Les sources vibroacoustiques désignent les zones physiques du navire qui entrent en vibration en créant des ondes acoustiques (ex : moteur). Les sources hydroacoustiques désignent des zones du navire qui interagissent avec le fluide environnant en créant des ondes acoustiques (ex : cavitation d'hélice). Conformément à la littérature, il propose des classes de sources acoustiques qu'il décrit selon leur origine (voir figure 1.10) et selon le composant mécanique du navire de surface auquel elle se rattache. On distingue :

- les sources acoustiques dues au propulseur (10 Hz à 10 kHz). L'interaction des pales du propulseur avec le fluide induit un bruit hydrodynamique large bande et un bruit tonal. Le bruit large bande provient des fluctuations des forces hydrodynamiques s'exerçant sur les pales. Le bruit tonal est quant à lui relié à la vitesse de rotation des pales (< 50 Hz). Ce bruit fort et basse fréquence a une longue portée. Les bulles qui éclatent au niveau du propulseur sont une autre source acoustique rattachée au propulseur. On parle de cavitation¹⁸. Pour les navires de surface, cette source est majeure et contribue de façon importante à la signature acoustique du navire. Plus les bulles sont grosses, plus les fréquences des émissions acoustiques sont basses. Des modélisations ont été développées pour le phénomène physique de cavitation (voir l'étude bibliographique et le modèle multi-bulles pour cavitation présentés dans [Maiga, 2008](#)).
- les sources acoustiques dues aux excitations mécaniques internes de la carène¹⁹ c'est-à-dire dues à la mécanique et à la machinerie du navire qui vibrent et génèrent un champ acoustique (< 300 Hz). Les vibrations et ondes acoustiques internes font vibrer la carène qui émet à son tour un champ de pression acoustique à l'extérieur. Selon les conditions (fréquence de l'onde incidente vs. fréquence propre de résonance de la carène, etc.) les vibrations de la carène sont atténuées ou amplifiées. Les sources internes sont essentiellement des pièces tournantes et créent donc des fréquences tonales liées à la périodicité des machines internes et aux modes de résonance de la coque du bateau.
- les sources acoustiques associées au mouvement du navire comme les vagues qui se brisent sur l'étrave (10 Hz à 2 kHz) ou le bruit du sillage du navire dû aux bulles transportées autour et sous le navire (10 Hz à 10 kHz). La modélisation du spectre de bruit de vague déferlante est la première étape envisagée pour modéliser le phénomène de vague d'étrave ([Deane, 2012](#); [Deane and Stokes, 2010](#), voir par exemple le modèle de). L'interaction avec la proue peut être prise en compte dans les modèles. Le rayonnement acoustique dû au transport de bulles dans le sillage est quant à lui difficile à modéliser. Le bruit de cavitation n'est pas prédominant en dessous de 10 noeuds.

Il existe des modèles paramétriques de signature acoustique de navire de surface constitués de gabarits spectraux dont les paramètres sont ajustés pour minimiser l'écart à des mesures réelles (voir

18. phénomène de changement de phase liquide-vapeur sous l'effet de la diminution locale de la pression
- phénomène de création de bulles de gaz dans un fluide dans une zone où la pression du fluide diminue et devient inférieure à la pression de vapeur saturante, à température constante

19. partie immergée de la coque du navire

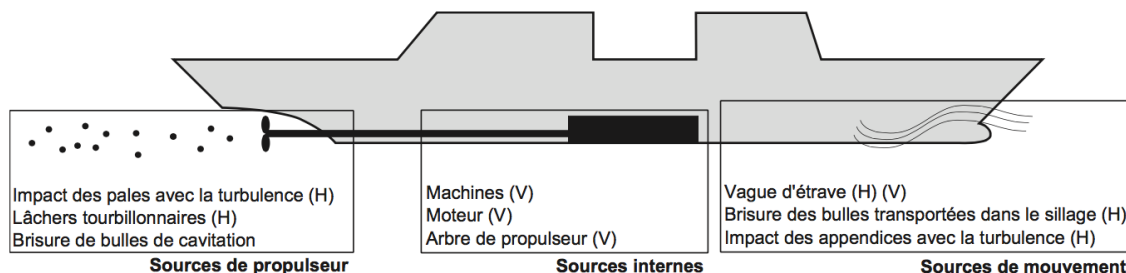


FIGURE 1.10 – Illustration issue de [Oudompheng \(2015\)](#) présentant les principales sources acoustiques de bâtiments marins et leur origine (V pour vibroacoustique, H pour Hydroacoustique)

notamment [Audoly et al., 2014](#), pour une description de ces modèles).

Pour ce qui nous intéresse en inversion géoacoustique, on peut considérer que 2 grands types de sons sont offerts par les navires de surface pour l'inversion en contexte passif : les raies spectrales (comme celles liées à la rotation de l'hélice) et les signaux large bande (comme ceux liés à la cavitation). La figure 1.11 montre un signal enregistré par un capteur devant lequel passe un navire. Le CPA²⁰ est visible ainsi que les effets du mouvement de la source sur une raie spectrale à 13.7 Hz. On observe également les modes de propagation dont le nombre augmente avec la fréquence. On peut localiser le navire en analysant les striations.

Exploitation en inversion géoacoustique passive - Les premières méthodes exploitant le bruit rayonné par un navire sont des adaptations des méthodes actives au contexte passif. [Mecklenbräuer and Gershman \(2001\)](#) se focalisent sur le bruit large bande rayonné pour inverser la hauteur d'eau du canal. [Battle et al. \(2003\)](#); [Jesus et al. \(2006\)](#) exploitent les raies énergétiques rayonnées par les bateaux pour estimer le profil de célérité de la colonne d'eau en milieux petits fonds. Ces méthodes sont basées sur du *matched-field processing* (comparaison entre le champ de pression mesuré et un champ de pression modélisé) ce qui nécessite des antennes d'hydrophones. Comme la source d'opportunité remorque elle-même l'antenne, le mouvement du bateau n'est pas exploité. [Park et al. \(2005\)](#) appliquent une méthode de *matched impulse response*, c'est à dire en comparant la RI estimée à celle simulée et en optimisant les paramètres pour faire coller la simulation à l'estimation. La RI est estimée par filtrage adapté avec le signal retourné temporellement. Une antenne horizontale est nécessaire pour cette méthode. Le mouvement de la source n'est pas utilisé non plus dans cette méthode. Ces méthodes sont à classer dans les méthodes d'inversion géoacoustique passive assistées puisque la position de la source est connue, la source étant le bateau qui tracte l'antenne de récepteurs. Elles visent à minimiser l'écart entre une mesure et la simulation selon un modèle de fond choisi a priori. Le mouvement de la source n'est pas exploité. Des antennes de capteurs sont nécessaires pour réduire le rapport signal à bruit et exploiter la diversité spatiale du champ de pression.

Pour réduire le nombre de capteurs, des méthodes plus récentes tirent profit du mouvement des bateaux. La diversité spatiale offerte par les antennes d'hydrophones est compensée par la diversité fréquentielle des sources large bande (voir [Hermand, 1999](#)).

[Nicolas et al. \(2003\)](#) utilisent les courbes de dispersion modale dans le plan fréquence - nombre d'onde induite par une source explosive (large bande basses fréquences, < 100 Hz). Ici, pas besoin de modèle de propagation acoustique pour *matcher* avec l'observation. En effet, les paramètres d'un modèle de fond sont analytiquement reliés aux observables extraits de la représentation de fréquence - nombre d'onde (i.e. les fréquences de coupure des modes²¹). Cette méthode ne nécessite pas de localiser la source pour réaliser l'inversion. Les auteurs démontrent la faisabilité de l'application de leur méthode d'inversion géoacoustique passive sur des données simulées de bruit large bande rayonné par un navire.

20. Closest Point of Approach

21. fréquence reliée à l'angle critique de réflexion sur le fond à laquelle un mode ne se propage plus

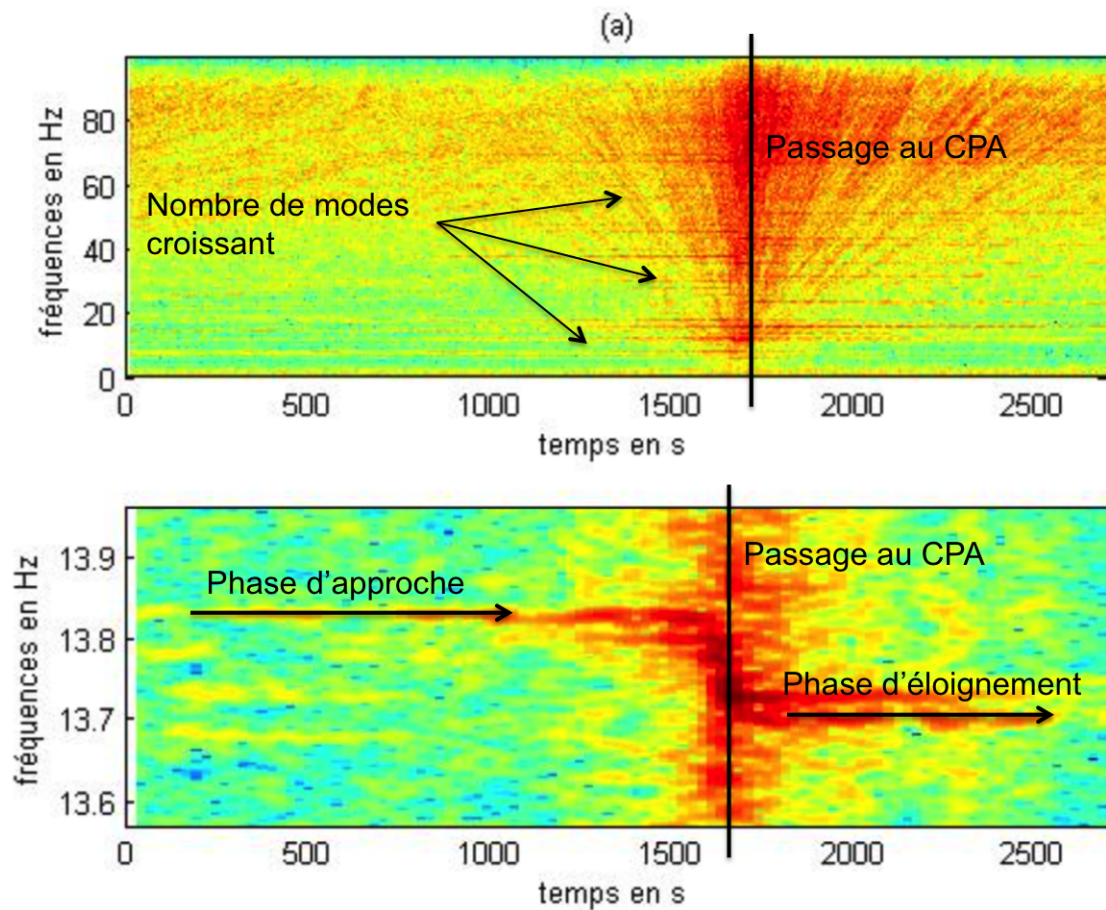


FIGURE 1.11 – Figure du haut : Signature acoustique d'un navire de surface effectuant une radiale devant le capteur en milieu petits fonds. Figure du bas : zoom sur une raie spectrale à 13.7 Hz permettant d'observer l'effet Doppler (illustrations issues de [Vallez et al., 2008](#)). On peut observer les striations caractéristiques de la radiale d'un navire, le temps de passage eu CPA ainsi que l'effet du mouvement du navire sur le contenu fréquentiel (figure inférieure). Les modes de propagation, dont le nombre augmente avec la fréquence, sont également visibles sur la figure supérieure.

La source explosive et le bruit du navire ont tous deux un spectre large bande mais le bruit de navire présente des raies spectrales en plus.

[Heaney \(2004\)](#) utilise les striations²² dans le plan distance/fréquence (notamment pentes et espacements en fréquence) créées par le passage d'un navire devant une antenne de récepteurs. Ils inversent, par *matched-field processing*, la position de la source ainsi que la vitesse de compression et l'épaisseur du sédiment d'un modèle de fond fluide semi-infini. Ils utilisent une antenne horizontale pour augmenter le rapport signal à bruit mais la méthode serait applicable à partir d'un unique capteur dans des environnements moins bruités. Les observables pour l'inversion sont la pente normalisée des striations, l'espacement fréquentiel minimal entre les interférences (ou son réciproque, l'étalement temporel) et l'atténuation moyenne sur une bande de 50 Hz qui sont estimés à partir des mesures et comparés à des données simulées.

Dans le même esprit mais avec d'autres observables, [Vallez et al. \(2008\)](#), [Vallez \(2009\)](#) et [Gervaise et al. \(2012\)](#) proposent des méthodes d'inversion à partir des phénomènes de dispersion modale provoqués par le mouvement du navire, soit à partir des raies spectrales ([Vallez et al., 2008](#)), soit à partir du bruit large bande ([Gervaise et al., 2012](#)). Ces méthodes exploitent la diversité spatiale offerte par le mouvement du bateau et la diversité fréquentielle du spectre rayonné et ne nécessitent donc qu'un seul capteur. Elles exploitent le caractère dispersif de la propagation modale des basses fréquences (< 500 Hz). Comme [Heaney \(2004\)](#), ils utilisent les phénomènes d'interférences entre modes, phénomènes induits par la propagation du bruit large bande et le mouvement de la source. Les observables pour l'inversion sont alors les courbes de dispersion relatives. Les paramètres du fond sont estimés par optimisation d'une fonction de coût entre mesures et modèles. L'exploitation des raies spectrales est également proposée avec l'utilisation de la modulation doppler (cf. figure 1.11).

Sans exploiter le déplacement d'une source et avec un unique hydrophone, [Bonnell et al. \(2010\)](#) exploitent un signal impulsionnel propagé dans un milieu petits fonds et proposent des outils d'extraction des courbes de dispersion modales basés sur la déformation (warping) temporelle et fréquentielle du signal pour accéder aux vitesses de groupe. Ces vitesses de groupe permettent ensuite l'estimation des paramètres de l'environnement (hauteur d'eau, célérité) par minimisation entre les vitesses de groupe estimées et celles modélisées. La position de la source doit néanmoins être connue.

Dans une approche complètement différente, [Chailloux et al. \(2011\)](#) utilisent non plus un unique navire comme source d'opportunité mais plusieurs navire constituant un rail de trafic et donc une source d'opportunité plus aisée à observer. On est alors à la frontière avec l'utilisation du bruit ambiant, constitué en partie du bruit de trafic.

Enfin, d'autres sources sonores d'origine anthropique peuvent aussi être utilisées en inversion. Ainsi, [Buckingham et al. \(2002\)](#) inversent le bruit de propulsion d'un petit avion pour mesurer la vitesse du son dans le sédiment marin.

On retient que le bruit d'un navire passant à proximité d'un hydrophone se prête bien à l'inversion à partir d'un unique capteur grâce à l'information apportée par le mouvement de la source.

1.3.3.3 Sons d'origine biologique (biophonie)

La biophonie est l'ensemble des sons émis par les êtres vivants. Tous les êtres vivants émettent des sons mais pas nécessairement par un organe vocal : certains sifflent du nez (la chauve-souris *Rhinolophe* [Hartley and Suthers, 1989](#); [Wotton et al., 1997](#)), certains claquent ou grincent des dents (le poisson clown [Colleye and Parmentier, 2012](#)), d'autres claquent des pinces (les crevettes claqueuses [Au and Banks, 1998](#); [Robert E. Knowlton, 1963](#)) ou encore d'autres font siffler leurs plumes (le colibri [Clark and Mistick, 2016](#)).

Nous nous intéressons aux émissions de mammifères marins dans le cadre des travaux de cette thèse.

22. Interférences cohérentes des multitrajets



FIGURE 1.12 – 1- Crevette claqueuse, 2- Colibri, 3- Rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*), 4- Poisson clown (*Amphiprion ocellaris*)

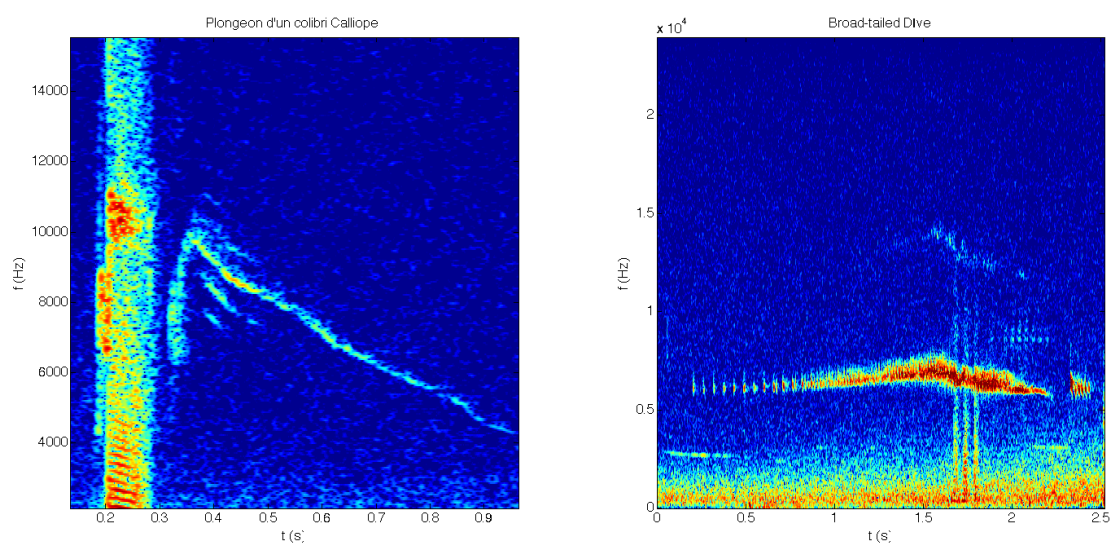


FIGURE 1.13 – A gauche : son produit par les plumes d'un colibri Calliope (*Stellula Calliope*) lors d'un plongeon (son : "pouet" puis sifflement descendant). A droite : son produit par les plumes d'un colibri à queue large (*Selasphorus platycercus*) (son : un sifflement avec tremolo). Les sons sont disponibles sur le site internet du laboratoire Animal Aeroacoustic <http://animalaeroacoustics.ucr.edu/gallery.html>

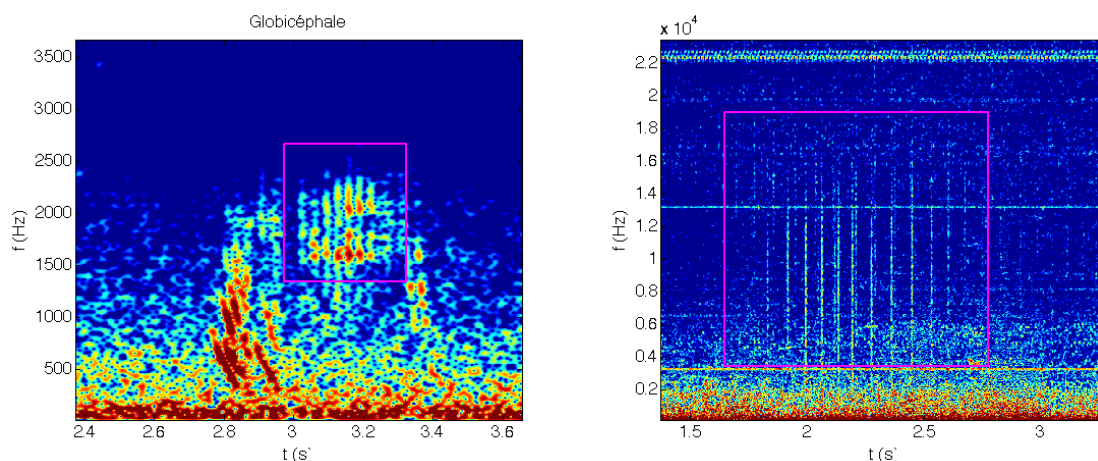


FIGURE 1.14 – A gauche : Série de clics de globicéphale enregistrés dans le Golfe du Lion lors de la campagne ERATO 2011 (Courtesy of SHOM), après $t=3$ s. La fréquence centrale se trouve autour de 2 kHz. Le train de clics, encadré en rose, est précédé d'un son bref à $t=2.8$ s, son entre une modulation et un ton pulsé (0.2 s environ, son : "pouet"). A droite : Série de clics de Beluga enregistrée à Pointe Noire, Québec (Courtesy of C. Gervaise).

Description des sources biologiques mammifères marins - Les cétacés offrent une grande diversité de signaux tant sur le plan des fréquences que des formes d'onde. On distingue notamment

- des impulsions large bande (ou clics). Ce sont des signaux transitoires utilisés par les mammifères marins notamment pour se localiser et chasser. La figure 1.14 présente des trains de clics pour deux animaux différents : le Globicéphale (*Globicephala*) et le Béluga (*Delphinapterus leucas*);
- des modulations de fréquences (ou sifflements ou vocalises). Ce sont plutôt des signaux de communication et sociaux. Sur la figure 1.15 (fenêtre de gauche), on peut voir une modulation de fréquence de phoque barbu (*Erignathus barbatus*). La modulation descend de près de 4 kHz à 400 Hz environ et s'étale sur plusieurs dizaines de secondes. Sur la figure 1.15 (fenêtre de droite), on observe une modulation de fréquence de baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*) enregistrée dans la zone de Cabo San Luca (voir paragraphe 5.2). La modulation dure environ 1 s pour 300 Hz de chute fréquentielle. Cette modulation est une unité de son d'un chanteur mâle isolé (K. SEGER - communication personnelle);
- des pavés temps-fréquence (appelés aussi grognements ou tons pulsés). C'est un signal assez complexe qui est constitué d'un train de clics très rapprochés avec des modulations de fréquences entre les clics le constituant. On observe bien la modulation sur la figure 1.16 (ondulations) sur le ton pulsé entre 3.5 et 4.5 s (suivi de quelques clics).

Une illustration de la diversité des émissions est présentée sur le cas du dauphin commun (*Delphinus delphis*) dans la figure 1.17 pour lequel on peut observer à la fois des clics au-delà de 10 kHz mais aussi des sifflements à partir de 8 kHz et un train pulsé de 7 kHz à 13 kHz.

Les bandes de fréquences des émissions de mammifères marins couvrent un large spectre fréquentiel depuis les vocalises de baleines bleues de quelques dizaines de Hz (en limite du spectre auditif de l'Homme) jusqu'aux clics de certains odontocètes atteignant plusieurs centaines de kHz (cf. figure 1.18 inspirée de [Mellinger et al. \(2007\)](#)).

En premier lieu, les chercheurs s'intéressent aux émissions de mammifères marins pour la localisation et le *tracking* de mammifères marins. Les objectifs poursuivis sont avant tout biologiques et servent la connaissance et la conservation des espèces (nombre, répartition, alimentation, éducation des jeunes, migration, comportement acoustique, mécanisme de production sonore, habitudes de vie, etc. [Zimmer \(2011\)](#)). On parle de *Passive Acoustic Monitoring (PAM)*. La littérature est riche sur ce thème pour un grand nombre d'espèces et pour des signaux variés. Voici quelques exemples, sans

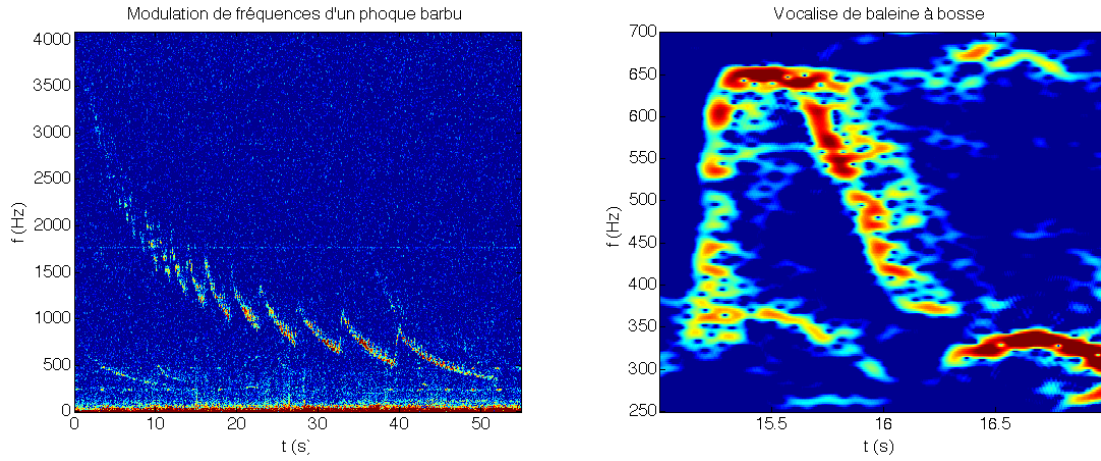


FIGURE 1.15 – A gauche : Sifflement de phoque barbu. La modulation de fréquence dure plusieurs dizaines de secondes et descend de près de 4 kHz à environ 400 Hz (son : un peu comme une scie musicale. Tout ça sans respirer ?). A droite : modulation de fréquence de baleine à bosse enregistrée dans la zone de Cabo San Luca (voir paragraphe 5.2). La modulation de fréquence dure environ 1 s pour 300 Hz de chute fréquentielle (son : chien qui hurle).

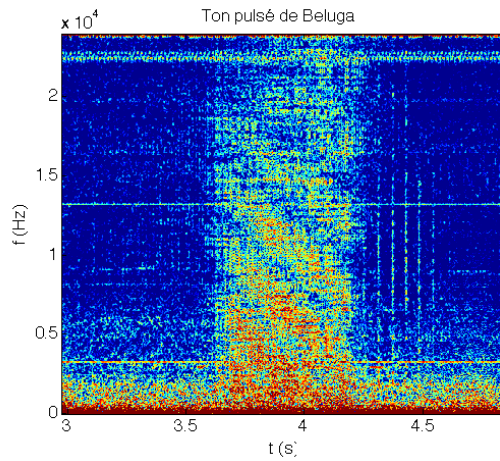


FIGURE 1.16 – Pavé temps-fréquence émis par un Beluga (Pointe Noire, Québec, courtesy of C. Gervaise)

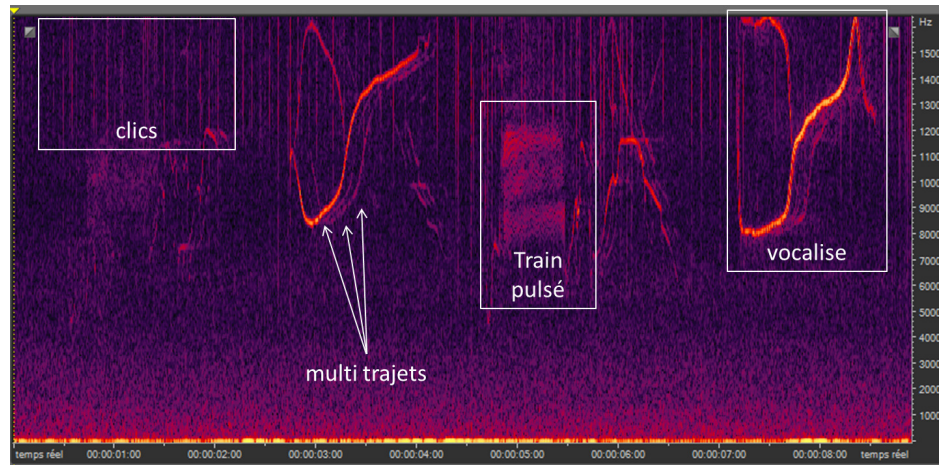


FIGURE 1.17 – Vocalises de dauphins communs issues des données de la campagne ERATO 2009 (section 2.2)

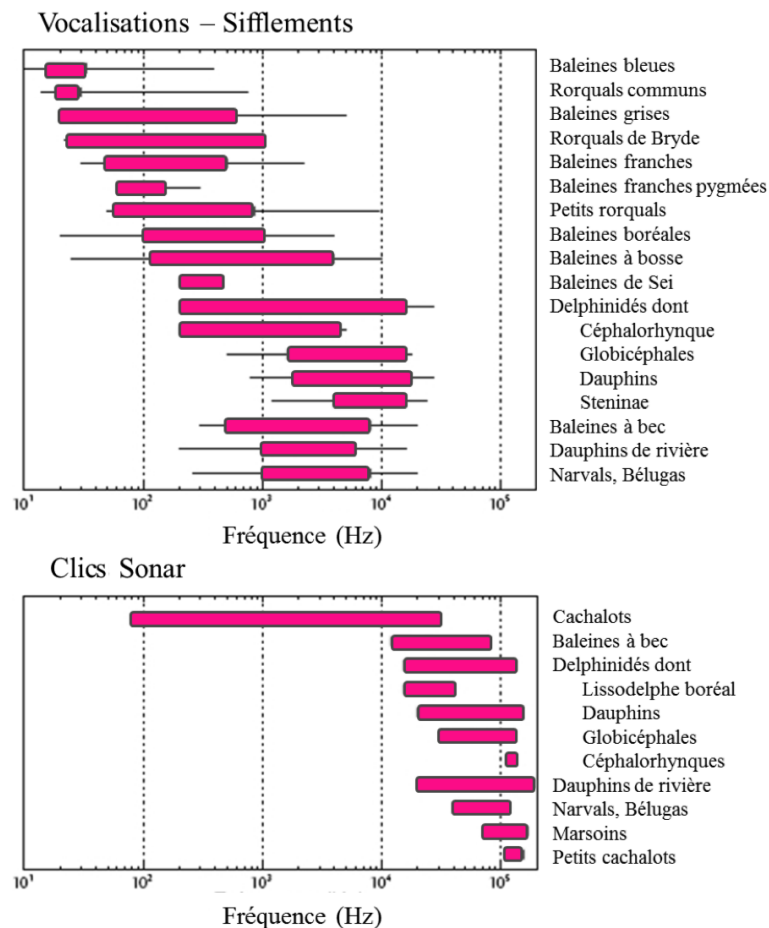


FIGURE 1.18 – Principaux signaux émis par les cétacés et leur support fréquentiel qui détermine la portée (100 Hz : 50 à 100 kilomètres, 50 kHz : 200 mètres). Figure construite à partir de Mellinger *et al.*, 2007

volonté d'exhaustivité. *Nosal and Frazer (2007)* proposent une méthode de suivi de trajectoire 3D et de l'orientation spatiale de cachalots (*Physeter macrocephalus*) à partir des clics enregistrés sur 5 hydrophones; *Roy et al. (2010)* suivent la position de Bélugas (*Delphinapterus leucas*) à partir des clics enregistrés sur un réseau d'hydrophones dans le Saint-Laurent. De la localisation de la source dérivent d'autres analyses comme dans *Simard et al. (2010)* qui estiment la densité de Bélugas présente à partir des vocalises observées. *Le Bot (2014)* a développé des outils pour détecter, localiser et caractériser les sources émettant des transitoires. *Le Bot et al. (2016)* estime, à partir de la localisation en 3D des sources, les niveaux (roms, peak to peak) des sifflements émis par les Bélugas dans le parc du Saguenay-Saint-Laurent. La localisation n'est pas toujours indispensable. Dans ses travaux, *Seeger et al. (2016)* étudie l'environnement acoustique dans lequel les baleines à bosse mexicaine vivent et communiquent. Le modèle développé par l'auteur permet d'estimer la densité relative de baleines dans une zone à partir du niveau de leur chant. En cataloguant les productions sonores sociales de différents groupes de baleines dans sa zone d'étude, *Seeger et al. (2016)* étudie les différences de comportement entre les groupes et également avec des groupes d'autres régions.

Et l'inversion géoacoustique dans tout ça ?

Exploitation en inversion géoacoustique passive - Dans le cadre de l'inversion géoacoustique passive, les signaux biologiques restent peu exploités jusqu'à ce jour. On peut citer néanmoins quelques méthodes d'inversion utilisant les émissions de mammifères marins. L'objectif principal reste, la plupart du temps, la localisation de l'animal; l'inversion des paramètres du fond vient en second plan, pour affiner la localisation. Autre point à souligner, les sources exploitées sont toutes des sources basses fréquences pour lesquelles la théorie des modes peut être appliquée (voir paragraphe 1.2.1.2). Les signaux hautes fréquences n'ont encore jamais été utilisés.

En milieux petits fonds, la propagation des signaux basses fréquences de mammifères marins peut être modélisée par un ensemble de modes normaux. Le champ acoustique est ainsi décrit par une somme de modes normaux; chaque mode se propageant à une certaine vitesse dans le canal, appelée vitesse de groupe. Aux hautes fréquences (> 100 Hz), les vitesses de groupe convergent vers la célérité du son dans l'eau et, aux basses fréquences, vers la vitesse du son dans le sédiment. Dans la propagation modale, les déformations dues au canal dispersif compliquent le retour au signal émis. Par contre, ces déformations sont porteuses de l'information sur le canal de propagation. La dispersion des arrivées modales peut en effet être reliée à la position de l'émetteur ainsi qu'aux conditions de propagation comme la célérité du son dans l'eau et le sédiment, les densités et la hauteur d'eau. Plus la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, plus le signal est déformé en fréquence et étendu dans le temps.

En bref - Les premiers résultats d'inversion géoacoustique passive ont été obtenus sur des modulations de fréquences basses fréquences (*D'Spain et al., 1995; Thode et al., 2000*). Un réseau de capteurs est nécessaire pour localiser la source, comme c'est le cas le plus souvent en localisation de mammifères marins (*Zimmer, 2011,0*). L'inversion sert avant tout à affiner les résultats de localisation des sources, but premier de ces travaux. Avec un unique capteur, ce sont les sources impulsionnelles basses fréquences qui sont d'abord privilégiées (*Bonnel and Chapman, 2011; Bonnel et al., 2011b,0,0,0; Potty et al., 2008*). La raison est que la propagation d'une source impulsionnelle dans un canal fournit directement la réponse impulsionnelle du canal puisqu'on connaît la forme du signal émis, tandis qu'une modulation propagée dans un canal dispersif ne donne pas directement la RI du canal, la loi de fréquence instantanée étant inconnue. Néanmoins, sur les modulations, *Wiggins et al. (2004)* montrent des comparaisons encourageantes entre les courbes de dispersions observées sur des modulations de fréquences de baleines franches de positions connues et les courbes de dispersions simulées pour ces mêmes positions. La connaissance du milieu leur est nécessaire pour extraire le signal émis; ils ne réalisent pas d'inversion géoacoustique. Le fond est donc modélisé à partir des connaissances *a priori* (mesures *in situ*) et une étude de sensibilité réalisée par les auteurs montre que seuls les modes d'ordre supérieur à 4 sont sensibles à des erreurs sur la description du milieu de propagation. *Bonnel et al. (2011a)* montrent quant à eux la faisabilité de réaliser une inversion géoacoustique sur des modulations basses fréquences de signature temps-fréquence inconnue et à partir d'un unique hydrophone. La seule condition à l'application de leur méthode est que la modulation de fréquence soit monotone (contrainte mathématique). La différence avec une source impulsionnelle est que la loi de fréquence instantanée du signal est inconnue. *Bonnel and Thode (2013); Bonnel et al. (2014)* appliquent cette méthode sur des

modulations de baleines à bosse en utilisant la loi de fréquence instantanée²³ du premier mode détecté (le moins impacté par la dispersion) à la place de la vraie loi de modulation (inconnue) de la source. Cependant, l'inversion, là encore, n'est pas l'objectif premier puisque l'objectif est la localisation des individus. Les résultats de l'inversion ne sont pas cohérents d'un signal à l'autre mais permettent néanmoins de corriger la localisation des individus.

Pour aller plus loin - dans quel cadre? comment? quelle place pour l'inversion à partir de signaux de mammifères marins? *D'Spain et al. (1995)* exploitent la dispersion modale de clics atypiques très basses fréquences de rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) pour estimer simultanément la position de la source et la vitesse de compression dans le fond. Pour cela, ils recherchent les paramètres permettant de maximiser la ressemblance entre le spectrogramme des signaux reçus après formation de voies et un spectrogramme simulé. Ils démontrent ainsi la faisabilité de l'inversion géoacoustique à partir de tels signaux et montrent également que les différences observées entre les émissions de différents groupes d'individus peuvent être expliquées par les conditions de propagation dans le milieu.

Partant de ces résultats, *Thode et al. (2000)* proposent une méthode d'inversion géoacoustique de type *Matched Field Processing* à partir de signaux de baleines bleues (*Balaenoptera musculus*) enregistrés sur une antenne verticale. Ils obtiennent une localisation haute résolution en 3D de 4 individus jusqu'à 8 km dans un environnement de propagation complexe, sans connaissance *a priori* de la zone. Leur étude a permis de soulever des questions sur l'utilisation et les mécanismes de production des vocalises. Ils utilisent des modulations de fréquences (signal et harmonique entre 10 Hz et 70 Hz) et des tons pulsés (durée d'environ 15 s, bande [10 Hz-130 Hz]). Ces signaux basses fréquences se propagent loin et subissent de nombreuses interactions avec les interfaces du canal. Huit capteurs suffisent pour la méthode décrite, s'ils offrent une ouverture de 90 m. Dans un premier temps, pour chaque individu, *Thode et al. (2000)* sélectionnent les vocalises présentant un bon rapport signal à bruit et inversent simultanément 18 paramètres décrivant la position de la source, la géométrie du réseau d'hydrophones ainsi que les paramètres du milieu. Ils utilisent pour cela un algorithme génétique (algorithme d'optimisation globale) alimenté par le champ de pression observé entre la source et les récepteurs. Le milieu est décrit comme une couche de sédiment fluide sur un socle semi-infini et requiert donc l'estimation de 9 paramètres. L'algorithme est répété plusieurs fois pour chaque signal en variant la population initiale; seule l'exécution qui fournit la meilleure corrélation est conservée. Une fois les paramètres d'environnement estimés, les auteurs localisent la source à partir de ses autres émissions par *matched-field processing*. La direction de la source est estimée grossièrement à l'aide de l'inclinaison de l'antenne verticale. Concernant l'inversion, les résultats sur la célérité dans le sédiment superficiel sont cohérents avec la connaissance *a priori* de la zone étudiée (carottes). En raison des fréquences utilisées, seule la couche superficielle de sédiment a pu être inversée. Le modèle de fond était considéré comme homogène sur la zone, or ce n'était pas le cas, comme le montrent les résultats. Grâce aux informations d'azimut fournis par un autre équipement, *Thode et al. (2000)* montre l'intérêt d'utiliser une bathymétrie précise pour affiner la localisation des sources. Ils démontrent la faisabilité de la localisation sans connaissance *a priori* (sauf bathymétrie) et de l'inversion géoacoustique passive à partir de vocalises de baleines bleues et d'un nombre restreint de capteurs. Néanmoins, l'inversion n'est pas la priorité de cette étude et c'est avant tout un milieu moyen qui est estimé.

Dans *D'Spain et al. (1995)*; *Thode et al. (2000)*, un réseau d'hydrophones est utilisé pour localiser la source et l'inversion vient en second plan pour améliorer la localisation. Néanmoins, comme pour les autres sources d'opportunité, la communauté va chercher à réduire le nombre de capteurs à déployer. Avec un unique capteur l'analyse temps-fréquence et le filtrage des modes deviennent alors indispensables pour localiser la source et estimer les paramètres de l'environnement (*Bonnel et al., 2010*; *Le Touzé et al., 2009*).

Dans le cadre de la sauvegarde de la baleine franche dans le Pacifique Nord, baleine menacée, *Wiggins et al. (2004)* cherchent à estimer la portée des émissions de ces baleines, captées sur un unique hydrophone. Cette estimation de portée doit permettre de contribuer à l'estimation de la population, actuellement évaluée à 50 individus. Les vocalises exploitées sont des modulations de fréquences de 90 Hz à 160 Hz sur 1 s. Les animaux se trouvent dans un milieu petits fonds (<100 m) de bathymétrie uniforme. La géométrie du canal peut permettre une détection de ces signaux jusqu'à

23. Signature temps-fréquence d'une vocalise

50 km, cette distance variant en fonction du niveau émis et des conditions de propagation dans le canal. Sans aller jusqu'à la localisation à l'aveugle de la position des baleines franches détectées, [Wiggins et al. \(2004\)](#) montrent la relation entre la déformation du signal reçu et la position de l'émetteur. Ils superposent les courbes de dispersion simulées avec les courbes de dispersion observées pour les individus dont la position a été estimée par d'autres méthodes (multi-capteurs). Pour cela, ils développent tout d'abord un modèle de propagation acoustique pour la zone étudiée (rive Est de la mer de Bérिंग) à partir de la connaissance *a priori* de la zone. Dans ce canal ainsi modélisé, la propagation est également simulée en appliquant les courbes de dispersion à un signal synthétique. Le fond est modélisé comme un canal de Pékérís à partir de la connaissance *a priori* (mesures) de la zone et les paramètres du fond ne sont pas inversés dans ces travaux. Une étude de sensibilité des vitesses de groupe en fonction de chaque paramètre environnemental a été réalisée et montre que les quatre premiers modes sont peu sensibles aux erreurs de modélisation du fond. Néanmoins, les modes d'ordres supérieurs à 4 sont plus sensibles aux paramètres environnementaux et les valeurs de ces paramètres ont donc dû être affinées pour ajuster au mieux les données observées avec les données modélisées pour ces ordres. [Wiggins et al. \(2004\)](#) montrent ainsi que l'inversion géoacoustique du fond pourrait être envisagée avec un unique hydrophone et l'exploitation des courbes de dispersion de vocalises basses fréquences, notamment à l'aide des modes d'ordres supérieurs à 4.

Toujours hors cadre de l'inversion géoacoustique pure, [Bonnel et al. \(2014\)](#) estiment la distance d'émissions de baleines boréales (*Balaena mysticetus*) captées sur un unique hydrophone en milieux petits fonds (< 150 m). Ils réalisent l'inversion des paramètres de l'environnement, de la position de la source ainsi que de la loi de fréquence instantanée de la source à partir de modulation basses fréquences enregistrées sur un unique capteur. Contrairement à [Wiggins et al. \(2004\)](#) et [D'Spain et al. \(1995\)](#), [Bonnel et al. \(2014\)](#) se placent à des distances plus courtes, pour lesquelles la séparation des modes n'est pas garantie. Ils appliquent des opérateurs de déformation temporelle (*warping*²⁴) pour séparer les modes. Du fait de la dispersion dans le canal, les courbes de dispersion observées sur le signal reçu n'ont pas la même forme que la modulation émise qui reste inconnue. Pour s'affranchir dans un premier temps de cette inconnue, ils utilisent le premier mode (le moins impacté par la dispersion) comme loi de déformation et pour estimer la RI du canal (déconvolution de la source). Une fois les modes filtrés et isolés, la distance de la source peut être estimée. L'inversion géoacoustique est réalisée pour affiner la localisation. La méthode nécessite la connaissance *a priori* de la hauteur d'eau et du profil de célérité dans l'eau et le choix d'un modèle de fond. Les auteurs ont choisi un modèle simple (canal de Pékérís, invariant en distance) qui simplifie la prise en compte de l'environnement mais ne permet pas de rendre compte de l'hétérogénéité du milieu (e.g. bathymétrie). Pour palier les limites du modèle de fond simple utilisé, les paramètres du canal (ou plutôt du milieu acoustique équivalent) sont estimés pour chaque signal. Ce modèle est trop simple pour obtenir un résultat d'inversion cohérent mais permet néanmoins de corriger la localisation de la source. Les mêmes données ont été traitées par [Abadi et al. \(2014\)](#) selon la méthode décrite dans [Thode et al. \(2000\)](#). Le modèle de fond choisi est également un canal de Pékérís et confirment les observations de [Bonnel et al. \(2014\)](#) sur les limites de l'inversion à partir du modèle simple de Pékérís.

Discussion - On constate que les émissions basses fréquences, principalement impulsionnelles, de mammifères marins peuvent être utilisées en inversion géoacoustique passive. Néanmoins, plus qu'un objectif en soit, l'inversion est réalisée dans les méthodes citées ci-dessus avant tout pour améliorer la localisation des sources dans le cadre du monitoring par acoustique passive (PAM). Un milieu équivalent (voir [Bonnel et al., 2014](#)) est donc suffisant même s'il diffère d'une vocalise à l'autre.

Les émissions de mammifères marins présentent pourtant des avantages. Elles reflètent bien les différents types de signaux qui peuvent être exploités en inversion. Nous avons choisi les modulations de fréquences (vocalises ou sifflements). [Bonnel et al. \(2011a\)](#); [Nicolas et al. \(2003\)](#) se sont intéressés aux signaux impulsionnels et d'autres exploitent les signaux large bande comme le bruit ambiant (cf. 1.3.3.1) ou les raies spectrales rayonnées par un navire (cf. 1.3.3.2).

Les mammifères marins sont répartis dans le monde entier (voir l'exemple du Grand Dauphin figure 1.19). Le choix de l'espèce dépend surtout de la zone d'intérêt (on aura du mal à estimer les paramètres du fond du Golfe du Lion à l'aide de vocalises de Béluga). Toutefois, comme nous avons pu le voir, une modulation de baleine franche ou de baleine boréale peuvent être traitées de la même manière si les

24. Les outils de *warping* seront discutés dans le chapitre 5

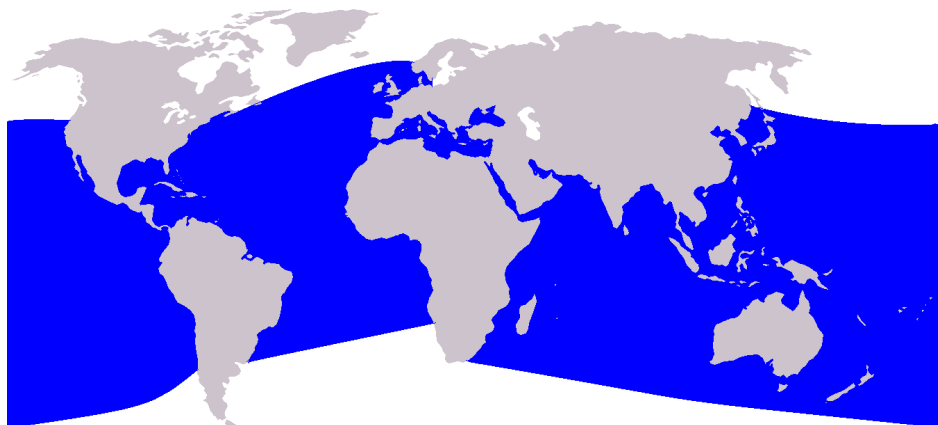


FIGURE 1.19 – Répartition mondiale du grand dauphin *Tursiops Truncatus* source : CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1641308>

conditions requises par la méthode d'inversion sont remplies. Comme pour les autres sources, le choix de la théorie (modes ou rayons) sera imposé par l'environnement et la bande de fréquences de travail. Le matériel mis en œuvre n'est pas plus lourd que pour les autres sources d'opportunité. Certaines méthodes de localisation de source ne nécessitent qu'un capteur (voir [Bonnel et al., 2014](#); [Gervaise et al., 2011](#); [Thode et al., 2006](#)) et intègrent déjà une étape d'inversion.

Alors pourquoi les signaux de mammifères marins sont-ils moins exploités en inversion géoacoustique ? On peut déjà observer que deux communautés différentes se rencontrent sur cette thématique : la communauté de l'inversion géoacoustique et la communauté des acousticiens. Les signaux sont bien plus souvent exploités pour les informations biologiques qu'ils contiennent.

Pour l'inversion, ce type de source peut présenter des inconvénients comme la répartition et la disponibilité géographique et temporelle des sources, la directivité de ces sources²⁵ ou encore la cacophonie des enregistrements rendant difficile l'exploitation des signaux individuels (voir par exemple les travaux de désentrelacement des clics de Bélugas dans [Le Bot et al., 2013](#)). Contrairement à un navire de surface, ces sources sont mobiles en distance et en profondeur. Contrairement au bruit ambiant qui est omniprésent, il faut compter non seulement sur la présence de mammifères marins dans la zone d'intérêt mais aussi sur leur production sonore. Certains mammifères marins, comme le petit rorqual, ne sont pas de gros communicants par exemple.

1.4 Objectifs scientifiques

Les méthodes d'inversion géoacoustique passive sont des alternatives respectueuses de l'environnement et discrètes visant à inférer les propriétés du milieu marin influençant la propagation acoustique, à partir de sources d'opportunité, c'est-à-dire des sources naturellement (ou déjà) présentes dans le milieu. Ces méthodes réduisent les moyens à déployer et donc les coûts afférents. Elles limitent l'énergie nécessaire puisque seules des récepteurs sont mis en œuvre (pas de source). Cette économie énergétique autorise des écoutes sur de longues périodes dans des zones qui ne seraient pas toujours accessibles. Sans émission ni loud moyen, elles se prêtent donc très bien à l'évaluation rapide et discrète de l'environnement (REA 3). Cependant, le contexte passif réduit à zéro ou presque le niveau de connaissance de la source et du signal émis. On ne peut accéder qu'aux informations relatives au signal reçu. Ainsi, contrairement à l'actif, la position de la source, son déplacement, la forme d'onde et le niveau émis sont inconnus. Les méthodes d'inversion passive sont donc basées uniquement sur le signal reçu. L'ob-

25. Ce sujet sera discuté dans le chapitre 1

jectif ultime en inversion géoacoustique passive est de s'approcher des performances atteintes par les méthodes actives tout en limitant le matériel nécessaire pour respecter les contraintes de coût et de discrétion. Le bruit ambiant et le bruit de bateau sont des sources d'opportunité omniprésentes et déjà utilisées dans le cadre de l'inversion géoacoustique passive. La richesse des signaux offerts par les mammifères marins est quant à elle encore peu exploitée. Ils proposent pourtant une grande diversité de signaux (type, forme, fréquences, durée). Ils sont présents dans le monde entier et sont, à quelques exceptions près (petit rorqual par exemple), de bons communicants. Nous avons choisi d'exploiter cette source d'opportunité et en particulier un type de signal encore non exploité, la modulation hautes fréquences de mammifères marins sur laquelle aucuns travaux n'ont été menés jusqu'à ce jour.

L'objectif des travaux menés dans le cadre de cette thèse est donc de démontrer la faisabilité et les limites de l'inversion géoacoustique passive à partir de modulations de fréquences de mammifères marins reçues sur un unique hydrophone.

Après cette introduction, nous verrons tout d'abord dans le chapitre 2, Inversion géoacoustique passive à partir d'émissions hautes fréquences de mammifères marins, la méthode générale proposée et la matière première sur laquelle ont été basées les premières réflexions : les vocalises de dauphins. Ce chapitre présente les grands principes de la méthode développée durant la thèse ainsi que les outils mis en œuvre et positionne la méthode dans l'état de l'art des méthodes d'inversion géoacoustique passive. Il introduit les signaux candidats pour notre schéma d'inversion - des modulations de fréquences hautes fréquences de mammifères marins présentant des multitrajets résolus. Un seul hydrophone est utilisé pour respecter les contraintes de déploiement et de discrétion. La piste du signal est extraite puis utilisée pour estimer la réponse impulsionnelle (RI) du canal. La RI permet d'extraire les temps d'arrivée des trajets avec lesquels la source peut être localisée. Après correction des pertes de transmission, le rapport entre les réfléchis fond - portant une information sur la nature du fond - et le trajet direct - référence non impactée par le fond - donne une estimation du coefficient de réflexion sur le fond en fonction de l'angle de rasance du trajet. Une collection de signaux permet d'obtenir une courbe du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance. Cette courbe sert d'observable pour la phase d'inversion géoacoustique. Les paramètres optimaux du modèle de fond choisi sont estimés durant cette dernière étape. La difficulté des sources que l'on souhaite utiliser est leur directivité. Cette directivité est illustrée sur un jeu de données de dauphins communs qui a été analysé pour mieux comprendre la source et les signaux. Dans ce chapitre, un point sur la directivité en général est effectué pour se concentrer sur le cas du dauphin. Les diagrammes de directivité des sources telles que le dauphin, sont encore peu (voire pas du tout) décrites dans la littérature. Sans être en mesure de présenter des résultats sur données réelles, les méthodes envisagées pour contourner cette difficulté dans le schéma d'inversion sont néanmoins proposées dans ce chapitre.

Laissant dans un premier temps de côté les difficultés liées à la directivité de ces sources, nous présentons en détail dans le chapitre 3, Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - propagation multitrajet résolue, la mise en œuvre de la méthode d'inversion et les outils déclinés pour traiter des modulations hautes fréquences émises par une source omnidirectionnelle et présentant des multitrajets résolus dans la représentation temps-fréquence du signal. Des traitements simples basés sur le spectrogramme²⁶ (la signature du signal est sélectionnée manuellement sur le spectrogramme puis est utilisée pour estimer la RI du canal) permettent d'extraire les observables nécessaires à la méthode d'inversion : 1) les temps d'arrivée des trajets, 2) les niveaux d'arrivée des trajets. Le milieu est considéré isocélère avec une bathymétrie plate ce qui permet de déduire facilement les longueurs des trajets et de relier ensuite géométriquement les longueurs des trajets d'arrivée à la position de la source. Après correction des pertes de transmissions, le rapport entre les niveaux réfléchis fond et le niveau du trajet direct donne une estimation du coefficient de réflexion local pour le signal étudié. L'application à une collection de signaux permet d'obtenir une courbe du coefficient de réflexion estimé sur une zone d'intérêt dans une pastille de quelques centaines de mètres, portée contrainte par les outils mis en œuvre. Les performances de la méthode sont évaluées théoriquement et confortées par les résultats sur données simulées en environnement simulé. La méthode est également appliquée avec succès sur des émissions contrôlées dans le Golfe du Lion. Dotée de ces outils dits basse résolution, cette déclinaison de la méthode sera nommée IGA-VMM-BR (pour Inversion GéoAcoustique à partir de Vocalises de Mammifères Marins Basse Résolution).

Pour étendre la portée de la méthode présentée dans le chapitre 3, et sous les mêmes hypothèses

26. module au carré de la transformée de Fourier à court terme

de milieu isocélère sur fond plat, nous ajoutons un étage de séparation haute résolution des trajets basés sur des opérateurs de déformation temporelle. Ces outils sont présentés dans le chapitre 4, Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - séparation haute résolution des multitrajets qui concerne les cas d'application plus complexes dans lesquels la propagation multitrajets n'est pas résolue par les outils de traitement simples décrits dans le chapitre 3. Cette situation est observée notamment au-delà de la portée de la méthode IGA-VMM-BR et dans certaines configurations source/hydrophone. Un étage de séparation haute résolution des trajets est alors requis pour disposer d'une réponse impulsionnelle exploitable, c'est-à-dire permettant l'identification des trajets individuels (temps d'arrivée et niveaux). Des outils basés sur la déformation temporelle du signal ont été développés et appliqués en amont de l'estimation de la RI, permettant une haute résolution des multitrajets. La loi de fréquence instantanée du signal sert de loi de déformation, permettant ainsi de transformer chaque trajet d'arrivée en fréquence pure. Grâce aux propriétés des outils de déformation utilisés, une fois les observables extraits du signal déformé, le reste de la méthode reste inchangé à celle du chapitre 3 et il n'est pas nécessaire de revenir dans l'espace non déformé. Les performances de cette méthode, nommée IGA-VMM-HR (Inversion GéoAcoustique à partir de Vocalises de Mammifères Marins Haute Résolution), sont décrites et comparées à la méthode BR. La séparation haute résolution des trajets permet d'étendre la portée de la méthode IGA-VMM-BR. L'impact de la méthode sur l'augmentation de la portée des sources exploitables est illustrée sur le même jeu d'émissions contrôlées dans le Golfe du Lion que pour la méthode IGA-VMM-BR.

Enfin, dans le chapitre 5, Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - réponse impulsionnelle très basse résolution, nous descendons en fréquences pour profiter du caractère moins directif des vocalises basses fréquences de baleines à bosse. L'idée est en effet de s'affranchir de la directivité de signaux hautes fréquences et de s'approcher des signaux candidats identifiés dans le chapitre 1 avec des sources moins directives - les baleines à bosse. Cependant, le cas étudié est complexe car les signaux que l'on souhaite exploiter présentent des trajets non résolus au sens des deux méthodes présentées précédemment (IGA-VMM-BR et IGA-VMM-HR). Le jeu de données visé contient des vocalises de baleine à bosse enregistrées dans la zone de CABO San Luca (Mexique). L'unique hydrophone est positionné très près du fond si bien que même pour une source proche, les trajets ne sont pas individuellement séparables (le premier réfléchi surface et le direct sont très proches). A cela s'ajoute une bathymétrie irrégulière dans la zone de Cabo, bien différente du plateau du Golfe du Lion. La méthode doit donc être revue à plusieurs niveaux : 1) la localisation de la source, 2) l'estimation du coefficient de réflexion. La piste du signal est toujours exploitée pour estimer la réponse impulsionnelle du canal, point de départ de notre méthodologie générale pour obtenir les observables nécessaires : 1) les temps d'arrivée des trajets et 2) leur niveau. Pour disposer de la meilleure résolution possible de cette RI, l'étage de séparation haute résolution basé sur la déformation temporelle du signal est appliqué avant l'estimation de la RI. Néanmoins, au lieu de trajets individuels clairement identifiés et localisés relativement dans le temps grâce à la RI, on n'obtient que des groupes de trajets, donc des temps d'arrivée de groupes de trajets et non des temps d'arrivée de trajets. Sans connaître la position de la source, il n'est pas possible d'identifier les trajets composant chaque groupe. Nous proposons un procédé de localisation basé sur la comparaison de cette RI très basse résolution avec des répliques de RI (haute résolution) correspondant à des sources réparties tout autour de l'hydrophone (matched impulse response). Nous simulons, à l'aide de l'outil de simulation de propagation acoustique BELLHOP[®], la propagation dans l'environnement bathymétrique de la zone CABO avec un profil de célérité statistique. Grâce à l'apport d'information par la bathymétrie accidentée de la zone, les sources peuvent être positionnées dans les 3 dimensions $[r, z, \phi]$ avec r la distance, z la profondeur et ϕ la direction de la source. La méthode est évaluée sur données synthétiques dans l'environnement de simulation des données réelles puis appliquée aux données réelles.

Pour finir, le chapitre 6, Conclusion et perspectives, présente la synthèse des travaux et les perspectives envisagées.

Inversion géoacoustique passive à partir d'émissions hautes fréquences de mammifères marins

Sommaire

2.1	Introduction de la méthode d'inversion géoacoustique passive développée et positionnement des travaux	38
2.1.1	Hypothèses de travail	38
2.1.2	Description du schéma d'inversion - positionnement - outils mis en œuvre	39
2.2	Vocalises hautes fréquences de mammifères marins : première application de la méthode d'inversion et identification de la problématique de directivité	48
2.2.1	Matériel et méthodes	48
2.2.2	Exploitation préliminaire : localisation des sources et analyse des signaux	48
2.3	La directivité des sources : étude et prise en compte dans le schéma d'inversion géoacoustique passive développé	53
2.3.1	Mesurer et observer les diagrammes de directivité sur terre et sous l'eau .	53
2.3.2	Prise en compte de la directivité dans notre schéma d'inversion	56
2.3.3	Directivité inconnue... comment estimer le diagramme de directivité ? . .	58
2.4	Discussion	68

Ce chapitre présente les grands principes de la méthode d'inversion développée dans ce travail. Il est composé de 3 sections. Les hypothèses de travail, les grands principes, les outils de traitement mis en œuvre ainsi que le positionnement des travaux dans l'état de l'art sont présentés en section 2.1. On introduit dans un second temps les signaux hautes fréquences initialement pressentis pour l'inversion (section 2.2). La méthode d'inversion, nommée IGA-VMM-BR avec les outils déclinés dans ce chapitre, est alors appliquée à 100 vocalises de dauphins. La problématique de la directivité de ces sources est enfin illustrée grâce à l'analyse de ces vocalises et sa prise en compte dans le schéma d'inversion est décrite dans la section 2.3.

2.1 Introduction de la méthode d'inversion géoacoustique passive développée et positionnement des travaux

2.1.1 Hypothèses de travail

Tout part du fait que l'on a choisi d'exploiter des modulations hautes fréquences de mammifères marins dans le cadre d'un schéma d'inversion géoacoustique passive. Pour ce type de sources, nous disposons d'un jeu de données enregistrées sur un unique hydrophone en milieu petits fonds. Ces données (sifflements de dauphins) sont présentées en détail dans le paragraphe 2.2. Les hypothèses de travail présentées ici ont donc été en partie posées à partir de la configuration de ces enregistrements.

Conformément au jeu de données (sifflements de dauphins), nous nous plaçons donc en milieu petits fonds (< 200 m) et nous supposons que le signal est une modulation de fréquence. La propagation acoustique, aux fréquences considérées, se fait dans le cadre de l'approximation aux hautes fréquences avec la théorie des rayons.

Pour compenser l'absence de diversité spatiale due à l'exploitation d'un unique capteur, notre méthode est basée sur la propagation multitrajets. Nous supposons que les conditions de propagation fournissent au moins trois trajets mesurables à la réception. Seuls les signaux présentant cette propagation multitrajets seront dits candidats à notre méthode d'inversion géoacoustique passive. Le caractère "mesurable" des multitrajets dépend des outils mis en œuvre qui doivent permettre de séparer les trois premiers trajets. Pourquoi trois trajets? L'analyse du jeu de données ERATO 2009 (voir section 2.2) donne en général uniquement trois trajets, nous avons donc choisi de nous limiter à ce cas, représentatif des données que l'on souhaite exploiter. Trois trajets impliquent deux différences de temps d'arrivée ce qui ne permet pas de lever l'ambiguïté entre le premier réfléchi : le 2^{ème} arrivé correspond-il au premier réfléchi surface ou au premier réfléchi fond? La position de la source reste donc incertaine sans l'exploitation d'un quatrième trajet pour discriminer les deux hypothèses mais, néanmoins, à des distances de l'ordre de quelques hauteurs d'eau, l'erreur de localisation en distance est faible (voir §2.2).

Nous considérons un fond plat ce qui est le cas des zones d'étude des données ERATO 2009 et ERATO 2011. Le canal est supposé isocélère ; la célérité est supposée constante en distance et en profondeur à l'échelle des distances considérées. Cette hypothèse est relativement forte car elle revient à négliger la courbure des rayons. Cependant, elle permet de traiter les trajets comme rectilignes (cf. §1.2.1.2). Ces deux dernières hypothèses (célérité constante et rayons rectilignes) nous permettent de disposer de relations analytiques entre les temps d'arrivée et les caractéristiques des trajets (longueurs, angles, etc.).

Nous négligeons les effets de la surface de l'eau sur la propagation et considérons que le signal subit une simple inversion de phase à l'interface eau/air. Cette hypothèse n'est pas abusive étant donnée la longueur d'onde des signaux traités.

Nous compensons de manière uniforme la vitesse de déplacement des sources. Discutons un peu cette hypothèse. *Josso et al.* (2009); *Josso* (2010) décrivent des méthodes d'inversion géoacoustique avec correction de la réponse impulsionnelle de l'effet Doppler dû aux mouvements relatifs de la source par rapport au récepteur. En effet, lorsque la source est en mouvement, chaque trajet (émis dans une direction différente des autres) présente une vitesse apparente potentiellement différente. En contexte actif, *Josso* (2010) montre que l'estimation de la réponse impulsionnelle du canal par filtrage adapté (méthode classique - voir *Taroudakis and Makrakis*, 2001) est fautive lorsque la source est en mouvement. Ce filtrage par le signal émis ne prend en effet pas en compte la déformation subie par les trajets en raison de l'effet Doppler dû au mouvement relatif source/récepteur. *Josso* (2010) présente donc une première méthode de compensation uniforme du mouvement, valide à grande distance, et qui consiste à considérer que les trajets ont la même vitesse apparente, qui est approchée par la vitesse relative de la source. Cette méthode équivaut à réaliser un filtrage adapté avec une copie déformée du signal émis. Cette méthode n'est cependant pas valide lorsque les vrais facteurs d'échelle des trajets sont trop éloignés du facteur d'échelle du premier trajet (quand la hauteur d'eau n'est plus négligeable devant la distance source/récepteur). *Josso* (2010) propose donc une autre méthode dite de compensation adaptative du mouvement, qui prend en compte un facteur de compression différent pour chaque

trajet. Elle consiste à estimer les maxima du plan d'ambiguïté retards (τ) - coefficient de compression Doppler (η) (i.e. vitesse apparente) à partir du signal émis et d'un dictionnaire de signaux retardés et déformés. Les maxima du plan d'ambiguïté correspondent aux couples retards/facteur d'échelle de chaque trajet. La courbe $\eta(\tau)$ correspond à la réponse impulsionnelle après compensation adaptative du mouvement et présente de bien meilleurs résultats autant en simulation que sur données réelles. Dans le cas passif par contre, le signal émis étant inconnu, [Josso \(2010\)](#) utilise le premier trajet reçu (au lieu du signal émis) pour réaliser le plan d'ambiguïté. La RI est, comme en actif, la courbe $\eta(\tau)$ passant par les maxima du plan d'ambiguïté. La seule différence avec l'actif est que le temps d'émission (et donc le début de la RI) est inconnu car les temps et facteurs d'échelle sont estimés en relatif au premier trajet. La comparaison de la compensation uniforme avec la compensation adaptative sur le cas passif indique que l'estimation des temps d'arrivée est bonne dans les deux cas bien que meilleure pour la méthode adaptative. Par contre, l'estimation des amplitudes des trajets est mauvaise en compensation uniforme. Le facteur de compression modélisant l'effet Doppler large bande ([Josso, 2010](#)) est :

$$\eta_i = \frac{1}{1 - \frac{\|\vec{v}\| \cos(\theta_i)}{c}} \quad (2.1)$$

avec c la célérité du son dans l'eau, $\vec{v}$ la vitesse de déplacement de la source et θ_i l'angle d'émission du trajet. Ce facteur implique une modification de la pente (par compression/dilatation) propre à chaque trajet ainsi qu'une modification de l'amplitude du trajet par conservation de l'énergie. Dans notre méthode, l'effet Doppler sera pris en compte sous la forme d'une compensation uniforme (même vitesse apparente pour tous les trajets) par le fait même du contexte passif qui nous contraint à utiliser le premier trajet comme référence du signal. La différence de vitesse apparente entre les trajets modifie la pente des trajets par rapport à la pente du premier trajet (pris pour référence). Cela pourra avoir des impacts sur notre méthode lorsque les vitesses apparentes des trajets seront très différentes. Dans la suite des travaux nous considérons les vitesses des sources suffisamment petites pour que la différence de facteur d'échelle entre les trajets soit négligeable au regard de ce que l'on cherche à mesurer.

Enfin, un seul capteur est utilisé afin de respecter les contraintes de coûts et de discrétion.

2.1.2 Description du schéma d'inversion - positionnement - outils mis en œuvre

La méthode proposée dans ce chapitre consiste à réaliser une inversion géoacoustique passive à partir de **modulations de fréquence de mammifères marins** et d'un unique hydrophone **en milieu petits fonds** (inférieurs à 200 m). Ce procédé **utilise un unique capteur** pour être au plus proche des objectifs opérationnels de discrétion et de réduction des matériels à déployer. Il **exploite donc la propagation multitrajets et la signature temps-fréquence des signaux émis par des mammifères marins et enregistrés sur un unique hydrophone**. Pour chaque signal sélectionné, la **réponse impulsionnelle** est estimée et utilisée pour obtenir un coefficient de réflexion local. Le traitement d'une succession de signaux fournit **une courbe du coefficient de réflexion eau-sédiment en fonction des angles de rasance**. Cette courbe sert d'observable pour l'**inversion**. L'étape d'inversion proprement dite consiste à estimer les paramètres d'environnement qui maximisent la similarité entre le coefficient de réflexion modélisé et le coefficient de réflexion observé. La figure 2.1 présente le synoptique de la méthode d'inversion géoacoustique passive sur un unique hydrophone ; chaque étape est présentée en détail dans la suite de ce chapitre :

1. Etape 1 : **Traitement des signaux candidats** (détaillée dans le paragraphe 2.1.2.1). Elle comprend une phase de détection et de traitement individuel de chaque signal. Le traitement individuel d'un signal consiste à exploiter sa représentation temps-fréquence pour en extraire la signature temps-fréquence du signal, signature qui est ensuite utilisée pour estimer la réponse impulsionnelle du canal. La réponse impulsionnelle donne accès aux temps et amplitudes d'arrivée des échos qui permettent la localisation de la source, la correction des pertes de transmission et l'estimation du coefficient de réflexion local pour le signal individuel traité. Chaque signal traité fournit un coefficient de réflexion local estimé à partir du rapport d'amplitude du trajet fond sur le trajet direct.
2. Etape 2 : **Traitement d'une collection de N signaux** (détaillée dans le paragraphe 2.1.2.2). Cette phase consiste à répéter l'étape 1 sur N signaux. Cette étape permet d'obtenir l'observable

pour l'algorithme d'inversion géoacoustique passive de l'étape 3 : la courbe du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance.

3. Etape 3 : **Inversion géoacoustique** (détaillée dans le paragraphe 2.1.2.3). Elle est alimentée par la courbe du coefficient de réflexion obtenue lors de l'étape 2 et permet d'estimer les paramètres optimaux du modèle de fond postulé. Le modèle de fond doit être choisi *a priori*. Il est décrit par un ensemble de paramètres qui seront inversés lors de l'étape 3 (e.g. pour un canal de Pékérís, les paramètres du modèle sont la vitesse de compression, la densité et l'atténuation dans le sédiment, la célérité dans la colonne d'eau).

Sous les hypothèses présentées dans le paragraphe 2.1.1, nous allons maintenant présenter pas à pas ces étapes 1 à 3, les outils mis en œuvre et le positionnement de notre méthode dans l'état de l'art de l'inversion géoacoustique.

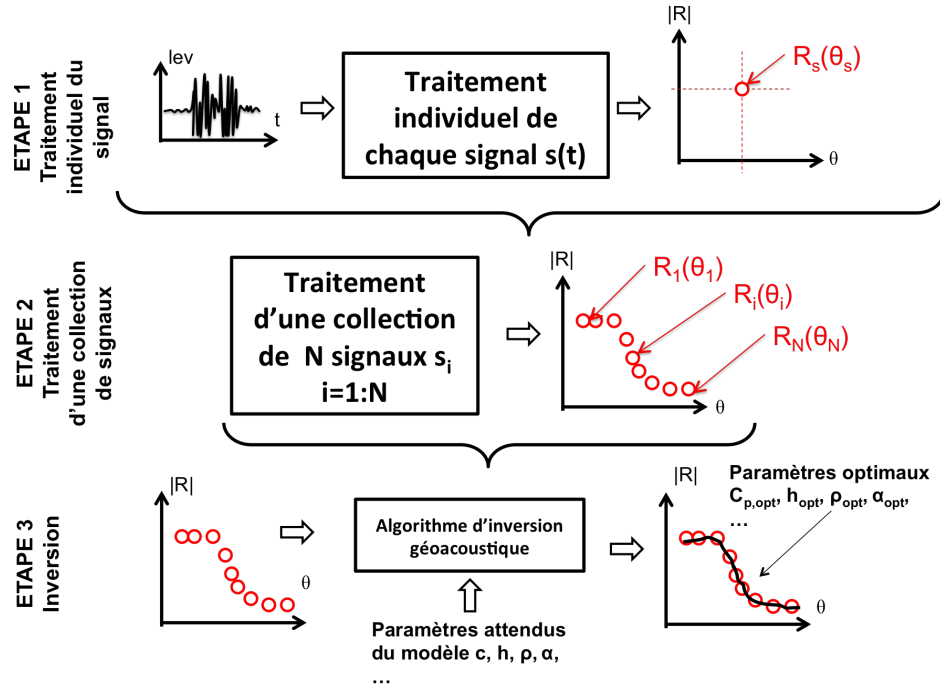


FIGURE 2.1 – Principe général de la méthode d'inversion géoacoustique passive à partir d'un unique hydrophone et de vocalises de mammifères marins. L'étape 1 de traitement individuel d'un signal fournit pour chaque signal traité un couple $(\theta, R(\theta))$. Cette étape est appliquée à N signaux (étape 2) pour estimer une courbe du coefficient de réflexion qui est l'observable attendu par l'algorithme d'inversion (étape 3).

2.1.2.1 Mise en œuvre et positionnement de l'étape 1 : traitement individuel d'un signal enregistré sur un unique capteur

Nous détaillons dans ce paragraphe les traitements appliqués à un signal traité, les outils utilisés ainsi que leur positionnement dans l'état de l'art.

1 - Représentation Temps-Fréquence (RTF) - La condition de départ est la captation sur un unique récepteur de la propagation en multitrajets de modulations hautes fréquences en milieu petits fonds, sous les hypothèses présentées dans le paragraphe 2.1.1. En première approximation, la propagation se fait le long de lignes droites avec des réflexions à la surface et sur le fond (cf. figure

3.1). Le modèle de mesure reçue au niveau de l'hydrophone est donc une somme d'échos retardés et atténués en fonction des réflexions sur les interfaces et des longueurs des trajets :

$$m(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot e(t - L_i/c) + b(t) \quad (2.2)$$

avec A_i l'amplitude du trajet i , L_i sa longueur, c la vitesse du son dans l'eau et $b(t)$ le bruit.

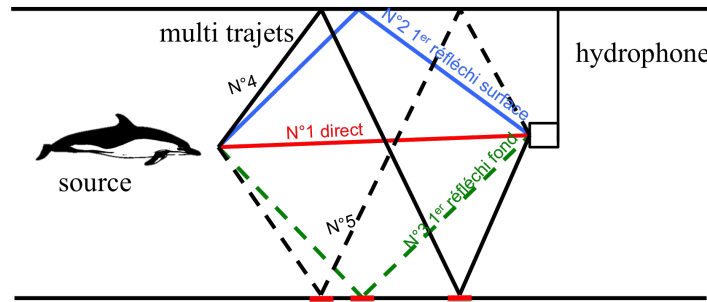


FIGURE 2.2 – En première approximation, la propagation se fait le long de lignes droites avec des réflexions à la surface et sur le fond

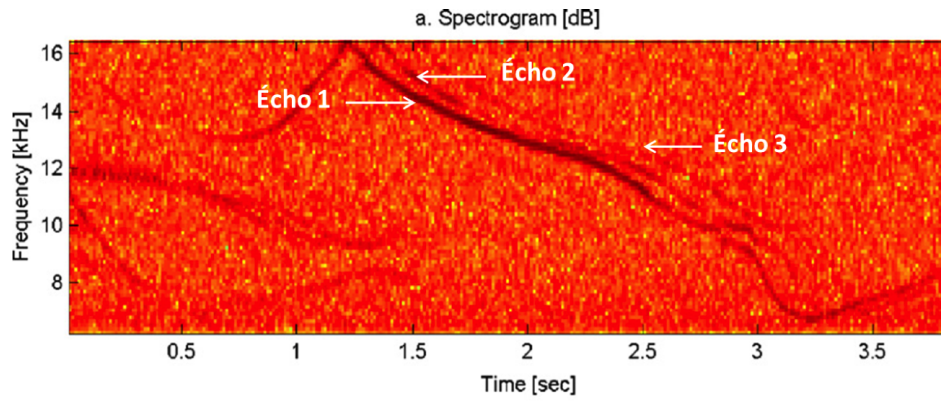


FIGURE 2.3 – Vocalise de dauphin commun issue du jeu de données candidates (ERATO 2009 §2.2). Les 3 premiers trajets d'arrivée sont observables et indiqués par Echo 1, Echo 2 et Echo 3.

A partir de la mesure (équation 2.2), nous construisons sa représentation temps-fréquence qui illustre l'existence de ces trajets. La figure 2.3 présente les 3 premiers trajets (notés respectivement Echo 1, 2 et 3 sur la figure) observés sur une vocalise du jeu de données candidates (ERATO 2009 §2.2).

2 - Exploiter la signature du premier trajet détecté comme référence pour le signal

- En contexte actif, une méthode répandue pour estimer la réponse impulsionnelle est le filtrage adapté qui consiste à corrélér le signal émis avec le signal propagé. La difficulté en contexte passif est que le signal émis n'est pas connu. Une méthode proposée par [Gervaise et al. \(2007\)](#); [Josso et al. \(2009\)](#); [Martins et al. \(2002\)](#) est l'exploitation du premier trajet reçu qui, certes, n'est pas le signal émis car il porte les distorsions dues au canal, mais qui donne un *a priori* sur le signal d'origine. [Martins et al. \(2002\)](#) présentent un algorithme permettant d'estimer simultanément, en contexte passif et à partir d'un unique hydrophone, le signal émis et la réponse impulsionnelle du canal, qui porte l'information sur ses propriétés physiques, pourvu que le signal soit une modulation linéaire de fréquences. La loi

de fréquence instantanée de la source est estimée à partir de la signature du premier trajet selon une ligne $[t, f_i(t)]$ dans la représentation temps-fréquence du signal reçu. Cette loi est ensuite utilisée pour estimer la réponse impulsionnelle du canal.

Gervaise et al. (2007) démontrent la faisabilité d'obtenir la réponse impulsionnelle du canal à partir de la propagation en multitrajets de modulations de fréquence de mammifères marins (Béluga). Ils approchent la modulation de fréquence par une somme de modulations linéaires de fréquences (eq. 2.3) et appliquent l'algorithme MUSIC (*Schmidt, 1986*) pour extraire les retards et la signature temps-fréquence du signal propagé $m(t)$ (pour une littérature complète des algorithmes de localisation, on peut se référer aux travaux de *Marcos et al.* (1998)).

$$\begin{aligned} m(t) &= \sum_{l=1}^N a(l)e(t - \tau_l) \\ m(t) &\approx \sum_{l=1}^N a(l) \exp(2\pi j(f_i(t_0)(t - \tau_l) + \alpha(t_0)(t - \tau_l)^2)) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$f_i(t)$ est la fréquence instantanée du signal, τ_l le retard. La RI du canal est estimée par corrélation temps-fréquence avec la signature estimée. La comparaison de la RI obtenue ainsi avec la RI obtenue en actif (filtrage adaptatif) prouvent les capacités des méthodes passives. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse sont la poursuite de la démonstration de faisabilité amorcée par *Gervaise et al.* (2007).

Josso et al. (2009); *Josso* (2010) décrivent des méthodes d'inversion géoacoustique avec correction de la réponse impulsionnelle de l'effet Doppler dû aux mouvements de la source et/ou du récepteur. Dans le cas passif, il utilise le premier trajet reçu pour estimer la RI du canal. Dans les configurations où la distance source/récepteur est grande devant la hauteur d'eau, les trajets subissent des effets similaires dus au mouvement.

Dans notre procédé d'inversion, comme le signal émis est inconnu (contexte passif), la signature temps-fréquence de la modulation de fréquence est extraite du premier trajet détecté et sera utilisée comme référence du signal. Il nous faut donc extraire la signature temps-fréquence du signal traité.

3 - Tracking de cette signature temps-fréquence et estimation de la réponse impulsionnelle (RI) - Pour cela, un outil de tracking temps-fréquence est appliqué sur la représentation temps-fréquence. Le tracker temps-fréquence-phase décrit en termes d'architecture, d'implémentation et de performances dans *Ioana et al.* (2010a) et *Ioana et al.* (2010b) peut être utilisé. La figure 2.4 illustre les pistes (lignes blanches continues) restituées par ce tracker sur une vocalise du jeu de données que l'on souhaite exploiter pour l'inversion géoacoustique passive. D'autres outils plus ou moins complexes, automatiques et performants existent; *Lampert and O'Keefe* (2010) proposent une synthèse des méthodes de détection de signature sur spectrogramme.

Nous nous limitons dans le cadre des travaux présentés dans cette thèse à une sélection manuelle de la piste, la détection automatique de pistes étant un travail de thèse à part entière. Elle consiste à sélectionner les points caractéristiques de la vocalise (points d'inflexion) et à interpoler la signature entre ces points. La piste complète n'est pas nécessaire, une portion utile suffit pour la suite des traitements. Sur la figure 2.4, la vocalise dans le cadre en pointillé noir est scindé en 2 parties : une partie utile (notée d sur la figure) qui présente la propagation multitrajets, et une partie inutile (notée g sur la figure) qui, en raison de la pente du signal, ne permet pas d'observer distinctement la propagation multitrajets. Pour cette vocalise, on prendra donc uniquement la trace de la partie utile (d).

La piste du signal est ensuite décrite comme une fonction courbe paramétrée Γ correspondant aux maxima d'énergie le long de la signature sélectionnée précédemment (eq. 2.4). La réponse impulsionnelle de la source est enfin obtenue en intégrant l'intensité (spectrogramme) le long de cette courbe, sur une fenêtre temporelle glissante (eq. 2.5). La figure 2.5 schématise la RI obtenue (à droite) pour la propagation avec 5 trajets mesurables (à gauche).

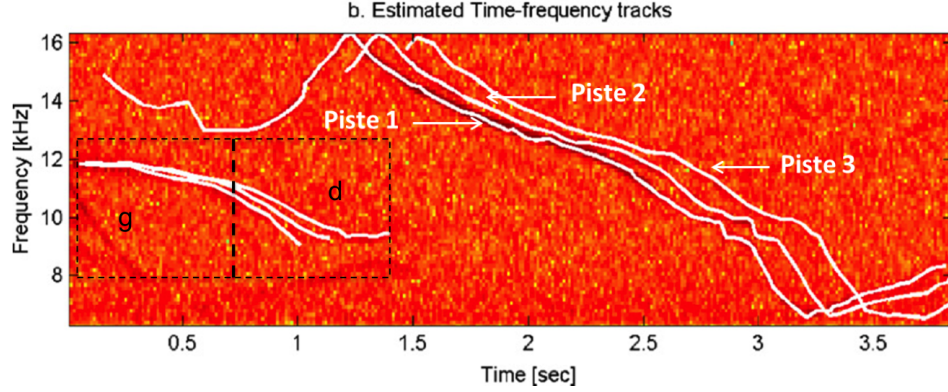


FIGURE 2.4 – Prétraitement temps-fréquence-phase sur une vocalise de dauphin commun. La vocalise traitée ici est celle de la figure 2.3. Les pistes estimées par un outil de prétraitement (F. Dadouchi, communication personnelle, (voir notamment [Dadouchi et al., 2013](#), pour une description de l'outil)) sont indiquées en traits pleins blancs. Les 3 premiers trajets (notés Piste 1, Piste 2 et Piste 3) ont été détectés.

$$s \xrightarrow{\Gamma} t(s), f(s) \quad (2.4)$$

$$E(t) = RI(t) = \int_{\Gamma} \text{spectro}(t(s), f(s)) df \quad (2.5)$$

La RI ainsi obtenue, permet d'estimer les observables nécessaires à l'inversion, c'est-à-dire :

- les temps d'arrivée relatifs des échos ($\tau_i = L_i/c$), avec c la célérité du son et L_i la longueur du trajet i ;
- l'énergie de chaque écho E_i .

Nous utilisons ces observables pour estimer la position de la source puis le coefficient de réflexion local pour le signal traité.

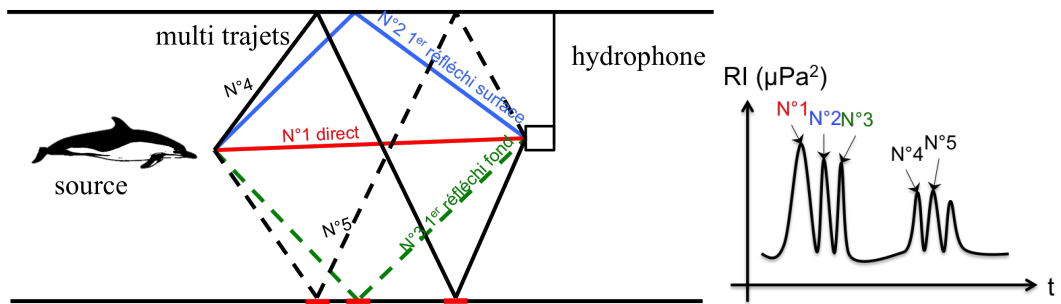


FIGURE 2.5 – A gauche : schéma de la propagation selon 5 trajets sous les hypothèses de travail. A droite : RI obtenue pour cette propagation en multitrajets

4 - Exploiter la propagation en multitrajets sur un seul hydrophone pour localiser la source - [Zimmer \(2011\)](#) présente les déclinaisons des méthodes de localisation exploitant les temps d'arrivée. La localisation de la source est estimée à partir d'un réseau de capteurs espacés d'une distance du même ordre de grandeur que la distance séparant la source du réseau (*multi-hydrophone*

ranging). Au moins 5 capteurs répartis sur une grande zone sont nécessaires. Une méthode moins coûteuse est la localisation à l'aide de la propagation multitrajets (*multi-path ranging*, voir aussi [Aubauer et al. \(2000\)](#)). Elle peut être mise en œuvre avec un unique hydrophone. Elle consiste à considérer les trajets constituant la propagation multitrajets comme des droites reliant la source à une antenne virtuelle d'hydrophones (voir figure 2.6). Les temps d'arrivée sur l'hydrophone principal sont donc répartis sur une antenne virtuelle verticale d'hydrophones.

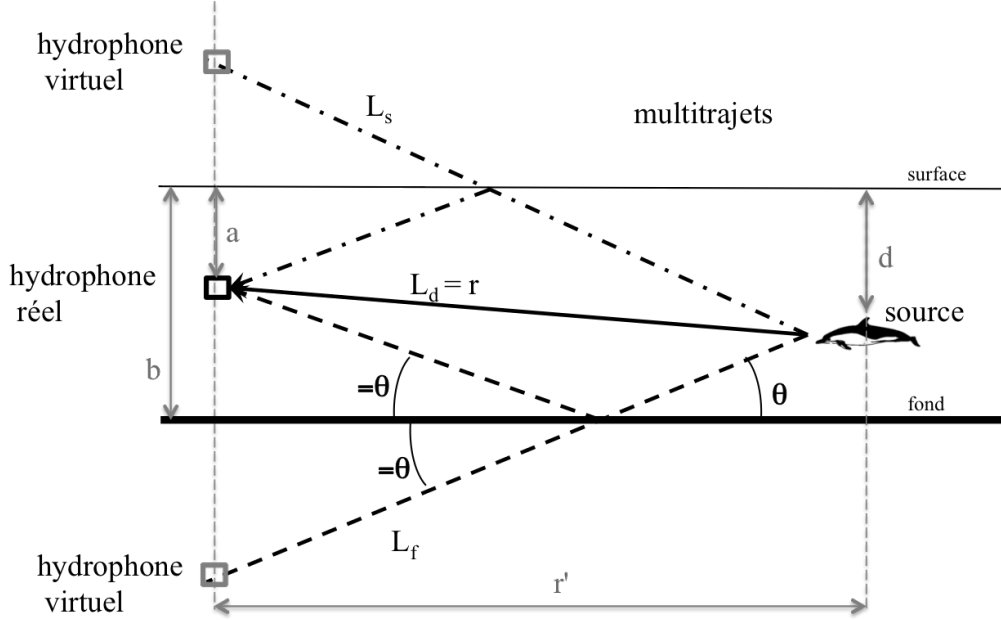


FIGURE 2.6 – Concept de localisation monocapteur de sources en milieu petits fonds (d'après [Aubauer et al., 2000](#))

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1.2.1.2, la propagation en lignes droites n'est valable que pour une célérité constante et dans une bathymétrie plate. Lorsque ces conditions ne sont pas vérifiées, une méthode de localisation qui ne souffre pas de cette limitation est la localisation par comparaison de la propagation observée avec la propagation modélisée (*ranging by acoustic modelling*, voir par exemple [Thode et al., 2000](#); [Tiemann et al., 2006](#)). Cette méthode est réalisable avec un unique capteur. Pour un ensemble de positions possibles, les temps d'arrivée sont calculés à l'aide d'un outil comme BELLHOP[®] et la surface d'ambiguïté traduisant l'erreur entre les temps d'arrivée mesurés et modélisés est tracée. La meilleure position est celle qui minimise cette erreur. Une bonne estimation nécessite cependant la connaissance de l'environnement de propagation.

Dans notre schéma, nous appliquons la méthode de [Aubauer et al. \(2000\)](#) pour localiser les sources. Connaissant uniquement la hauteur d'eau b et la profondeur de l'hydrophone a , [Aubauer et al. \(2000\)](#) expriment, à partir de relations géométriques, les angles d'arrivée des trajets ainsi que leurs longueurs en fonction de la profondeur et de la distance de la source (toutes les 2 inconnues). Les différences de temps d'arrivée permettent d'estimer ces inconnues.

Les trois premiers temps d'arrivée permettent de localiser la source en distance (r) et en profondeur (z) sans ambiguïté si l'identité des trajets est connue (qui est le 2^{ème} arrivé, le réfléchi fond ou le réfléchi surface?).

$$\begin{aligned} r &= \frac{\left(\frac{c \cdot \tau_{1b}}{2}\right)^2 + b \cdot (a - b) - \left(\frac{c \cdot \tau_{1s}}{2}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{b}{a}\right)}{\frac{c \cdot \tau_{1s}}{2} \cdot \left(1 - \frac{b}{a}\right) - \frac{c \cdot \tau_{1b}}{2}} \\ z &= \frac{\left(\frac{c \cdot \tau_{1b}}{2}\right)^2 + \left(\frac{c \cdot \tau_{1b}}{2}\right) \cdot r}{a - b} + b \end{aligned} \quad (2.6)$$

avec τ_{1b} (resp. τ_{1s}) la différence de temps d'arrivée entre le premier réfléchi fond et le trajet direct (resp. le premier réfléchi surface et le direct), c la célérité du son dans la colonne d'eau, r la longueur du trajet direct. Dans notre schéma, la source est localisée avec une ambiguïté sur l'identité du second trajet (premier réfléchi fond ou premier réfléchi surface) car nous ne disposons que des trois premiers trajets sur la majorité des signaux candidats (constat réalisé sur l'étude du jeu données décrit dans le paragraphe 2.2). L'ambiguïté de localisation est levée dès qu'un quatrième trajet est accessible.

Maintenant que la source est localisée, nous allons pouvoir procéder aux corrections des pertes de propagation et à l'estimation du coefficient de réflexion local.

5 - Correction des pertes de transmission des trajets et estimation du coefficient de réflexion local - À partir de la RI, nous proposons d'utiliser non seulement les retards (différences de temps d'arrivée) des trajets mais également les amplitudes de ces trajets. Les retards vont nous permettre de localiser la source comme expliqué précédemment. Certains d'entre eux auront rencontré le fond une ou plusieurs fois et portent donc de l'information sur ce fond, information que nous proposons d'exploiter. La référence non perturbée par le fond viendra des trajets qui n'ont pas rencontré l'interface avec le sédiment, soit dans nos hypothèses de travail le trajet direct (trajet "direct" rouge dans la figure 2.5) et le premier réfléchi surface.

Connaissant la position de la source, les longueurs des trajets acoustiques L_i ainsi que les angles de rasance des réfléchis fond peuvent être calculés par des critères géométriques simples ([Aubauer et al., 2000](#)). L'énergie des trajets est ensuite corrigée des pertes de transmission, en considérant des pertes de transmission sphériques, par une simple multiplication par le carré de la longueur estimée de chaque rayon. Le coefficient de réflexion est enfin estimé à partir des rapports des énergies des réfléchis fond sur la référence donnée par le trajet direct ([Harrison and Simons, 2002](#)). Pour des trajets qui se sont réfléchis j fois sur le fond :

$$|R(\theta_i)| = \sqrt{\frac{E_i \cdot L_i^{2(1/j)}}{E_d \cdot L_d^2}} \quad \text{avec} \quad (2.7)$$

$$\theta_i = \arctan \frac{L_i}{r'} \quad (2.8)$$

r' étant la distance cylindrique entre la source et le récepteur telle qu'indiquée dans la figure 2.6, L_i la longueur du trajet i .

La figure 2.7 résume l'étape 1 avec les traitements appliqués à chaque signal individuel : détection du signal, sélection manuelle de la piste du signal en considérant le premier trajet reçu comme la référence du signal (contexte passif), estimation de la RI du canal à partir de cette piste temps-fréquence, utilisation de la RI pour estimer les temps et amplitudes d'arrivée des trajets, localisation de la source à partir des différences de temps d'arrivée, estimation du coefficient de réflexion local à partir du rapport des amplitudes du trajet réfléchi fond et du direct.

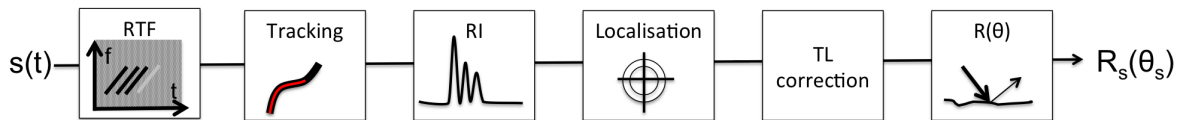


FIGURE 2.7 – Chaque signal subit une succession de traitements pour en extraire une valeur du coefficient de réflexion local, fonction de la rasance du réfléchi fond du signal propagé.

2.1.2.2 Mise en œuvre et positionnement de l'étape 2 : traitement d'une collection de signaux

En utilisant les longues périodes d'écoute permises par les enregistreurs acoustiques autonomes, l'étape 1 peut être appliquée à un nombre conséquent (Ns) de sifflements pour produire une collection C de coefficients de réflexion pour différentes rasances θ , $C = \{\theta(i), R(\theta(i)), i \in \{1 : Ns\}\}$ (étape 2 figure 2.1). La collection C des coefficients de réflexion sert d'observable pour l'étape 3 d'inversion géoacoustique.

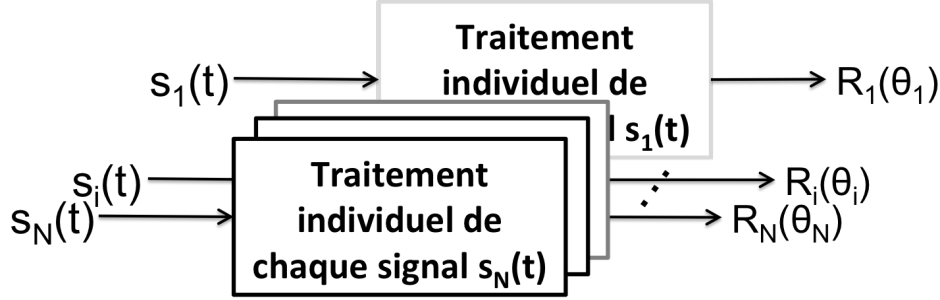


FIGURE 2.8 – L'étape 1 est répétée sur N signaux afin d'obtenir une courbe du coefficient de réflexion dans la zone des sources ayant émis les signaux

2.1.2.3 Mise en œuvre et positionnement de l'étape 3 : inversion géoacoustique

Les observables en inversion géoacoustique passive peuvent être de différentes natures selon la théorie de propagation qui s'applique et la source d'opportunité. Ainsi [Gervaise et al. \(2012\)](#); [Vallez \(2009\)](#); [Vallez et al. \(2008\)](#) exploitent les courbes de dispersion relatives provenant de l'enregistrement d'une radiale de navire (anthropophonie). Ils travaillent dans le cadre de la propagation modale sur des sources large bande très basses fréquences. Dans le cadre du projet de l'AED RUMBLE-2¹, [Abrahamsson et al. \(2011\)](#); [Juhel et al. \(2011\)](#) inversent la réverbération du fond provoquée par la propagation d'un signal sonar et enregistrée sur une antenne horizontale basses fréquences. Pour cela, ils maximisent la similarité entre une réverbération modélisée et la réverbération observée.

Le coefficient de réflexion est aussi un observable classique en inversion géoacoustique active (voir [Demoulin et al., 2000](#); [Dettmer et al., 2008](#); [Plantevin et al., 2009](#); [Stotts et al., 2004](#)) et passive (voir [Buckingham and Jones, 1987](#); [Harrison and Simons, 2002](#)) parce qu'on peut relier analytiquement le coefficient de réflexion à la réponse impulsionnelle du canal. [Demoulin et al. \(2000\)](#) présentent une méthode monocapteur basée sur la réponse impulsionnelle du canal à des modulations de fréquence. Ils formalisent la relation analytique entre le coefficient de réflexion et la réponse impulsionnelle en utilisant la durée de la RI et le rapport d'amplitudes des réfléchis fond. L'inversion du coefficient de réflexion donne les paramètres d'un milieu équivalent² fluide semi-infini (vitesse de compression et atténuation dans le sédiment). [Plantevin et al. \(2009\)](#) proposent une méthode petits fonds à partir d'émissions, par une source basses fréquences, de modulations de fréquence enregistrées sur un unique hydrophone. La structure sédimentaire du fond (vitesse de compression et épaisseur des couches) est tout d'abord estimée par méthode sismique puis les amplitudes des échos des trajets sont utilisées pour fournir une courbe du coefficient de réflexion en fonction des angles de rasance pour chaque couche, permettant d'affiner l'estimation de la vitesse de compression et d'estimer la densité et l'atténuation jusque dans le socle.

1. *Bottom Roughness Measurement by Use of Low Frequency Active Sonar* Projet de l'Agence Européenne de Défense qui a débuté en 2008

2. L'approche par milieu équivalent vise à fournir un modèle de fond permettant de traduire l'impact du canal sur la propagation du son aux fréquences d'intérêt sans nécessairement représenter la vérité terrain.

A l'interface entre deux fluides, lorsque l'interface est parfaitement plane, une partie de l'énergie de l'onde incidente est transmise d'un milieu à l'autre en fonction de l'angle d'incidence. L'onde réfléchie dans le premier milieu est affectée d'un coefficient de réflexion défini comme :

$$R = \frac{\rho_2 c_2 \sin(\theta_1) - \rho_1 c_1 \sin(\theta_2)}{\rho_2 c_2 \sin(\theta_1) + \rho_1 c_1 \sin(\theta_2)} \quad (2.9)$$

selon les notations de la figure 1.4. Le calcul du coefficient de réflexion pour 2 interfaces est détaillé en annexe A.

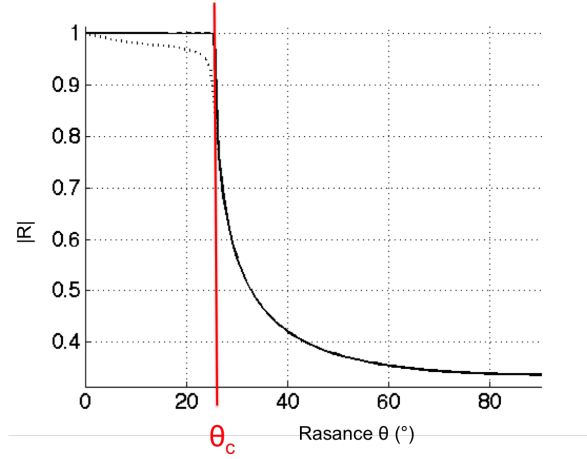


FIGURE 2.9 – Module du coefficient de réflexion entre deux milieux. L'angle critique θ_c est l'angle à partir duquel il commence à y avoir transmission dans le second milieu.

Lorsque l'interface n'est pas parfaitement plane, on assiste à des phénomènes de diffusion et rétro-diffusion complexes mais la rugosité est toute relative car elle dépend du rapport entre la dimension caractéristique de la rugosité et la longueur d'onde du signal. A la surface (interface eau/air), le coefficient de réflexion vaut -1 pour une surface suffisamment plane, c'est à dire telle que le signal ne subit qu'une inversion de phase.

Notre procédé d'inversion mis en place dans cette thèse vise à extraire, pour chaque signal, une estimation locale du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance en utilisant les amplitudes des trajets réfléchis fond et le trajet direct comme référence non modifiée par le fond (observables extraits de la réponse impulsionnelle du canal). Le traitement d'une collection de signaux (étape 2) permet d'obtenir une courbe du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance sur le fond. Cette courbe alimente un algorithme d'optimisation dont l'objectif est d'estimer les paramètres optimaux du fond. Pour cela, une structure sédimentaire est choisie *a priori* (nombre de couches, fluide ou élastique) et paramétrée par le vecteur de propriétés α . Nous produisons un modèle théorique $R_t(\theta, \alpha)$ du coefficient de réflexion de la structure. Les paramètres du modèle géoacoustique sont ensuite estimés par minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre le coefficient de réflexion modélisé et le coefficient de réflexion mesuré (cf. paragraphe 3.1.2) :

$$\tilde{\alpha} = \arg_{\alpha} \min \left(\frac{1}{Nt} \sum_{i=1}^{Nt} |R(\theta_i) - R_t(\theta_i, \alpha)|^2 \right) \quad (2.10)$$

En fonction de la structure sédimentaire du fond choisie, l'erreur quadratique moyenne peut présenter un seul minimum ou des minima secondaires. La recherche de l'optimum α_{opt} est effectuée par l'algorithme Levenberg-Marquard dans le cas d'un minimum global et par algorithme génétique dans le cas de l'existence de plusieurs minima secondaires.

Dans la suite du document, cette méthode sera nommée IGA-VMM-BR pour Inversion GéoAcoustique à partir de Vocalises de Mammifères Marins Basse Résolution. Nous allons appliquer cette méthode IGA-VMM-BR à des vocalises de dauphins communs enregistrés lors de la campagne ERATO 2009 et présentant une propagation multitrajets. Le paragraphe suivant décrit le jeu de données dont nous disposons puis les résultats obtenus sur la localisation des sources et l'estimation du coefficient de réflexion.

2.2 Vocalises hautes fréquences de mammifères marins : première application de la méthode d'inversion et identification de la problématique de directivité

2.2.1 Matériel et méthodes

La campagne ERATO 2009 a été conduite en septembre 2009 par le SHOM³ dans le Golfe de Gascogne à bord du navire océanographique l'Atalante, en eaux peu profondes (~130 m) et fond sableux ([Gervaise et al., 2010](#)). L'objectif principal de la campagne était l'évaluation du prototype STEREO⁴ composé de quatre antennes verticales d'hydrophones fixés sur des bouées dérivantes et d'une source acoustique basses fréquences remorquée. En plus de ce matériel, le système TELEMAQUE (une antenne d'hydrophones et des capteurs de température) a été mouillé à une position connue et deux enregistreurs autonomes (AURAL) ont été déployés à 85 m de profondeur.

Durant cette expérimentation, 59 heures d'enregistrement ont été réalisées, avec ou sans émissions actives. La figure 2.10 présente une série temporelle d'un des AURAL. Parmi les émissions actives, on compte les émissions du sondeur multifaisceaux, celles du sondeur de sédiments et les émissions actives réalisées pour l'inversion géoacoustique (indiquées par "MF-S" dans la figure 2.10) dans le cadre de l'étude amont STEREO. Des dauphins communs (*Delphinus delphis*) ont été remarqués sur la zone de l'expérimentation.

Un algorithme de détection, de portée 1 km, développé par C. Gervaise & al., a montré la présence de dauphins communs sur 9 heures d'enregistrements par les systèmes AURAL ([Gervaise et al., 2010](#)). Les instants correspondants sont indiqués par un D sur la figure 2.10. Les auteurs présentent leur outil de détection comme un moyen utile permettant le monitoring par acoustique passive lors d'émissions acoustiques (imagerie ou autre) et l'évaluation du comportement des mammifères marins en présence d'émissions actives.

Le jeu de données d'ERATO 2009 offre une variété de situations acoustiques (avec ou sans émissions actives) et une variété de signaux de dauphins. Parmi les sifflements observés, certains présentent des multitrajets et sont donc de bons candidats pour la méthode d'inversion proposée dans ce travail.

2.2.2 Exploitation préliminaire : localisation des sources et analyse des signaux

Dans cette campagne, nous avons ainsi sélectionné une centaine de sifflements présentant des multitrajets résolus, condition nécessaire pour leur exploitabilité par la méthode d'inversion basse résolution décrite dans la section précédente. Chaque signal a été traité selon l'étape 1 de la méthode telle que décrite dans la section précédente (§2.1.2.1).

Pour chaque signal, nous avons donc sélectionné la piste utile du signal qui a servi de référence pour

3. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

4. Programme d'études amont de la Direction Générale de l'Armement - Système Temps réel d'Evaluation Rapide de l'Environnement Océano-acoustique.

2.2. Vocalises hautes fréquences de mammifères marins : première application de la méthode d'inversion et identification de la problématique de directivité 49

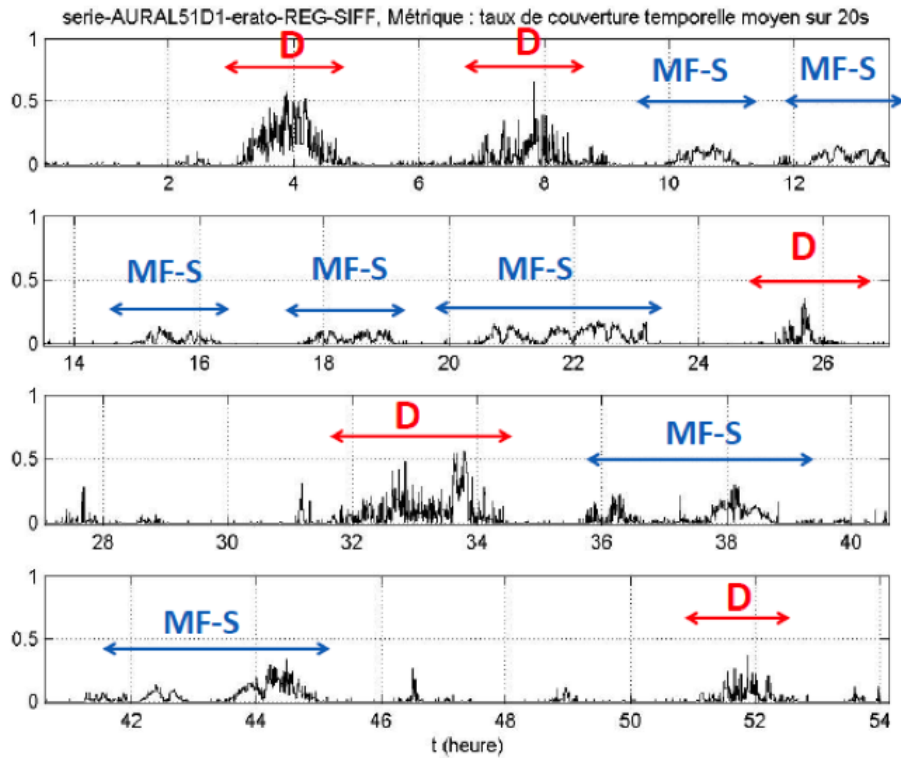


FIGURE 2.10 – Detections de sifflements de dauphins (notées **D**) durant la campagne ERATO 2009. La notation **MF-S** indique les émissions actives réalisées dans le cadre du projet STEREO [courtesy of SHOM]

obtenir la réponse impulsionnelle du canal. De cette RI ont été extraits les observables (temps et amplitudes d'arrivée) pour l'estimation de la position de la source et du coefficient de réflexion. Chaque signal a de plus été analysé en termes de pente dans l'espace temps-fréquence, de bande de fréquences, de durée, de niveau, etc. Les résultats de notre analyse de ces 100 signaux sont présentés dans le tableau 2.1. Le niveau de bruit ambiant dans la bande d'émission des dauphins (centrée sur 14 kHz) a été estimé, à partir des deux systèmes AURAL, à 51dB ref. $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$. Seuls les trois premiers trajets (soit deux différences de temps d'arrivée) sont exploités pour la localisation (distance et profondeur) de la source, le 4^{ème} trajet n'étant pas détecté par la méthode IGA-VMM-BR. L'utilisation de seulement 3 trajets ne permet pas de lever l'ambiguïté entre le premier réfléchi : le 2^{ème} arrivé correspond-il au premier réfléchi surface ou au premier réfléchi fond ? La position de la source reste donc incertaine sans l'exploitation d'un quatrième trajet pour discriminer les deux hypothèses. Pour l'analyse des signaux, les deux hypothèses ont été conservées et sont indiquées par hyp.1⁵ et hyp.2⁶ dans le tableau 2.1. L'erreur de localisation en distance reste néanmoins faible avec 132 m de distance moyenne estimée avec l'hypothèse 1 contre 142 m avec l'hypothèse 2. Seule la profondeur varie entre les deux hypothèses avec 35 m de profondeur moyenne estimée avec l'hypothèse 1 contre 87 m avec l'hypothèse 2.

5. (hyp. 1) hypothèse sur l'ordre d'arrivée des trajets : direct - 1^{er} réfléchi surface - 1^{er} réfléchi fond

6. (hyp. 2) hypothèse sur l'ordre d'arrivée des trajets : direct - 1^{er} réfléchi fond - 1^{er} réfléchi surface

TABLE 2.1 – Statistiques issues du traitement de cent sifflements de dauphins communs enregistrés durant la campagne ERATO 2009

#	Caractéristiques	Moyenne	Ecart type	25%	50%	75%
1	Niveau du signal émis (hyp.1) - dB rel $1\mu\text{Pa}$ rms @1 m	130.3	6.4	126.5	130.6	134.8
2	Niveau du signal émis (hyp.2) - dB rel $1\mu\text{Pa}$ rms @1 m	131.2	5.8	126.9	131.1	135.3
3	Fréquence centrale - Hz	11312	1537	10411	11062	12292
4	Bande fréquentielle du signal sélectionné - Hz	1772	722	1252	1614	2143
5	Durée de la sélection - sec	0.1	0.05	0.06	0.09	0.1
6	Pente du signal (valeur absolue) - kHz/sec	23018	15690	12869	19603	25270
7	Distance (hyp.1) - m	132	64	104	147	178
8	Profondeur (hyp.1) /130 m d'eau - m	35	8.8	30.9	36.3	40.3
9	Distance (hyp.2) - m	142	65	114	158	188
10	Profondeur (hyp.2) /130 m d'eau - m	87	9.4	80.5	84.8	90.3
11	Différence des niveaux reçus (1-2)	-0.24	7.21	-4.83	-0.90	2.49
12	Différence des niveaux reçus (1-3)	0.98	7.15	-3.27	0.91	5.02
13	Niveau de bruit à 14kHz - dB rel $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$	51	1.4	48.7	51.2	53.2

Cette étude a permis une estimation des caractéristiques moyennes des signaux candidats pour la méthode d'inversion et une compréhension du comportement acoustique des dauphins (notamment leur directivité). Les statistiques du tableau 2.1 ont été utilisées pour la génération de signaux synthétiques représentatifs des signaux candidats dans la suite des travaux. Cette analyse permet aussi de souligner les points caractéristiques suivants :

1. (caractéristiques lignes #7, 9) les sifflements utilisés sont émis par des dauphins situés dans une même région et à des profondeurs relativement proches les uns des autres et aucun dauphin localisé ne se situe au-delà de 300 m ;
2. (caractéristiques lignes #1, 2) le niveau moyen émis est inférieur au niveau que l'on trouve dans la littérature pour des dauphins communs ([Zimmer, 2011](#), estiment par exemple à 151 dB RMS rel $1\mu\text{Pa}$ @ 1 m le niveau des sifflements de dauphins Tursiops dans la direction principale d'émission) ;
3. (caractéristiques lignes #11, 12) la différence de niveau entre le direct et le premier réfléchi est en moyenne négative. C'est une preuve de la directivité de la source.

Point 1. (lignes #7, 9) lié au domaine de fonctionnement de la méthode : Cette limite est due à la méthode appliquée pour la localisation. Seules les sources présentant des multi-trajets

2.2. Vocalises hautes fréquences de mammifères marins : première application de la méthode d'inversion et identification de la problématique de directivité 51

résolus au sens des outils mis en œuvre peuvent être localisées avec cette méthode, sans séparation préalable des trajets. La configuration source/récepteur joue ici un rôle puisque seules les sources positionnées telles que les trajets soient séparés seront exploitables. Cela implique une portée maximale limitée mais aussi la présence de zones d'ombres en termes de profondeur pour l'algorithme ; les résultats de localisation de ces sources seront discutés et confrontés avec succès à l'étude de performances du schéma d'inversion présentée dans le paragraphe 3.3 du chapitre 3.

Points 2 et 3. (lignes #1, 2, 11 et 12) indicateurs de la directivité des vocalises des dauphins communs : Les puissances moyennes acoustiques trouvées dans la littérature donnent une fourchette large de valeurs avec par exemple 151 dB RMS rel 1 μ Pa @ 1 m indiqués dans [Zimmer \(2011\)](#) tandis que [Josso \(2010\)](#) recense des valeurs de 120 à 178 dB RMS rel 1 μ Pa @ 1 m. Cela reflète la directivité de la source. En effet, pour une source directive que l'on capte sur un unique hydrophone, le niveau apparent ([Zimmer, 2011](#)) est inférieur au niveau émis selon l'axe acoustique (axe principal d'émission) :

$$ASL(\theta) = SL_o - DL(\theta) \text{ dB rel. } 1\mu Pa @ 1 \text{ m} \quad (2.11)$$

avec SL_o le niveau de la source sur l'axe principal d'émission (ou axe acoustique) et $DL(\theta)$ les pertes de directivité selon l'axe θ entre la direction d'émission et l'axe acoustique. Les différences de niveaux présentées dans le tableau 2.1 sont obtenues sans correction préalable des pertes de transmission le long des trajets. Pour une source omnidirectionnelle, le 2^{ème} trajet étant plus long que le premier, il doit présenter un niveau reçu (non corrigé) plus faible (de même pour le 3^{ème} par rapport aux deux premiers). La ligne #11, "Différences des niveaux reçus (1-2)" (tableau 2.1), indique une valeur moyenne négative ce qui signifie que le premier trajet n'est pas le plus fort. Les trajets ne sont donc pas soumis uniquement à des pertes de transmission mais aussi à des pertes dues à la directivité des sources qui expliquent ces observations.

Etudions cela. Le dauphin émet les trois grands types de signaux de mammifères marins : la vocalise, le clic et le train pulsé. La plupart des études sur la directivité portent sur les clics et les tons pulsés mais rarement sur les sifflements (voir [Branstetter et al., 2012](#); [Dantzer et al., 1999](#)), qui ont longtemps été considérés comme omnidirectionnels dans la littérature ([Au, 1993](#); [Zimmer, 2011](#)). [Zimmer \(2011\)](#) relie la directionnalité avec le rapport entre la taille du melon⁷ et la longueur d'onde. Pour un dauphin de 2 m, le melon mesure environ 20 cm et le ratio entre cette dimension et la longueur d'onde des émissions sera inférieur à 1 pour les fréquences inférieures à 7.5 kHz (non directif). Pourtant, des études comme celle de [Lammers and Au \(2003\)](#) ont montré que la vocalise de dauphin à long bec (*Stenella longirostris*) étaient directives. Notre étude statistique réalisée sur les données de la campagne ERATO 2009 (tableau 2.1) montre des signes de directivité sur les vocalises des dauphins communs.

La figure 2.11 illustre ces observations de directivité sur un sifflement de dauphin de la campagne ERATO 2009. Les trajets sont identifiés dans l'ordre d'arrivée 1, 2 et 3. Dans le cadre a1, on peut voir que le deuxième trajet, bien qu'ayant parcouru une plus grande distance, présente un niveau reçu plus élevé autour de 14 kHz. Pour une source omnidirectionnelle, les niveaux des trajets diminuent avec l'ordre d'arrivée du trajet du fait des pertes de propagation plus importantes. Ici, ce n'est pas le cas. Une différence de puissance à l'émission dans la direction d'émission du 2^{ème} trajet, explique cette observation. Dans le cadre a2, on observe un "zéro" - ou plutôt un niveau en-dessous du niveau de bruit ambiant - sur le deuxième trajet autour de 12 kHz tandis que le direct et le troisième trajet sont non-nuls pour cette même fréquence. Ce comportement acoustique n'est pas celui d'une source omnidirectionnelle. Cette observation peut être expliquée par un diagramme de directivité de la source présentant une atténuation autour de cette fréquence pour la direction d'émission du deuxième trajet.

Pour illustrer les difficultés liées à la directivité des sources dans l'inversion géoacoustique, considérons dans un premier temps que les systèmes d'émissions des dauphins sont des sources isotropes lorsqu'ils émettent des sifflements tels que ceux présentés dans le paragraphe précédent. Nous avons poursuivi l'application de la méthode IGA-VMM-BR sur ces vocalises de dauphins jusqu'à l'estimation de la courbe du coefficient de réflexion, comme si les sources étaient isotropes. Nous verrons dans le chapitre 3 que cette méthode donne de bons résultats sur des émissions synthétiques représentatives des sifflements de dauphins, et émises par des sources isotropes situées à des distances inférieures à

7. Masse de tissu adipeux présente dans le front de tous les odontocètes

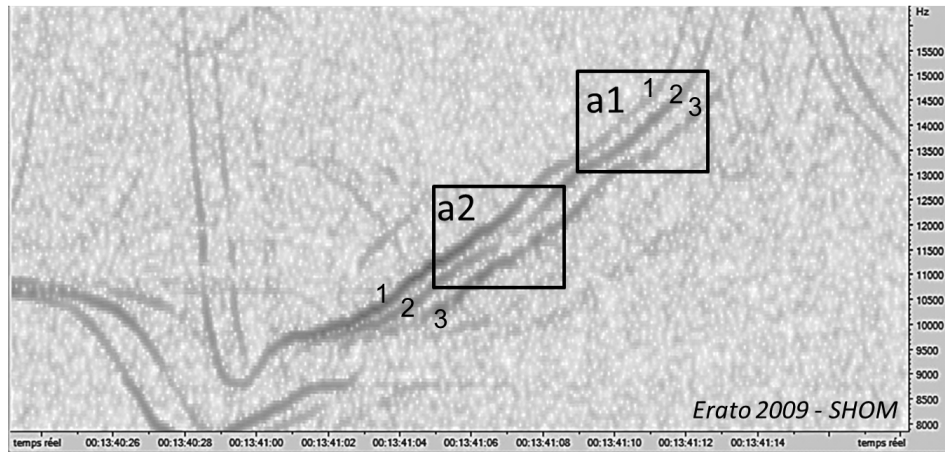


FIGURE 2.11 – Un sifflement enregistré dans le Golfe de Gascogne. Les trajets sont identifiés dans l'ordre d'arrivée 1, 2 et 3. Cadre a1 : le deuxième trajet présente un niveau plus fort que le trajet direct. Cadre a2 : "zéro" du deuxième trajet alors que le direct et le troisième sont non nuls.

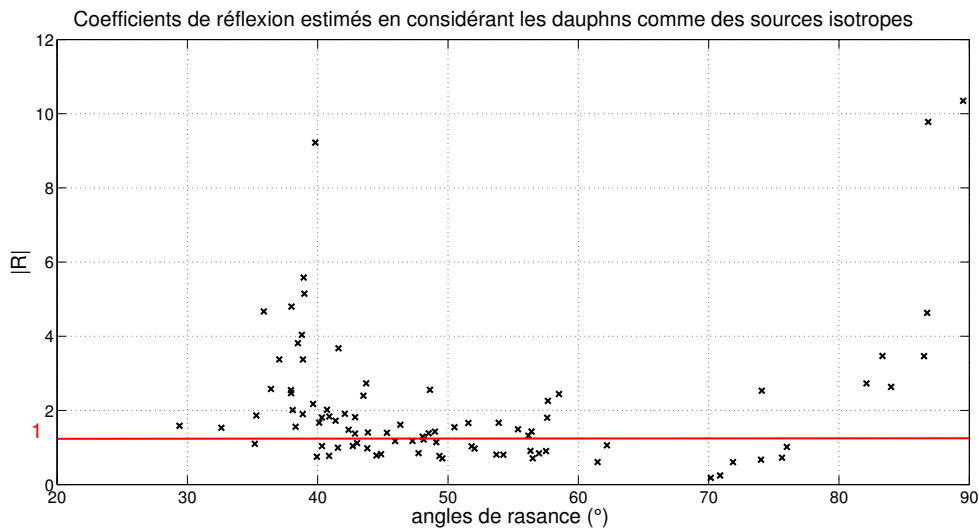


FIGURE 2.12 – Courbe de coefficient de réflexion estimée avec la méthode IGA-VMM-BR décrite au chapitre 3 à partir des sifflements de dauphins de la campagne ERATO 2009 en les traitant comme des sources isotropes. La ligne rouge est la limite physique maximale de valeur 1 pour un coefficient de réflexion du fond

300 m. La figure 2.12 présente la courbe de coefficient de réflexion estimée avec la méthode si on considère le dauphin comme une source isotrope pour l'émission des sifflements. On constate que la majorité des points de la courbe de coefficient de réflexion estimée est bien supérieure à la valeur physique de 1 du coefficient de réflexion. Cette courbe est inexploitable pour l'inversion. Traiter les sifflements de dauphins comme des émissions de sources isotropes n'est donc pas satisfaisant.

Les sifflements de dauphin sont donc directs. Contrairement à une source omnidirectionnelle, les trajets émis par une source directive sont entachés, dès leur émission, d'une perte de directivité liée au diagramme de directivité de la source, fonction de la fréquence et de la direction d'émission de chaque trajet. Les niveaux des trajets ne peuvent donc pas être directement exploités après correction des

pertes de transmission.

La difficulté réside dans la connaissance du diagramme de directivité de la source... Loin d'être une étude exhaustive sur la directivité, la suite du chapitre présente l'analyse de la directivité centrée sur une source particulière - le dauphin commun - source que l'on souhaite utiliser pour l'inversion et pour laquelle on dispose de données (cf. paragraphe 2.2). La prise en compte de la directivité dans le schéma d'inversion sera présentée, sous l'hypothèse que le diagramme de directivité de la source est connu (§2.3.2). Puis nous décrirons des alternatives pour tenter de lever la difficulté de la directivité lorsque le diagramme de la source n'est pas accessible (§2.3.3).

2.3 La directivité des sources : étude et prise en compte dans le schéma d'inversion géoacoustique passive développé

2.3.1 Mesurer et observer les diagrammes de directivité sur terre et sous l'eau

2.3.1.1 Quelques définitions pour commencer

La directionalité D (éq. 2.12) d'une source traduit la répartition angulaire de l'énergie rayonnée par une source. Une source omnidirectionnelle (ou isotrope), émet la même quantité d'énergie dans toutes les directions. En général, la directionalité est liée au rapport entre la longueur d'onde du signal émis et les dimensions du projecteur acoustique. Pour un émetteur, elle permet de concentrer l'énergie dans une direction plutôt que de la répartir dans toutes les directions. Cela permet, à énergie égale, d'augmenter le rapport signal à bruit, au niveau du récepteur, dans la direction d'émission.

Elle se définit comme le rapport entre l'intensité acoustique émise par la source dans la direction principale et l'intensité moyenne I_{iso} qui serait produite par une source omnidirectionnelle à la même distance (cf. équation 2.12) et revient donc au gain d'intensité obtenu par la focalisation sur un angle solide (cet angle vaut 4π dans le cas omnidirectionnel).

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{I(r, \theta_{axis}, \phi_{axis})}{I_{iso}} \text{ d'où} \\
 D &= \frac{p^2(r, \theta_{axis}, \phi_{axis})}{\int_{4\pi} p^2(r, \theta, \phi) dS / 4\pi} \text{ or } p(r, \theta, \phi) = p(r, \theta_{axis}, \phi_{axis}) \cdot h(\theta, \phi) \\
 D &= \frac{4\pi \cdot p^2(r, \theta_{axis}, \phi_{axis})}{\int_{4\pi} p^2(r, \theta_{axis}, \phi_{axis}) \cdot h^2(\theta, \phi) dS} \\
 D &= \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} h^2(\theta, \phi) dS} \text{ en 2D, D devient : } D = \frac{2\pi}{\int_0^{2\pi} h^2(\theta) d\theta} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

$h(\theta, \phi)$ est le diagramme de directivité de la source directive. Il est dépendant de la fréquence et choisi tel que $h(\theta_{axis}, \phi_{axis}) = 1$.

L'indice (ou gain) de directivité DI (éq. 2.13) est le logarithme de la directionalité. Il permet de comparer l'intensité dans le lobe principal d'émission de la source directive avec l'intensité d'une source omnidirectionnelle de même puissance totale. Il donne une indication de la largeur du lobe principal (plus il est grand, plus le lobe est étroit) mais il ne prend pas en compte la forme de la fonction de directivité. Deux diagrammes de formes différentes peuvent ainsi avoir le même indice.

$$DI = 10 \log_{10}(D) \quad (2.13)$$

Le diagramme de directivité (ou fonction de directivité) $h(f, \theta, \phi)$ (éq. 2.14) est le rapport entre l'intensité acoustique dans une direction et l'intensité dans la direction principale d'émission. Il représente l'atténuation en dB par rapport à l'axe principal d'émission. Il est une fonction de la fréquence et de l'angle et varie selon le mécanisme de production et la géométrie de l'émetteur. En champ lointain, le champ de pression d'une source directive à la distance r émis selon l'angle θ peut s'exprimer comme :

$$h(f, \theta, \phi) = \left| \frac{p(f, \theta, \phi)}{p(f, 0, \phi)} \right|^2 \quad (2.14)$$

$$H(\theta, \phi) = 10 \log_{10} h^2(\theta, \phi) \text{ avec } \text{Max}(H(\theta, \phi)) = 0 \text{ dB} \quad (2.15)$$

2.3.1.2 La directivité dans le monde animal

La directivité de source n'est pas uniquement présente dans le milieu sous-marin, elle est présente dans tout le monde animal. Quelques espèces connues pour leurs émissions directives sont présentées en figure 2.13. Les études sur les diagrammes de directivité en émission concernent les mammifères marins mais aussi les mammifères terrestres ou encore les oiseaux ([Dantzer et al., 1999](#)). L'objectif des études sur cette thématique est de comprendre l'utilité et l'utilisation de la directivité des émissions observées. Pour cela, on cherche à mesurer mais aussi à modéliser le diagramme de directivité des sources.



Le tétras des armoises male



La grande chauve-souris brune



Le dauphin Tursiops

FIGURE 2.13 – Quelques bêtes aux émissions directives

Ainsi, sur terre, pour les chauve-souris dont l'émission sonore se fait par les narines, le diagramme de directivité peut être approché par un modèle composé de deux émetteurs assez proches pour interférer et agir sur la directivité. Les chercheurs ont pu démontrer une relation entre la distance entre les narines et la longueur d'onde émise ([Strother and Mogus, 1970](#)). Pour les chauve-souris qui émettent les sons par la bouche, [Hartley and Suthers \(1989\)](#) démontrent une relation entre le rayon d'ouverture de la bouche et celui d'un modèle de piston circulaire. Ils montrent que le modèle du piston explique la direction principale d'émission mais pas l'intégralité du diagramme, en particulier le lobe ventral secondaire observé par [Hartley and Suthers \(1989\)](#) et [Shimozawa et al. \(1974\)](#) sur différentes espèces de chauve-souris. Les émissions du Tétras des Armoises (*Centrocercus urophasianus*) sont très directives puisqu'elles lui servent à attirer les femelles avec des signaux sonores de hautes intensités tout en leur présentant son meilleur profil. Le diagramme de directivité des sifflements de cet oiseau est asymétrique selon l'axe antéro-postérieur de l'oiseau et présente un zéro en émission vers l'avant (contrairement à la plupart des diagrammes de directivité qui présentent un maximum dans la direction d'orientation de la tête [Dantzer et al. \(1999\)](#)). Sous l'eau, [Au \(1993\)](#) suppose aussi le modèle du piston circulaire non baffle comme modèle d'indice de directivité des mammifères marins. Il donne une valeur théorique du rayon du piston équivalent pour le dauphin Tursiops (*Tursiops truncatus*) ou le béluga (*Delphinapterus leucas*). [Au et al. \(1995\)](#) mesurent le diagramme de transmission d'un fausse orque (*Pseudorca crassidens*) et démontrent que son indice de directivité peut être modélisé par un transducteur plan rectangulaire de longueur 10 cm et de largeur 16.1 cm.

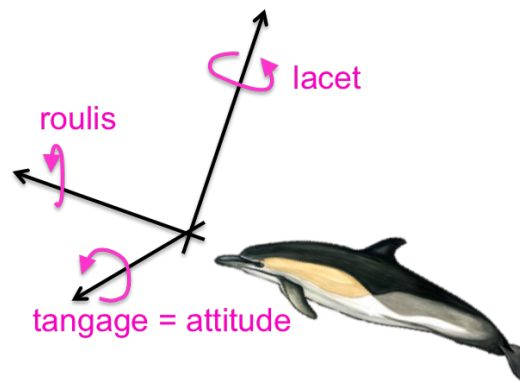


FIGURE 2.14 – Définition des angles en 3D décrivant l'orientation d'un animal dans l'espace. Dans le suite ce manuscrit, nous appelons "attitude" l'angle de tangage

Toutes ces études sont réalisées sur des animaux en captivité ou *a minima* sur des animaux dont l'orientation du corps dans l'espace est accessible (position, roulis, tangage et lacet (en 3D), voir figure 2.14). [Dantzker et al. \(1999\)](#) étudient des oiseaux en liberté mais utilisent des enregistrement vidéo pour estimer la position des individus étudiés. Avec des moyens plus perfectionnés, [Lee et al. \(2016\)](#) enregistrent les mouvements de la tête de la chauve-souris émettrice à l'aide d'une caméra infrarouge à capture rapide. ([Au et al., 1995](#); [Branstetter et al., 2012](#)) utilisent des animaux entraînés à prendre certaines positions et émettre les signaux demandés. La géométrie source/récepteur et l'orientation de l'axe principal de la source sont ainsi connus. De plus, les émissions sont souvent stimulées, électriquement pour les chauves-souris [Hartley and Suthers \(1989\)](#); [Wotton et al. \(1997\)](#), ou avec des entraînements pour les mammifères marins [Au et al. \(1995, 2012\)](#); [Branstetter et al. \(2012\)](#).

Pourquoi cette directionalité? [Zimmer \(2011\)](#) avance qu'un animal a ses raisons pour émettre dans une certaine direction. Ainsi, dans un contexte monostatique (l'animal est à la fois émetteur et récepteur) comme pour l'écholocation, le signal va être très directif pour ne pas gaspiller d'énergie acoustique inutilement, tandis que dans un contexte multistatique (par exemple : l'animal s'adresse à d'autres individus) comme pour la communication dans le groupe, l'animal utilisera des signaux moins directifs pour atteindre tous les destinataires du message. Il est supposé que les odontocètes émettent des clics d'écholocation via le melon. [Moore et al. \(2008\)](#) expliquent qu'ils peuvent orienter le faisceau et ajuster sa largeur pour affiner l'écholocation dans une direction. [Benoit-Bird and Au \(2009\)](#) avancent également que la directivité est aussi exploitée pour la communication au sein d'un groupe, notamment pour se coordonner durant la chasse. Les individus seraient capables d'estimer la direction des autres individus grâce à la fréquence et à l'amplitude des clics qui varient selon l'orientation dans l'espace.

Que sait-on du diagramme de directivité du dauphin, source que l'on souhaite utiliser dans le cadre de cette thèse? Concernant la forme du diagramme de directivité, [Au \(1993\)](#) mesure une ouverture de 10° à -3 dB et modélise le reste du diagramme par un piston circulaire de rayon 4 cm pour le clic ; les sifflements sont quant à eux considérés comme non directifs, ce qui à l'époque était une hypothèse communément admise. Cette taille de piston est estimée par comparaison de l'indice de directivité du diagramme de directivité du Tursiops avec celui d'un piston via la relation $DI = \log(d)$, d étant la directivité du piston, fonction du rayon du piston et DI l'indice de directivité. Depuis, de nouvelles mesures ont été réalisées par [Au et al. \(2010,0\)](#); [Branstetter et al. \(2012\)](#) sur cette même espèce de dauphins *Tursiops truncatus* et ce modèle a été contredit. De plus, [Branstetter et al. \(2012\)](#) démontrent par des mesures que les sifflements sont bien directifs avec un indice de directivité de 4.5 contre 11 pour les clics des mêmes animaux.

Le mécanisme d'émission des clics n'est toujours pas connu. [Au et al. \(2010\)](#) dresse un bilan des études physiques et chimiques sur les mécanismes de propagation du son dans le melon des odontocètes

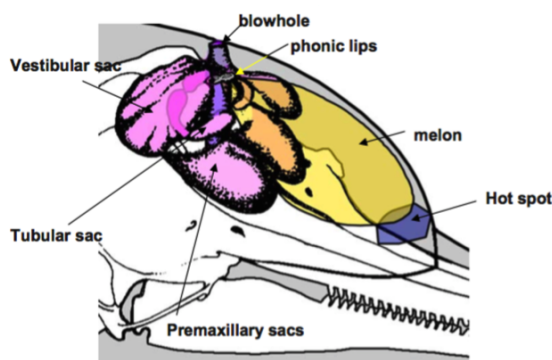


FIGURE 2.15 – Schéma issu de [Au et al. \(2010\)](#) (adapté de [Purves and Pilleri \(1983\)](#)) montrant la position des structures internes de la tête du dauphin

ainsi que les simulations numériques réalisées. Le melon est un milieu non homogène qui présente des gradients de vitesse de propagation du son et de densité. Pourtant, le crâne et les sacs d'air présents dans la tête du dauphin jouent également un rôle dans la focalisation du son émis. [Au et al. \(2010\)](#) mesurent sur 2 individus, au niveau du rostre et du melon ainsi qu'à 1 m de la source, le clic émis par les lèvres phoniques situées à environ 3 cm de l'évent. L'étude montre que le signal est d'abord concentré par les sacs d'air et le crâne avant de subir une diffraction dans le melon.

En résumé, on ne connaît donc pas encore précisément le diagramme de directivité de la source (sifflements de dauphins) que l'on souhaite utiliser pour les travaux d'inversion réalisés dans le cadre de cette thèse. Néanmoins, dans la suite de cette section, nous allons tenter d'étudier les conditions nécessaires pour assurer la faisabilité d'une inversion géoacoustique à partir d'une source directive, et les verrous techniques à lever.

Deux cas sont étudiés :

1. cas n° 1 : le diagramme de directivité de la source est connu et disponible. Tout va bien ! Le paragraphe 2.3.2 décrit la prise en compte de cette directivité dans le schéma d'inversion proposé.
2. cas n° 2 : le diagramme de directivité de la source est inconnu. Dans ce cas, tout n'est pas perdu :
 - (a) des mesures du diagramme sont disponibles et une modélisation du diagramme de directivité est réalisée (§2.3.3.1) ;
 - (b) un modèle peut être supposé pour décrire au mieux le diagramme de directivité (§2.3.3.2).

2.3.2 Prise en compte de la directivité dans notre schéma d'inversion

Dans ce paragraphe, pour simplifier la démonstration, nous nous plaçons en 2D dans le plan contenant l'axe principal d'émission de la source et le récepteur. Le diagramme de directivité de la source est connu comme une fonction $h(f, \theta)$ (cf. paragraphe 2.3.1.1). La bathymétrie est considérée plate pour faciliter la présentation des relations entre les angles et des logiciels comme BELLHOP[®] fournissent les paramètres nécessaires que l'on considère connus dans ce paragraphe. Nous montrons pourquoi il faut prendre en compte la directivité et comment nous proposons de le faire dans la méthode d'inversion.

La localisation de la source n'est pas impactée par la directivité de la source puisque les amplitudes des trajets n'interviennent pas dans l'estimation de la localisation. On considère donc que la position de la source est connue. On connaît alors les angles d'arrivée des trajets au niveau du récepteur soit par calculs (cf. chapitre 3), soit par des outils comme BELLHOP[®] (cf. chapitre 5). La convention ici choisie est le sens anti-horaire pour les angles positifs.

Chaque trajet i reçu résolu est donc le résultat du filtrage par la fonction de directivité h dans la direction d'émission du trajet $\theta_{e,i}$. Nous disposons des mesures s_i , *a minima* pour $i = 1 : 3$

$$\begin{aligned} s_i(t) &= e(t) \otimes h(f, \theta_{e,i}) \otimes g(t) + b(t) \text{ soit dans l'espace de Fourier} \\ S_i(f) &= E(f) \cdot H(f, \theta_{e,i}) \cdot G(f) + B(f) \end{aligned} \quad (2.16)$$

avec $e(E)$ le signal émis par une source omnidirectionnelle, $h(H)$ le diagramme de directivité de la source, $g(G)$ la fonction de transfert du canal dans lequel le signal s'est propagé et $b(B)$ le bruit. La perte de directivité varie en fonction de l'angle $\theta_{e,i}$ d'émission du trajet par rapport à l'axe principal du diagramme de directivité. Cet axe principal d'émission dépend de l'orientation de la source dans l'espace. En 2D, nous appelons "attitude" et notons α l'angle entre l'axe principal d'émission et l'horizontale. La figure 2.16 présente l'attitude α d'une source, repérée par rapport à l'horizontale, et l'angle d'émission d'un trajet (avec l'exemple du réfléchi surface) en fonction de cet angle. L'angle d'émission $\theta_{e,i}$ du premier réfléchi surface peut être exprimé en fonction de l'attitude et de l'angle d'arrivée θ_s comme $\theta_{e,i=s} = -\theta_s - \alpha$ (avec pour convention le sens anti-horaire pour les angles positifs). Tous les trajets subissent des pertes de directivité mais seuls les trajets direct et premier réfléchi surface ne sont pas, en plus de cela, atténués par le fond. Nous allons donc les utiliser pour estimer les corrections liées à la directivité de la source.

Lorsque le diagramme de directivité est connu, seule l'attitude de la source est inconnue. Elle est pourtant nécessaire pour calculer les pertes de directivité à corriger pour chaque trajet. L'objectif est donc d'estimer l'attitude α de la source au moment de l'émission pour pouvoir remonter aux pertes de directivité subies dans les directions d'émissions des trajets.

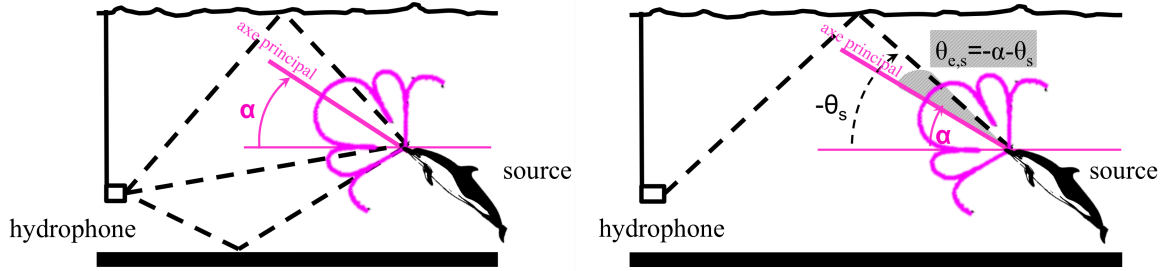


FIGURE 2.16 – En 2D, le diagramme de directivité est positionné dans le plan de la source et de l'hydrophone par l'angle α appelé "attitude". Les angles d'émissions $\theta_{e,i=s}$ des trajets sont repérés par rapport à l'horizontale mais peuvent être exprimés en fonction de l'attitude α et de l'angle de réception θ_s comme présenté à droite. $\theta_{e,i=s} = -\theta_s - \alpha$ est la direction d'émission du trajet surface par rapport à l'axe principal du diagramme de directivité.

Les mesures fournissent les spectres $|S_d(f)|$ (reps. $|S_s(f)|$) des trajets direct (reps. premier réfléchi surface) dont on dispose. Alors, d'après 2.16, on a :

$$\begin{aligned} |S_d(f)| &= |S(f) \cdot H(\theta_{e,d}, f) + B(f)| \\ |S_s(f)| &= |S(f) \cdot H(\theta_{e,s}, f) + B(f)| \end{aligned} \quad (2.17)$$

avec S le signal reçu. En introduisant l'attitude α (inconnue) et les angles d'arrivée des trajets (connus) à la place des angles d'émission, on obtient :

$$\begin{aligned} |S_d(f)| &= |S(f) \cdot H(\theta_d - \alpha, f) + B(f)| \\ |S_s(f)| &= |S(f) \cdot H(-\alpha - \theta_s, f) + B(f)| \end{aligned} \quad (2.18)$$

Pour s'affranchir du niveau émis inconnu, on forme la différence (en dB) de ces spectres (différence entre le spectre du trajet direct et celui du réfléchi surface), soit :

$$M = |S_d(f)| - |S_s(f)| \quad (2.19)$$

Cette différence peut être approchée par la différence entre la perte de directivité dans la direction d'émission du trajet direct et celle dans la direction d'émission du trajet surface comme :

$$M \approx H(-\alpha - \theta_s, f)_{dB} - H(\theta_d - \alpha, f)_{dB} \quad (2.20)$$

En effet, on corrige des pertes de transmission chaque trajet i ($i = d, s$) et on manipule l'expression de $|S_i(f)|$ telle que :

$$\begin{aligned} |S_i(f)| &= |E(f).G_i(f).H(-\alpha - \theta_s, f)| \cdot \left| 1 + \frac{B(f)}{E(f).G_i(f).H(-\alpha - \theta_s, f)} \right| \\ |S_i(f)|_{dB} &= |E(f)|_{dB} + |G_i(f)|_{dB} + |H(-\alpha - \theta_s, f)|_{dB} + \left| 1 + \frac{B(f)}{E(f).G_i(f).H(-\alpha - \theta_s, f)} \right|_{dB} \end{aligned}$$

ainsi, après correction des pertes de transmission, on obtient :

$$|S_i(f)|_{dB} = |E(f)|_{dB} + |H(-\alpha - \theta_s, f)|_{dB} + \left| 1 + \frac{B(f)}{E(f).G_i(f).H(-\alpha - \theta_s, f)} \right|_{dB} \quad (2.21)$$

On rappelle que E est le signal émis par une source isotrope, G est la fonction de transfert du canal (pour le direct et le réfléchi surface, G comprend les pertes de transmission). La différence exploitée dans le modèle $\hat{M}$ (éq. 2.20) permet de s'affranchir du niveau émis E inconnu en contexte passif. On néglige également le terme de bruit dans le modèle $\hat{M}$.

L'attitude de la source est l'angle α qui minimise la différence entre la mesure M et la différence entre les pertes de directivité dans chaque direction :

$$\min_{\alpha} (\sum |M - \hat{M}|^2) \quad (2.22)$$

avec $\hat{M} = H(-\alpha - \theta_s, f)_{dB} - H(\theta_d - \alpha, f)_{dB}$.

Lorsque le diagramme de directivité de la source est connu et à condition d'être en 2D (ou 3D axis-symétrique), il est possible d'estimer le paramètre α à partir duquel les pertes de directivité subies par les trajets pourront être calculées. En 3D, en plus de l'attitude (angle de tangage), l'angle entre le plan source/récepteur et le plan contenant l'axe principal d'émission (lacet, voir figure 2.14) devra également être estimé, ce cas n'a pas été étudié. Dans la suite de ce chapitre, on se placera dans le cas où la fonction h décrivant le diagramme est inconnue.

2.3.3 Directivité inconnue... comment estimer le diagramme de directivité ?

Le diagramme de directivité des sources d'opportunité que nous souhaitons exploiter est inconnu. Les approches envisagées pour contourner ce point dur sont les suivantes :

- utiliser un modèle standard pour approcher le diagramme de directivité de la source. Les paramètres du modèle doivent être estimés en même temps que l'attitude de la source (paragraphe 2.3.3.2) ;
- reconstruire un modèle de diagramme à partir de mesures du diagramme de directivité de la source (paragraphe 2.3.3.1).

2.3.3.1 Modéliser mathématiquement un diagramme mesuré

Dans ce paragraphe, on suppose disposer de mesures du diagramme de directivité de la source. [Abhayapala et al. \(1999\)](#) présente une méthode pour synthétiser une réponse arbitraire de formation

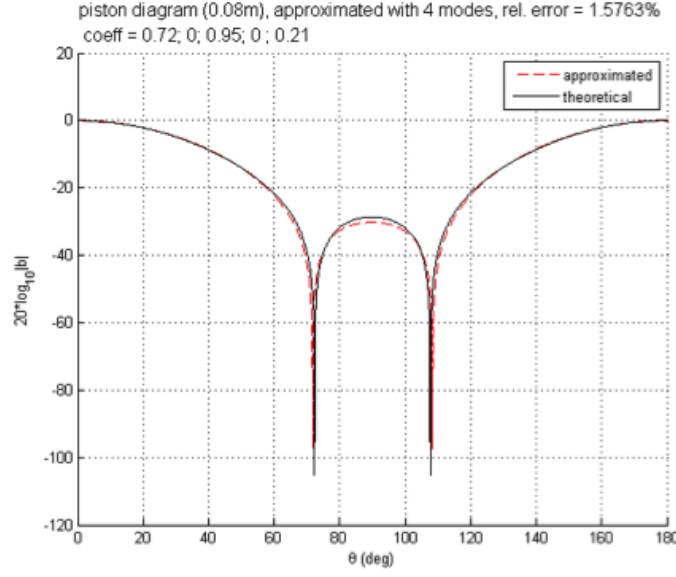


FIGURE 2.17 – Diagramme de directivité d'un piston circulaire de 8 cm de rayon approché par harmoniques sphériques à l'aide de 4 modes (erreur relative inférieure à 2 %)

de voies. La solution générale de l'équation des ondes qui conduit à la formation de voies peut être décomposée en modes. La solution s'exprime alors comme une somme de modes appelée "équation de synthèse" (cf. équation 2.23).

$$b(r, \theta, \phi; k) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \alpha_{nm}(k) h_n^{(1)}(kr) Y_{nm}(\theta, \phi) \quad (2.23)$$

avec $\alpha_{nm}(k)$ un jeu de coefficients modaux dépendants de la fréquence, $k = 2\pi f/c$, $h_n^{(1)}$ la fonction sphérique de première espèce de Hankel, Y_{nm} les harmoniques sphériques basées sur les polynômes de Legendre (cf. équation 2.24).

$$Y_{nm}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \frac{n-|m|!}{n+|m|!}} P_{n,m}(\cos(\theta)) \cdot e^{im\phi} \quad (2.24)$$

L'équation d'analyse (transformée inverse de l'équation de synthèse) permet, quant à elle, d'accéder aux coefficients $\alpha_{nm}(k)$ permettant d'approcher un diagramme observé par une somme d'harmoniques sphériques tel que :

$$\alpha_{nm}(k) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi b_{obs}(\theta, \phi; k) Y_{n',m'}^*(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.25)$$

avec b_{obs} le diagramme mesuré. La figure 2.17 montre la reconstitution d'un diagramme de directivité d'un piston circulaire à l'aide de seulement 4 modes (avec une erreur relative inférieure à 2 %). L'analyse (équation 2.25) a fourni les valeurs des coefficients des modes et la synthèse (équation 2.23) a permis la reconstruction avec ces coefficients. La reconstruction est valable à une fréquence donnée.

On réalise maintenant l'exercice d'analyse et de synthèse sur un diagramme observé à partir des résultats de mesures de [Branstetter et al. \(2012\)](#) (figures 2.19 et 2.18). Ils proposent pour les sifflements de dauphin Tursiops, des mesures de diagrammes de directivité à différentes fréquences. Nous avons

relevé les mesures et avons estimé le diagramme moyen mesuré. La reconstruction se fait dans le plan 2D en considérant une symétrie par rapport à l'axe principal d'émission (0°), les coefficients de l'analyse sont donc uniquement estimés pour l'indice n et l'angle θ à la fréquence de 6.9 kHz. La figure 2.18 présente en noir les données extraites de [Branstetter et al. \(2012\)](#) sur lesquelles est superposé le diagramme reconstitué avec 4 coefficients (en vert) et le diagramme reconstitué avec 10 coefficients à l'aide de l'analyse/synthèse par harmoniques sphériques (équations 2.25/2.23), pour la fréquence 6.7 kHz. La figure 2.19 présente uniquement le diagramme reconstitué avec 10 coefficients sur les données de [Branstetter et al. \(2012\)](#). On peut ainsi voir le positionnement du diagramme dans l'écart type des mesures (lignes fines grises entourant les mesures).

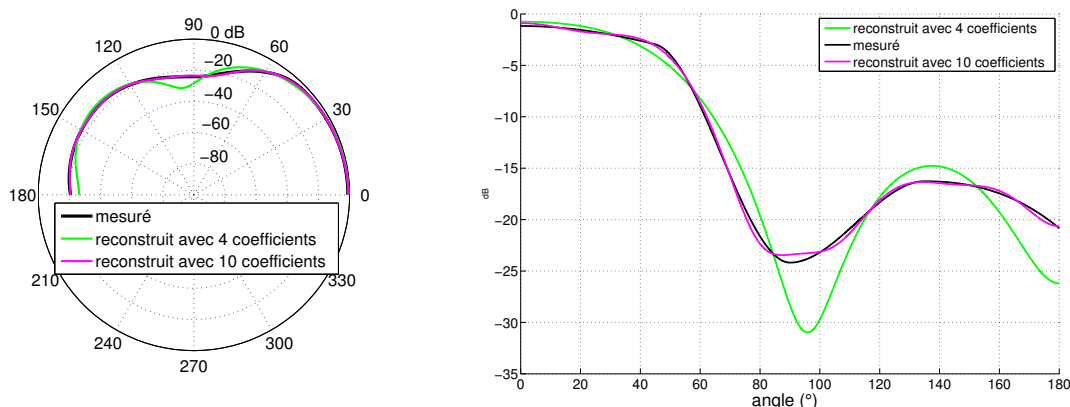


FIGURE 2.18 – Reconstruction du diagramme mesuré par [Branstetter et al. \(2012\)](#) pour un sifflement de dauphin Tursiops à 6.9 kHz (noir : mesure ; vert : reconstituit avec 4 coefficients ; rouge : reconstituit avec 10 coefficients)

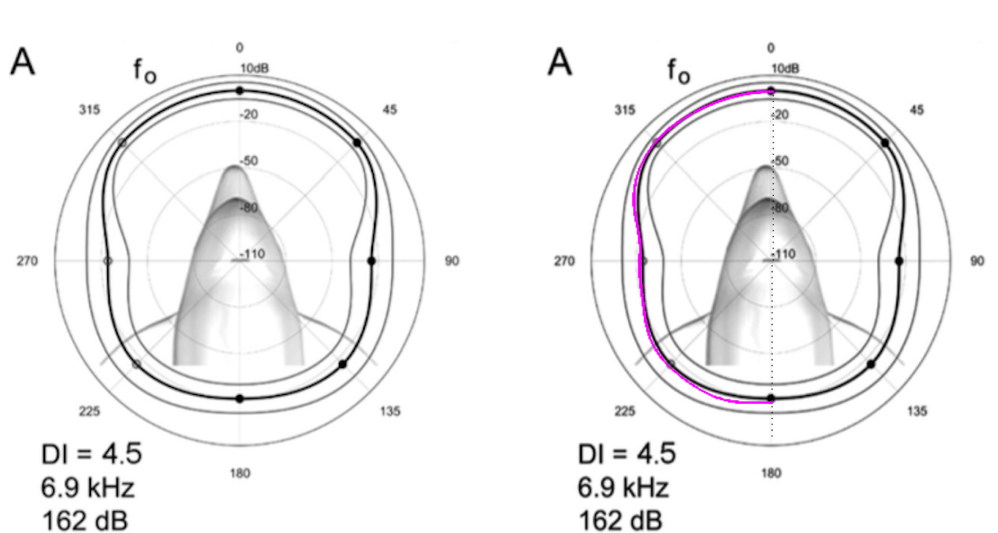


FIGURE 2.19 – A gauche : Illustration adaptée du diagramme de directivité mesuré par [Branstetter et al. \(2012\)](#) sur un sifflement de dauphin Tursiops à 6.9 kHz. A droite : en rose le diagramme reconstitué à cette fréquence avec 10 coefficients $\alpha_n(f = 6.9 \text{ kHz})$

On montre ici qu'il est possible d'obtenir une formule analytique d'un diagramme de directivité à une fréquence donnée à l'aide d'harmoniques sphériques. Le fait que la reconstruction nécessite N

modes signifie qu'il faut "N multiplié par le nombre de fréquences" coefficients pour reconstruire un diagramme sur une bande de fréquences. L'idéal serait de pouvoir estimer les coefficients comme des fonctions simples de la fréquence pour réduire le nombre de paramètres.

2.3.3.2 Approcher le diagramme d'émission par un modèle standard

Lorsqu'on ne dispose pas de mesures du diagramme de directivité, on ne peut pas appliquer la méthode précédente. Une méthode d'accès aux informations de directivité consiste à approcher le diagramme de directivité en émission de la source par un modèle de diagramme de directivité communément admis $h(\theta, f, \vec{\gamma})$ avec $\vec{\gamma}$ le vecteur de paramètres du modèle de directivité, vecteur d'inconnues.

Théorie Sur le même principe que dans le paragraphe 2.3.2, on exploite la différence (dB) entre le spectre du trajet direct et celui du premier réfléchi surface qui sont les 2 seuls trajets de la mesure non impactés par le fond (cf. équation 2.20). Contrairement au cas du paragraphe 2.3.2 dans lequel la fonction h décrivant le diagramme est connue, l'attitude α doit ici être estimée en même temps que le vecteur de paramètres $\vec{\gamma}$. On estime α et $\vec{\gamma}$ en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre la mesure M et le modèle $\hat{M}$.

$$\min_{\alpha, \vec{\gamma}} (\sum |M - \hat{M}|^2) \quad (2.26)$$

Un modèle qui revient souvent dans la littérature et qui est cité notamment par [Au \(1993\)](#) pour les mammifères marins est le piston circulaire. [Au \(1993\)](#) explique que le système d'émission du dauphin peut être modélisé par un piston circulaire avec le même indice de directivité. L'intensité d'émission à travers un piston circulaire, dans la direction θ est telle que :

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cdot h(\theta, f) \\ \text{avec } h(\theta, f) &= \frac{2J_1(2\pi \cdot p \cdot f / c \cdot \sin(\theta))}{2\pi \cdot p \cdot f / c \cdot \sin(\theta)} \end{aligned} \quad (2.27)$$

où I_0 est l'intensité d'une source isotrope, p est le rayon du piston, f la fréquence, c la vitesse du son, θ est l'angle d'émission (0° étant la normale à la surface du piston), J_1 est la fonction de Bessel du premier ordre. Dans le cadre de la minimisation, il s'agit donc de trouver 2 paramètres : l'attitude α et la taille du piston $\vec{\gamma} = p$ qui minimisent 2.26. La transformée de Fourier du modèle du piston $\hat{H}$ est donnée par 2.28.

$$\hat{H}(\theta, f) = \frac{J_1(p \cdot k \cdot \sin(\theta))}{p \cdot k \cdot \sin(\theta)} \quad (2.28)$$

avec $k = 2\pi f / c$.

Nous avons réalisé une analyse de performances du modèle g basé sur le piston en 2D par l'étude des bornes de Cramer-Rao (BCR). Cette étude nous a permis de comprendre les limites de la méthode d'évaluation de la directivité. Les BCR fournissent une estimation des zones de l'espace $[\alpha, p]$ où le problème est mal conditionné. On considère le vecteur de paramètres estimés $\hat{x}_s$ pour le modèle de diagramme $\hat{m}$ et la matrice des covariances $C_{\hat{x}}$ de l'estimation $\hat{x}_s$:

$$\begin{aligned} \hat{x}_s &= \begin{pmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{p} \end{pmatrix} \\ C_{\hat{x}} &= E [(\hat{x} - E(\hat{x})) \cdot (\hat{x} - E(\hat{x}))^t] \end{aligned} \quad (2.29)$$

Pour l'estimation $\hat{x}_s$, la matrice de covariances $C_{\hat{x}}$ est bornée par la matrice d'information de Fisher (cf. équation 2.31).

$$C_{\hat{x}} \geq CR = (I)^{-1} \quad (2.30)$$

Sous l'hypothèse d'un bruit blanc Gaussian (hypothèse valide pour un rapport signal à bruit suffisant), la matrice de Fisher I vaut :

$$I = \frac{1}{\sigma_{meas}^2} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{nm} \left(\frac{\partial g}{\partial x_1} \right)^2 & \sum_{i=1}^{nm} \frac{\partial g}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial g}{\partial x_2} \\ \sum_{i=1}^{nm} \frac{\partial g}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial g}{\partial x_2} & \sum_{i=1}^{nm} \left(\frac{\partial g}{\partial x_2} \right)^2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

avec nm le nombre de mesures, σ_{meas} la variance du bruit de mesure, g le modèle reliant les mesures aux paramètres à estimer : $x_1 = \alpha$, and $x_2 = p$ (2.32). Le nombre de mesures correspond au nombre de fréquences utilisées pour l'optimisation du modèle.

Dans le cas du modèle du piston circulaire, le modèle g est la différence en dB entre les spectres des trajets. Il est donné par 2.32.

$$\begin{aligned} x_1 &= \alpha \\ x_2 &= p \\ g(\alpha, p) &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\left| \frac{J_1(p \cdot k \cdot \sin(-\theta_s - \alpha))}{p \cdot k \cdot \sin(-\theta_s - \alpha)} \right|}{\left| \frac{J_1(p \cdot k \cdot \sin(\theta_d - \alpha))}{p \cdot k \cdot \sin(\theta_d - \alpha)} \right|} \right) \end{aligned} \quad (2.32)$$

D'après 2.30, la théorie de Cramer-Rao permet d'exprimer la borne inférieure de l'erreur commise sur chaque paramètre en utilisant le modèle. Les variances des paramètres recherchés sont bornées par les termes diagonaux de l'inverse de la matrice d'information de Fisher.

$$\begin{aligned} \sigma_{\hat{\alpha}}^2 &\geq CR(1, 1) \\ \sigma_{\hat{p}}^2 &\geq CR(2, 2) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Cependant, la théorie de Cramer-Rao décrite de 2.29 à 2.33 s'applique à un bruit suivant une distribution normale $N(0, \sigma^2)$. Au premier ordre, on utilise l'écart type du niveau de bruit (voir ligne n° 13 du tableau 2.1) pour estimer la variance du bruit de mesure. L'erreur sur les niveaux modifiés par la directivité de la source dépend en effet de la capacité à mesurer ces niveaux dans le bruit ambiant. Dès que le niveau d'un trajet disparaît dans le bruit, on ne peut plus estimer sa valeur. En fait, ce terme σ_{mes} n'étant que multiplicatif, il ne change pas qualitativement l'allure de l'erreur de variance. La figure 2.20 présente les bornes de Cramer-Rao estimée pour un hydrophone à 100 m de profondeur, une source 66 m dans 130 m d'eau et distants de 200 m. Pour cette situation, l'angle d'émission du trajet direct vaut -9.64° et l'angle d'arrivée du trajet surface vaut 39.69° , ils sont indiqués en blanc (ligne et texte) sur la figure 2.20. L'angle médian est également représenté sur l'image de droite de cette figure. L'erreur est calculée pour chaque paramètre et représentée dans le plan 2D avec la taille du piston en abscisses et l'attitude de la source en ordonnées. Les zones rouges sont les zones de l'espace de paramètres (α, p) pour lesquelles l'estimation de l'attitude (respectivement du rayon du piston) est difficile. Les zones bleues sont les zones dans lesquelles le modèle sera performant.

Dans la figure 2.20, on peut identifier les régions de l'espace des paramètres qui correspondent à un mauvais fonctionnement de l'algorithme. Les difficultés sont schématisées dans la figure 2.21. Notamment :

- lorsque l'attitude α est confondue avec la direction d'émission d'un des trajets, alors il devient difficile pour l'algorithme de distinguer la taille de piston optimale. En effet, par construction tous les diagrammes ont la même valeur pour $\theta = 0^\circ$ (figure 2.21 - gauche). Avec un gain de directivité de 1 dans la direction confondue, on ne dispose plus que d'un seul trajet pour estimer l'attitude, ce qui n'est pas suffisant. Mathématiquement, le déterminant de la matrice de Fisher tend vers zéro.

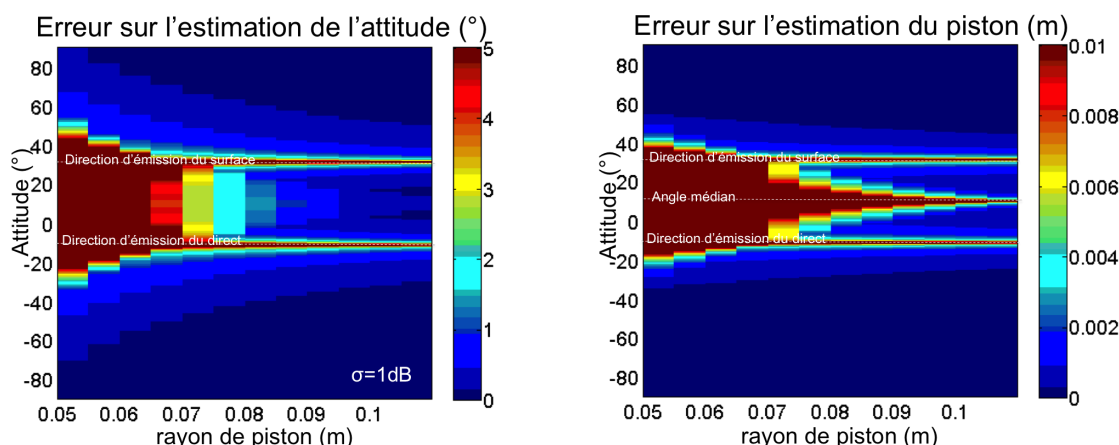


FIGURE 2.20 – Bornes de Cramer-Rao pour l'estimation de l'attitude de la source avec un modèle de piston circulaire (gauche) et pour l'estimation du rayon du piston (droite). La source est à 66 m, l'hydrophone à 100 m de profondeur dans 130 m d'eau. L'hydrophone et la source sont distants de 200 m. Les angles d'émission du direct et du réfléchi surface sont respectivement -9.64° et 39.69° . On voit que les zones de faible performance du modèle (zones rouges) se situent au niveau des angles d'émission des trajets pour l'estimation des deux paramètres (indiquées en blanc sur les deux images) et également au niveau de l'angle médian pour l'estimation du piston (en blanc sur l'image de droite). Les zones bleues sont les zones où le modèle sera performant

- lorsque l'attitude de la source fait un angle médian entre le trajet direct et le trajet réfléchi surface, l'attitude est facile à estimer mais pas la taille du piston en raison de la symétrie des diagrammes de directivité de chaque taille de piston circulaire (figure 2.21 - droite).

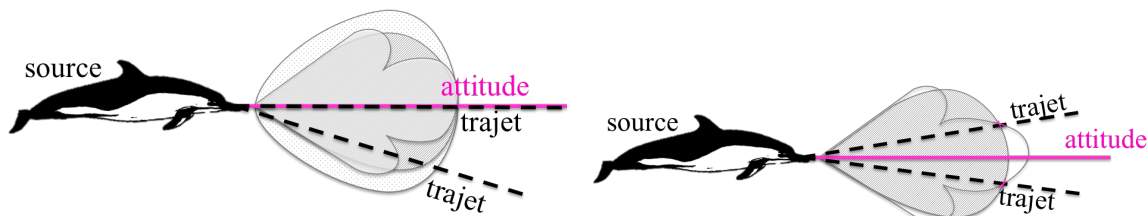


FIGURE 2.21 – A gauche : manque d'information lorsque l'attitude est confondue avec un des trajets. A droite : deux diagrammes de directivité possibles, engendrant la même observation lorsque l'attitude correspond à l'angle médian entre le direct et le réfléchi surface

Une simulation de Monte-Carlo (sur cent réalisations) réalisée pour un piston de 6 cm pour des attitudes variant de -90° à 90° confirme cette étude des bornes de Cramer-Rao. Les résultats sont présentés en figure 2.22⁸ :

- l'estimation des 2 paramètres est plus difficile lorsque l'attitude est confondue avec une des directions des trajets ;
- l'estimation du piston est délicate lorsque l'attitude est confondue avec l'angle milieu entre les trajets direct et surface.

Sur un signal synthétique (image de gauche, figure 2.23), représentatif des sifflements de dauphin que l'on souhaite étudier, on applique l'algorithme de recherche de la taille de piston et l'attitude décrit précédemment. La courbe rouge (image de droite, figure 2.23) représente la mesure (différence

8. Les valeurs des angles diffèrent de l'étude des BCR car la source n'était pas positionnée au même endroit pour cette simulation

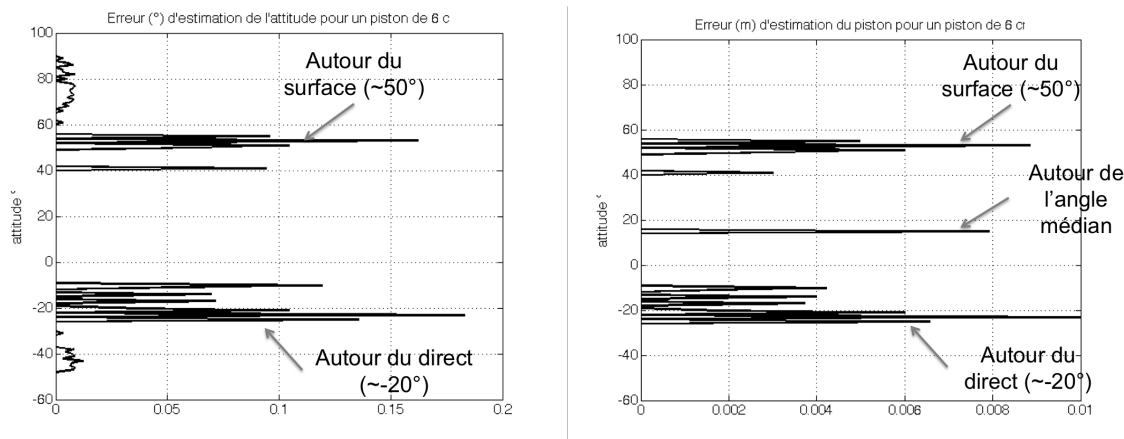


FIGURE 2.22 – Résultats d'une simulation de Monte-Carlo pour l'estimation de l'attitude de la source (gauche) avec un modèle de piston circulaire de 6 cm et pour l'estimation du rayon du piston (droite). La source est à 40 m de profondeur et à 100 m de distance de l'hydrophone, lui-même à 70 m de profondeur. Les angles valent alors respectivement -20° pour l'angle d'émission du direct et 50° pour l'angle d'émission du surface. Ces résultats confirment l'étude des bornes de Cramer-Rao pour l'estimation de l'attitude α et du piston p avec des zones de dysfonctionnement au niveau des angles d'émission des trajets pour l'estimation des deux paramètres et également au niveau de l'angle médian pour l'estimation du piston

entre le spectre du direct et celui du réfléchi surface, voir équation 2.19). La courbe verte représente la différence estimée par l'algorithme. Les paramètres optimaux qui minimisent la différence entre l'observation M et le modèle $\hat{M}$ (voir équation 2.20) sont 62.98° et 18 cm pour une attitude vraie de 63° et un piston de rayon vrai 18 cm. L'algorithme estime avec succès les deux paramètres. On note néanmoins des différences entre la mesure et le modèle sur l'image de droite de la figure 2.23 au niveau des pics (i.e. aux fréquences 12 et 14 kHz). Ces différences proviennent du bruit de mesure (bruit ambiant) mais également du bruit intrinsèque au modèle $\hat{M}$.

Application au cas du dauphin On suppose ici que le diagramme de directivité du sifflement de dauphin peut être approché par le modèle du piston. L'étude précédente a permis d'évaluer la faisabilité d'une estimation conjointe de la taille du piston et de l'attitude de la source, nécessaire pour évaluer les pertes de directivité. Pour cela, la différence entre le spectre du trajet direct et celui du premier réfléchi surface est exploitée en considérant que cette différence observée peut être approchée par la différence des pertes de directivité dans les deux directions.

Nous avons donc calculé les différences entre les niveaux du direct et du premier réfléchi surface pour quelques sifflements de la campagne ERATO 2009 (cf. paragraphe 2.2); un cas est illustré en figure 2.24 à droite. Les différences entre le réfléchi fond et le direct sont également représentées (en bleu : différence direct/surface ; en vert : différence direct/fond). Sur cette même figure, nous présentons à gauche les différences de niveaux sur un signal synthétique représentatif des données ERATO 2009 et pour lequel nous avons utilisé un piston de 8 cm.

La différence d'ordre de grandeur des atténuations entre le modèle et la mesure faussent néanmoins la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (cf. équation 2.26) entre les différences de niveaux mesurées et les différences de niveaux théoriques, rendant impossible l'estimation des paramètres α et p (resp. attitude de la source et rayon du piston). L'estimation du piston et de l'attitude par la méthode décrite précédemment donne donc les mauvais résultats présentés dans la figure 2.25. Le modèle du piston ne représente pas correctement le diagramme de directivité du dauphin, notamment parce qu'il présente des extrema trop prononcés.

Une autre méthode a été envisagée pour extraire α et p des mesures de différences. Les points ca-

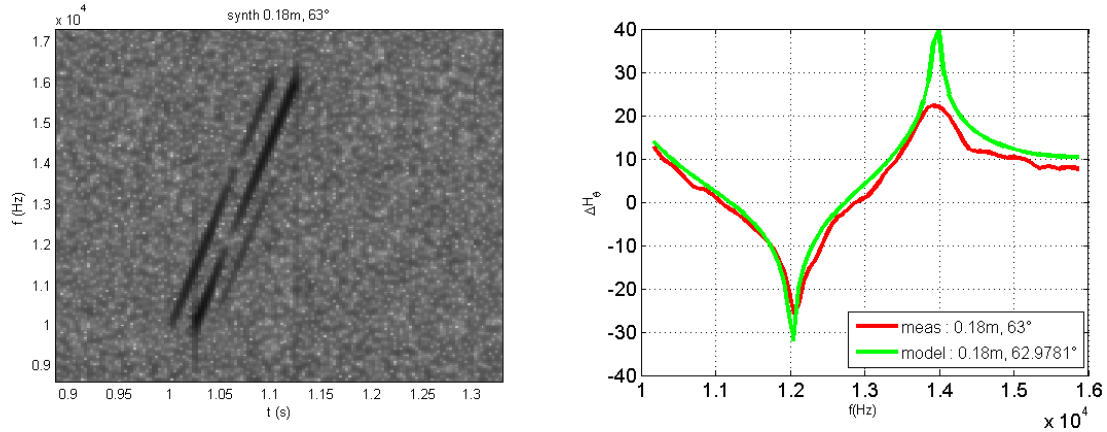


FIGURE 2.23 – A gauche : signal synthétique créé selon les caractéristiques des sifflements de dauphins étudiés dans ERATO 2009 (cf. section 2.2) et avec un diagramme de directivité de piston circulaire de rayon 18 cm. On observe bien des zéros à certaines fréquences, signes de la directivité de la source. A droite : la différence entre le spectre du premier réfléchi surface et le spectre du direct observée (en rouge) et estimée par l'algorithme (en vert). Les paramètres optimaux estimés sont 62.98° et 18 cm pour une attitude vraie de 63° et un piston de rayon vrai 18 cm.

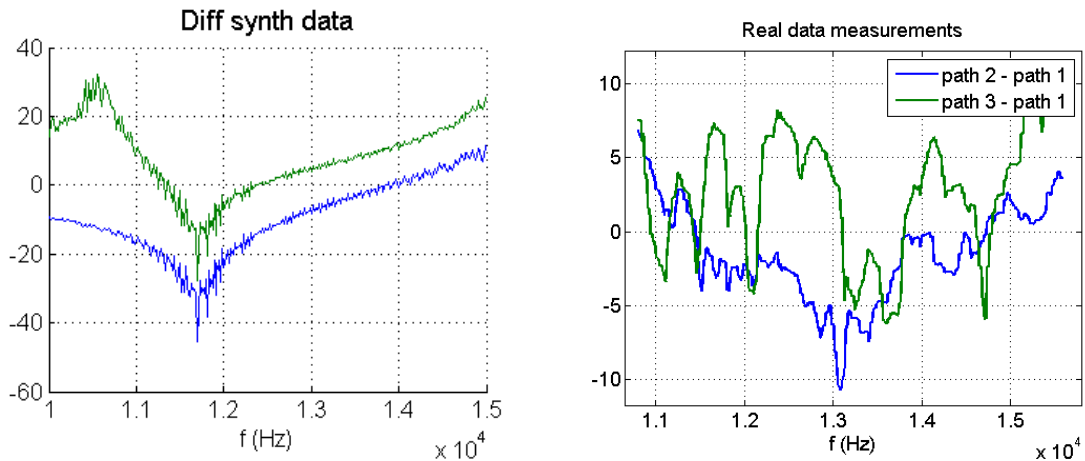


FIGURE 2.24 – Différences entre les spectres du premier réfléchi surface et du trajet direct (bleu) et entre les spectres du premier réfléchi fond et du trajet direct (vert) pour des signaux synthétique (à gauche) et réels (à droite). A droite : le signal réel est une vocalise de la campagne ERATO 2009 dont la source a été localisée. A gauche : le signal synthétique a été réalisé avec les mêmes caractéristiques que le signal réel et avec un diagramme de piston de 8 cm.

caractéristiques de ces courbes (pics) peuvent en effet être mathématiquement reliés aux paramètres α et p . La différence des spectres en dB (surface moins direct) correspond au rapport des spectres en linéaire. Une fréquence correspondant à une chute de la différence illustre donc une perte de directivité importante dans la direction du surface (zéro au numérateur) tandis qu'un pic correspond à une perte de directivité plus importante à cette fréquence dans la direction d'émission du direct (zéro au dénominateur). Les courbes du signal réel (image de droite de la figure 2.24) présentent ce genre de points caractéristiques, points que l'on observe aussi sur les signaux synthétiques de la figure 2.23 et de l'image de gauche de la figure 2.24. Le modèle de mesure basé sur le piston présente en effet des atténuations/pics qui correspondent aux zéros de la fonction de Bessel du premier ordre. Ces zéros

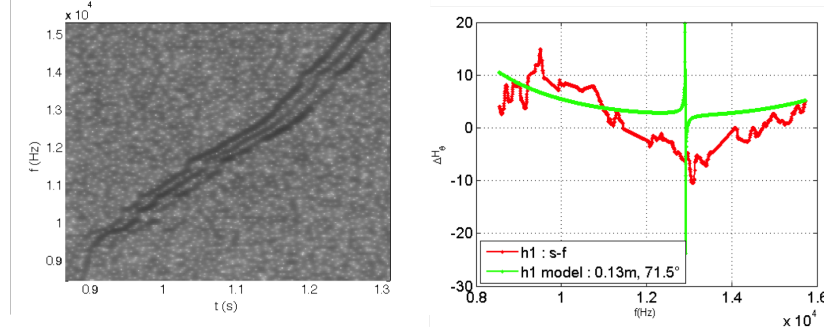


FIGURE 2.25 – Echec de l'estimation de la taille du piston et de l'attitude par la méthode proposée précédemment sur un sifflement de dauphin d'ERATO 2009 (à gauche). Le modèle du piston (différence surface-direct modélisée en vert, et mesurée en rouge, image de droite) ne représente pas correctement le diagramme de directivité du dauphin, notamment parce qu'il présente des extrema trop prononcés

sont connus et pourraient être reliés analytiquement aux paramètres α et p . Dans la pratique, peu de points caractéristiques sont accessibles (c'est le cas du signal réel dont les différences mesurées sont présentées à droite en figure 2.24), et cette méthode s'est avérée peu souvent applicable.

Nous proposons donc plutôt une version atténuée H_a du modèle du piston telle que les pics et creux soient moins prononcés. On pose :

$$H_a(f, \theta) = H(f, \theta) + q(1 - H(f, \theta)) = q + (1 - q).H(f, \theta) \quad (2.34)$$

avec q une constante permettant de faire varier le niveau d'atténuation. La figure 2.26 illustre ce nouveau modèle pour $q = 10^{-2}$ à 11 kHz sur un piston de 25 cm. La version atténuée est tracée en rose et la version non atténuée en bleu. On observe des atténuations bien moins prononcées sur la courbe rose et plus proches de ce qui peut être observé sur les données réelles en présence de bruit.

L'application de ce nouveau modèle sur des vocalises d'ERATO 2009 (mesure en rouge, estimation en vert), présentée en figure 2.27 sur deux exemples, donne des résultats intéressants mais non concluants car les tailles de piston sont très différentes d'un sifflement à l'autre et également très différentes de ce que suggère la littérature avec pour le sifflement A un piston estimé à 18 cm et pour le sifflement B, un piston estimé à 32 cm.

Le modèle du piston circulaire est communément admis pour expliquer le diagramme d'émission du dauphin jusqu'à 20° autour de l'axe principal. [Au \(1993\)](#) fait le choix de ce modèle pour calculer l'indice de directivité mais pas pour expliquer la forme de la fonction de directivité. En plus du caractère peu biologique des zéros de la fonction de Bessel (correspondant aux "trous" dans le diagramme), le modèle piston présente quelques autres limites :

- Il est symétrique entre la gauche et la droite de l'animal, ce qui semble normal, mais il l'est aussi entre l'avant et l'arrière de l'animal ce qui semble peu réaliste. On n'entend pas une personne aussi bien quand on est dans son dos que quand on est face à elle. [Au et al. \(2012\)](#) présentent le diagramme moyen de directivité du clic de dauphin Tursiops dans les plans horizontal et vertical et il y a une claire asymétrie avant/arrière de même qu'une asymétrie haut/bas.
- [Au \(1993\)](#) estime un piston de 4 cm pour les clics de dauphin Tursiops à partir de la mesure de l'indice de directivité. Les sifflements étudiés dans le cadre d'ERATO 2009 (cf. paragraphe 2.2) présentent des marques d'une atténuation différente selon la fréquence et la direction d'émission.
- [Au \(1993\)](#) précise que cette taille de piston varie selon l'espèce. Ne peut-on pas imaginer qu'elle varie également selon l'individu ?
- Enfin, on ne travaille qu'en 2D dans ce paragraphe, la 3D contribue également à l'atténuation.

On voit ainsi que si le modèle choisi n'est pas adapté alors l'estimation des paramètres du modèle n'est pas réalisable à partir des différences entre le spectre du trajet direct et le spectre du réfléchi surface.

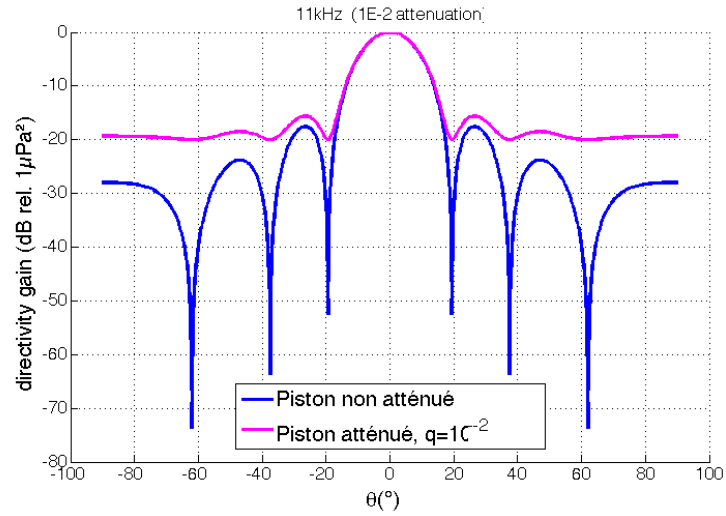


FIGURE 2.26 – Piston de 25 cm classique $H(f = 11 \text{ kHz}, \theta)$ en bleu, et atténué par une constante de 10^{-2} $H_{10^{-2}}(f = 11 \text{ kHz}, \theta)$ en rose (cf. éq. 2.34). Les zéros du diagramme de directivité sont moins prononcés sur le modèle atténué.

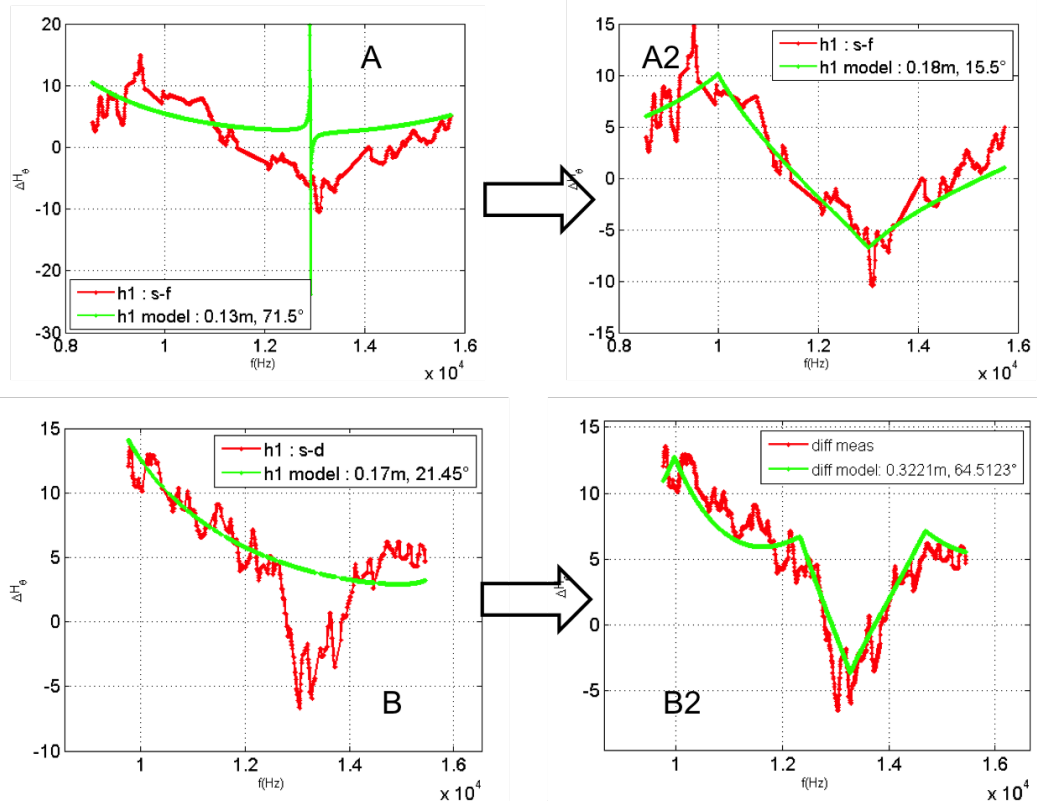


FIGURE 2.27 – A et B : en vert, l'estimation (attitude et taille de piston) réalisée en utilisant le modèle de mesure basé sur le piston classique. Les observations sont en rouge. 2 sifflements réels d'ERATO sont traités : A et B (A étant le sifflement illustré dans 2.25). A2 et B2 : en vert, l'estimation effectuée avec le modèle de mesure basé sur le piston atténué pour les mêmes observations. L'observation pour la vocalise A2 est approchée par un piston, de 18 cm tandis que celle de B2 est approchée par un piston de 32 cm.

2.4 Discussion

Dans ce chapitre, la source candidate à notre schéma d'inversion a été étudiée : rampe de fréquence de dauphin commun. Une centaine de vocalises de la campagne ERATO 2009 a été analysée pour en extraire des informations utiles pour réaliser des signaux synthétiques représentatifs. Cette analyse a également montré que les vocalises étaient bien directives.

Ces propriétés directives en font une source difficile à exploiter tant que le diagramme de directivité ne sera pas connu. Si on suppose le diagramme de directivité connu, alors il est possible d'évaluer les pertes de directivité subies par les trajets et à corriger avant l'exploitation des énergies de ces trajets. Nous avons également montré qu'il était possible de modéliser un diagramme mesuré sur une base d'harmoniques sphériques ou d'approcher le diagramme d'une source par un diagramme théorique standard (ex : le piston circulaire). L'attitude de la source est une inconnue dans tous les cas. Elle peut être estimée à partir de la mesure de la différence entre l'énergie du trajet direct et celle du trajet surface. Si on tente d'approcher le diagramme de directivité du dauphin par le modèle du piston circulaire, alors le rayon du piston doit également être estimé et nous avons étudié dans ce chapitre les conditions limites d'estimation du rayon et de l'attitude à partir de la mesure. Néanmoins, le modèle du piston circulaire ne se révèle pas satisfaisant pour représenter le diagramme de directivité et nous proposons un modèle atténué permettant de mieux représenter les mesures réelles observées.

Lorsque le diagramme de directivité est disponible, nous avons montré que l'exploitation de la différence entre l'énergie du premier réfléchi surface et celle du trajet direct (tous deux non impactés par le fond) permettait l'estimation de l'attitude de la source (angle entre l'axe principale d'émission et l'horizontale). Une fois cet angle estimé, la perte de directivité du trajet fond peut être déduite. L'étape d'estimation du coefficient de réflexion n'a cependant pas été abordée dans ce chapitre puisque l'on considère que la source, étant donnée le niveau de connaissance actuel de son diagramme, n'est pas exploitable par le schéma d'inversion développé dans le cadre de nos travaux. Voici cependant l'étude que nous avons réalisée, dans un cas simple, sur la faisabilité de l'estimation du coefficient de réflexion lorsque le diagramme de directivité est connu.

La première intuition est de corriger chaque trajet des pertes de directivité estimées à partir du modèle de directivité $H_{\vec{\gamma}}$ afin de se retrouver dans la configuration d'une source isotrope et dérouler le reste de la méthode IGA-VMM-BR. Dans le cas d'un modèle paramétré par le vecteur $\vec{\gamma}$ que l'on suppose connu, le spectre du trajet fond corrigé $S_{f,corr}$ peut alors être approché par :

$$S_{f,corr} = S_f / H_{\vec{\gamma}}(\theta_{e,f}) \quad (2.35)$$

avec S_f le spectre du trajet fond corrigé des pertes de transmission, $H_{\vec{\gamma}}$ le diagramme de directivité estimé et $\theta_{e,f}$ l'angle d'émission du trajet fond. On voit que si, comme dans le cas étudié du piston circulaire non atténué (voir chapitre 2), H exagère les atténuations à certaines fréquences alors le risque est de sur-corriger. Nous avons fait l'essai sur des données synthétiques pour un canal de Pékéris de vitesse de compression 1850 m/s et de densité 1.9 kg/m³ avec un modèle de directivité de piston circulaire de diamètre 20 cm. Pour une collection de signaux synthétiques propagés dans ce milieu (avec bruit), on corrige les trajets des pertes de directivité à partir du modèle de directivité puis on estime le coefficient de réflexion local conformément à la méthode IGA-VMM-BR (rapport des énergies du réfléchi fond sur le direct). La figure 2.28 montre en noir la courbe théorique du coefficient de réflexion, en bleu la courbe obtenue si on considère la source isotrope - cette courbe est bien en dessous de 1 - et en rouge la courbe obtenue après correction des pertes de directivité selon le modèle - bien au-dessus de la valeur limite de 1. La surcorrection des énergies des trajets impacte en effet directement l'estimation du coefficient de réflexion.

Pour éviter ces erreurs, nous avons eu l'idée d'exploiter l'information en fréquence contenue dans les spectres. En effet, le diagramme de directivité dépend de l'angle d'émission du trajet mais également de la fréquence. Seules certaines fréquences sont "effacées" dans les directions d'émission des trajets. Pour un fond de type Pékéris, le coefficient de réflexion ne dépend pas de la fréquence. On trace donc, en fonction de la fréquence, la différence modélisée entre la directivité du premier réfléchi fond et celle du trajet direct ($H_d - H_f$) et cette même différence observée ($S_d - S_f$). L'écart entre le modèle et la mesure correspond au coefficient de réflexion non pris en compte dans le modèle. Le modèle de mesure a en effet été construit à partir de la différence entre les trajets surface et direct, non modifiés par le fond. Les pertes de transmission ont été préalablement corrigées et seules les pertes de directivité

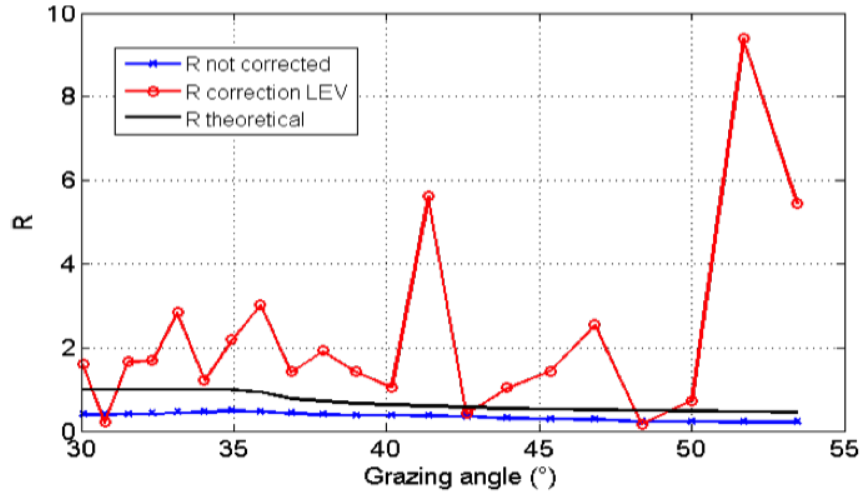


FIGURE 2.28 – Pour un canal de Pékéris de vitesse de compression 1850 m/s et de densité 1.9 kg/m³, on estime le coefficient de réflexion à partir d’une collection de signaux synthétiques traités par la méthode IGA-VMM-BR : en noir la courbe théorique du coefficient de réflexion, en bleu la courbe obtenue si on considère la source isotrope - cette courbe est bien en dessous de 1 - et en rouge la courbe obtenue après correction des pertes de directivité selon le modèle. Le modèle est un piston circulaire de diamètre 20 cm. La surcorrection des énergies des trajets impacte directement l’estimation du coefficient de réflexion.

sont prises en compte puisque initialement, ce modèle ne concerne que les trajets surface et direct non impactés par le fond.

Le maximum de la distribution en fréquences des valeurs de cette différence (différence entre la différence mesurée et la différence modélisée fond moins direct) nous sert d’estimateur $\hat{R}$ du coefficient de réflexion local pour le signal synthétique i traité :

$$\hat{R}(\theta_{f,i}) = \max(X[(S_d - S_f) - (H_d - H_s)]) \quad (2.36)$$

avec H le modèle de directivité de la source, S le spectre. L’index d désigne le trajet direct, l’index f désigne le trajet fond. Sur la figure 2.29 dans l’image de gauche, la différence modélisée surface vs. direct est tracée en cyan, la différence modélisée direct vs. fond est tracée en vert clair. Les différences mesurées sont en bleu foncé (surface vs. direct) et en vert foncé (direct vs. fond). Par construction, la différence modélisée direct vs. fond ne prend pas en compte la contribution du fond dans l’atténuation si bien que l’écart entre modèles et mesures fournit la valeur de R . A droite est représentée la différence entre la différence modélisée et la différence mesurée pour les trajet fond et direct. Le bruit de mesure perturbe cette différence de différences (par exemple autour de 11 kHz) mais le coefficient de réflexion ressort tout de même comme le maximum de la distribution de cette courbe.

Chaque signal de la collection de signaux synthétiques est traité ainsi (localisation, correction des pertes de transmission, estimation des paramètres du modèle de directivité, estimation de $\hat{R}(\theta)$). La courbe du coefficient de réflexion ainsi estimée est présentée en figure 2.30 en bleu (carrés). La courbe noire est la courbe théorique ; la courbe rouge rappelle la courbe obtenue sans correction des pertes de directivité. Cette méthode d’estimation du coefficient de réflexion avec prise en compte de la directivité de la source est efficace et donne des résultats encourageants sur données synthétiques dans le cas d’un canal de Pékéris.

Ces tests sur données synthétiques ont été présentés à l’occasion de la conférence *Underwater Acoustic Conference 2014* (Barazzutti et al., 2014). Ils sont encourageants pour l’exploitation de sources directives en inversion géoacoustique passive.

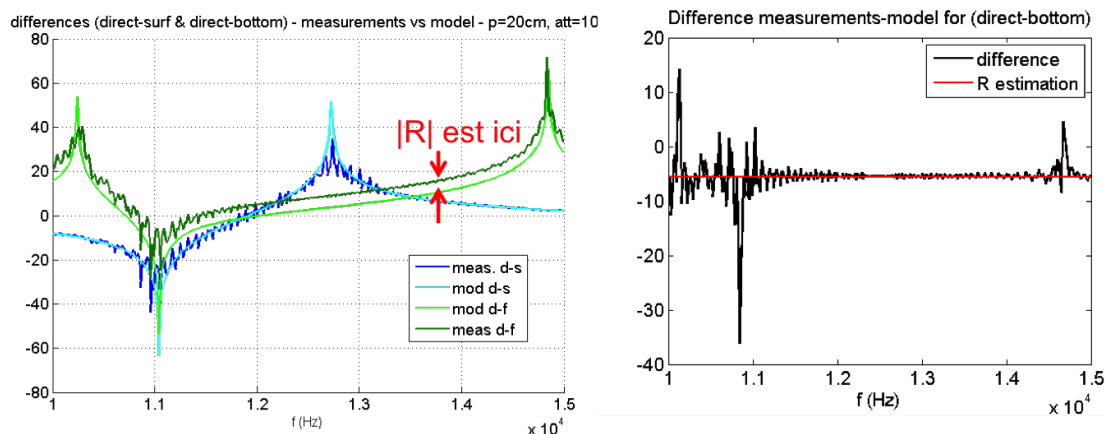


FIGURE 2.29 – A gauche : la différence modélisée surface vs. direct est tracée en cyan, la différence modélisée direct vs. fond est tracée en vert clair. Elles sont basées sur le modèle du piston circulaire pour un rayon de 20 cm. Les différences mesurées (différences de spectre) sont en bleu foncé (surface vs. direct) et en vert foncé (direct vs. fond). Par construction, la différence modélisée direct vs. fond ne prend pas en compte la contribution du fond dans l'atténuation si bien que l'écart entre modèles et mesures fournit la valeur de R . A droite est représentée l'écart entre la différence modélisée et la différence mesurée pour les trajet fond et direct. Le bruit de mesure perturbe cet écart mais le coefficient de réflexion ressort tout de même comme le maximum de la distribution de cette courbe, indiqué par la ligne rouge.

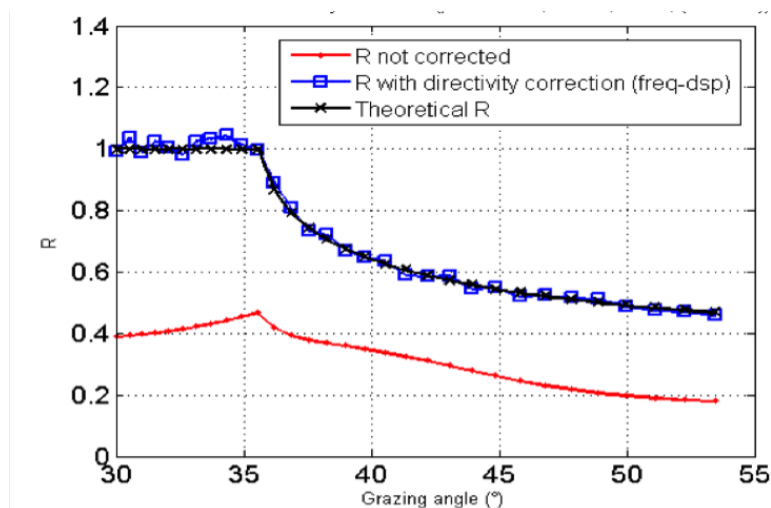


FIGURE 2.30 – Pour un canal de Pékéris de vitesse de compression 1850 m/s et de densité 1.9 kg/m^3 , on estime le coefficient de réflexion à partir du maximum de la distribution en fréquences de la différence entre mesure et modèle pour la différence fond moins direct. La courbe théorique du coefficient de réflexion est représentée en noir, la courbe obtenue en considérant la source comme isotrope est tracée en rouge - cette courbe est bien en dessous de 1. Le coefficient de réflexion (carrés bleus) est bien estimé par cette méthode.

SYNTHESE

Dans ce chapitre, la méthode d'inversion géoacoustique passive, dite IGA-VMM-BR, est décrite et positionnée dans l'état de l'art des méthodes passives. La méthode consiste à traiter une par une des modulations de fréquence présentant une propagation multitrajets ; les trois premiers trajets doivent être accessibles pour localiser la source. La signature temps-fréquence du signal permet d'estimer la réponse impulsionnelle du canal. Les différences de temps d'arrivée et amplitudes des trajets, obtenus grâce à cette RI, sont exploitées pour extraire une valeur du coefficient de réflexion fonction de l'angle de rasance du trajet réfléchi fond du signal traité. Le traitement d'une collection de signaux permet ainsi d'obtenir une courbe du coefficient de réflexion en fonction de la rasance. Une base de données de signaux candidats à l'inversion (des rampes de fréquence hautes fréquences émises par des dauphins communs) a été analysée pour extraire les principales caractéristiques de ces signaux ; ces caractéristiques seront réutilisées pour réaliser des signaux synthétiques représentatifs tout au long des travaux de cette thèse.

La méthode IGA-VMM-BR a été appliquée à cent vocalises de ce jeu de données mais la courbe de coefficient de réflexion mesurée n'est pas physique. Ces signaux sont en effet directifs et les pertes de directivité qui entachent les trajets dans leur direction d'émission doivent être corrigées. Nous avons illustré la directivité des sifflements de dauphins, source privilégiée pour notre méthode d'inversion. La directivité est une thématique qui intéresse les biologistes pour la compréhension des mécanismes de communication et d'écholocation. Nous avons montré qu'elle devait également être prise en compte dans le cadre de l'inversion géoacoustique passive à partir de signaux de mammifères marins car elle impacte les trajets différemment selon leur direction d'émission. Le mécanisme de prise en compte a été détaillé dans ce chapitre dans le cas d'une fonction de directivité maîtrisée. Nous avons également proposé des pistes pour l'estimation des pertes de directivité de ces sources selon la connaissance a priori de la fonction de directivité de la source. Lorsque des mesures de diagramme de directivité sont disponibles, il est possible de reconstruire un diagramme mesuré à partir d'harmoniques sphériques. Lorsqu'aucune information sur la directivité n'est accessible, il a été envisagée d'estimer les paramètres d'un modèle de directivité imposé pour la source.

Pour la source que nous privilégions (modulations de fréquence de dauphins), le modèle communément admis du piston circulaire est mis en défaut par les études récentes, ce que nous confirmons par les travaux présentés dans ce chapitre. Nous ne pouvons donc pas appliquer notre méthode d'inversion géoacoustique passive sur des signaux émis par des sources directives. Une étape de correction des pertes de directivité est en effet nécessaire préalablement à l'utilisation des énergies des trajets pour l'estimation du coefficient de réflexion. Le verrou technique lié à cette problématique n'a pas été levé. Néanmoins, des moyens ont été décrits pour permettre d'appliquer le nouveau schéma d'inversion proposé, dès lors que le diagramme de directivité de la source est disponible.

TRANSITION

Dans la suite du manuscrit, nous concentrons les travaux sur des émissions de sources omnidirectionnelles. Les caractéristiques des signaux utilisés sont représentatives des vocalises de dauphin, hors directivité. La directivité sera à nouveau abordée dans les perspectives (cf. chapitre 6). Le chapitre suivant (3) montre l'application de la méthode IGA-VMM-BR sur des données synthétiques puis sur un jeu d'émissions contrôlées en environnement réel (Golfe du Lion).

Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - propagation multitrajet résolue

Sommaire

3.1	Déclinaison des outils pour des sources omnidirectionnelles avec propagation multitrajets résolue dans le spectrogramme - méthode IGA-VMM-BR	74
3.1.1	Hypothèses de travail	74
3.1.2	Rappel de la méthode et des outils	74
3.2	Démonstration du schéma d'inversion sur données synthétiques . . .	76
3.2.1	Configuration des simulations	76
3.2.2	Résultats obtenus et discussion	78
3.3	Etude de performances	79
3.3.1	Performances de la méthode IGA-VMM-BR sur la localisation	79
3.3.2	Performances de la méthode IGA-VMM-BR sur l'inversion	80
3.4	Application du schéma d'inversion sur des émissions contrôlées en environnement réel	83
3.4.1	Matériel et méthode - campagne ERATO 2011	83
3.4.2	Résultats sur la phase n° 8 - Scénario AMELOCHE	84
3.4.3	Analyse des résultats	86
3.5	Discussion	90

Ce chapitre présente l'application et les performances de la méthode IGA-VMM-BR d'inversion géoacoustique passive mono-capteur sur des données synthétiques puis sur des émissions contrôlées d'une source omnidirectionnelle déployée lors d'une campagne de mesures dans le Golfe du Lion. Nous rappellerons tout d'abord les hypothèses et les outils dans la section 3.1. La démonstration de faisabilité est réalisée sur des données synthétiques représentatives des signaux réels dans la section 3.2. Nous étudions ensuite les performances de cette méthode (section 3.3), prédictions de performances qui seront confortées par l'application de la méthode sur les émissions contrôlées en environnement réel (section 3.4).

3.1 Déclinaison des outils pour des sources omnidirectionnelles avec propagation multitrajets résolue dans le spectrogramme - méthode IGA-VMM-BR

3.1.1 Hypothèses de travail

Dans ce chapitre, nous nous plaçons dans les mêmes conditions que pour le chapitre précédent, pour rester proche du cas des signaux que l'on souhaite utiliser à termes (vocalises hautes fréquences de dauphin). Nous les rappelons ici :

Les mesures sont donc supposées être faites en milieu petits fonds (< 200 m). Nous supposons que le signal est une modulation de fréquence. Nous supposons que les conditions de propagation fournissent des trajets mesurables à la réception par les outils mis en œuvre dans la méthode IGA-VMM-BR (cf. section 2.1.2). La méthode étant basée sur la propagation multitrajets, cette condition est incontournable. Les outils mis en œuvre dans cette déclinaison de la méthode doivent permettre de distinguer les trois premiers trajets. Nous considérons un fond plat, ce qui est le cas des zones d'étude des données ERATO 2009 (campagne avec enregistrement de signaux de dauphins) et ERATO 2011 (campagne d'émissions contrôlées). La célérité est supposée constante en distance et en profondeur à l'échelle des distances considérées. Ces deux dernières hypothèses nous permettent de disposer de relations analytiques entre les temps d'arrivée et les caractéristiques des trajets (longueurs, angles, etc.). On néglige les effets de la surface de l'eau sur la propagation et on considère que le signal subit une simple inversion de phase à l'interface eau/air. Enfin, un seul capteur est utilisé afin de respecter les contraintes de coûts et de discrétion.

De plus, l'analyse de la campagne ERATO 2009 (paragraphe 2.2) a montré que seuls 3 trajets sont mesurables sur les vocalises de dauphins. Nous considérons donc en première approximation que la propagation se fait le long de lignes droites et suivant trois trajets uniquement (figure 3.1) : le direct, le premier réfléchi fond et le premier réfléchi surface. Cela va impacter la localisation de la source car trois trajets (donc deux différences de temps d'arrivée) ne permettent pas de lever l'ambiguïté sur l'identité des trajets.

En considérant la surface de l'eau comme plane, le signal subit une inversion de phase à l'interface eau/air - autrement dit le coefficient de réflexion subit par le premier réfléchi surface à l'interface eau/air vaut -1. Si le premier réfléchi fond rencontre le fond avec un angle de rasance θ alors il est réfléchi avec le coefficient $R(\theta)$. Pour des distances de l'ordre de la hauteur d'eau, on considère des pertes de transmission sphériques (en $1/R$ en pression, R la distance).

3.1.2 Rappel de la méthode et des outils

Dans les hypothèses présentées précédemment (paragraphe 3.1.1) et pour une source omnidirectionnelle, la mesure de pression $m(t)$ (cf. équation 2.2) pour une source omnidirectionnelle peut donc être approchée à partir des 3 premiers trajets par :

$$m(t) = \frac{1}{L_d} e(t - L_d/c) - \frac{1}{L_s} e(t - L_s/c) + \frac{1}{L_f} R(\theta) e(t - L_f/c) + b(t) \quad (3.1)$$

où L_d , L_s et L_f sont respectivement les longueurs du trajet direct, réfléchi surface et réfléchi fond, c est la célérité du son dans l'eau (supposée uniforme), θ est la rasance du réfléchi fond, $R(\theta)$ est le coefficient de réflexion, $e(t)$ est le signal émis, $b(t)$ est le bruit. La figure 3.1 illustre le contexte des mesures.

Le détail des outils mis en œuvre se trouve dans la section 2.1.2. On rappelle brièvement la méthode pour la situation considérée dans ce chapitre :

- (RTF) A partir de la mesure (équation 3.1), nous construisons sa représentation temps-fréquence qui illustre l'existence des trajets ;

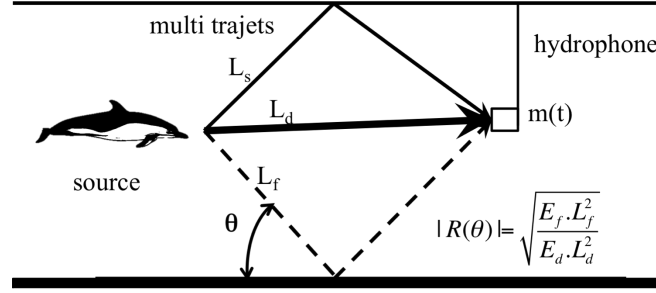


FIGURE 3.1 – En première approximation, la propagation se fait le long de lignes droites et suivant trois trajets : le direct, le premier réfléchi fond et le premier réfléchi surface. E_d (resp. E_f) est le niveau en μPa^2 du trajet direct (resp. fond) intégré sur la bande de fréquences du signal

- (Tracking) Pour obtenir la piste du signal étudié, un outil de tracking temps-fréquence est appliqué sur la représentation temps-fréquence à partir d'une sélection manuelle des points caractéristiques de la piste ;
- (RI) L'intensité est intégrée le long de cette piste temps-fréquence sur une fenêtre temporelle glissante (eq. 2.5) pour estimer la réponse impulsionnelle du canal. Cette réponse impulsionnelle permet l'extraction des observables nécessaires à l'algorithme. Sous les hypothèses prises dans ce chapitre, il s'agit des temps d'arrivée relatifs des échos direct ($\tau_d = L_d/c$), réfléchi fond ($\tau_f = L_f/c$) et réfléchi surface ($\tau_s = L_s/c$) et de l'énergie de chaque écho (direct E_d , réfléchi fond E_f , réfléchi surface E_s) ;
- (Localisation) A partir des différences de temps d'arrivée, la source est localisée en appliquant la méthode décrite dans [Aubauer et al. \(2000\)](#) ;
- (TL correction) Connaissant la position de la source, les longueurs des trajets acoustiques L_d , L_f et L_s ainsi que l'angle de rasance θ peuvent être calculés par des critères géométriques simples ([Aubauer et al., 2000](#)). L'énergie des trajets est ensuite corrigée des pertes de transmission ;
- ($R(\theta)$) Le module du coefficient de réflexion est enfin estimé en calculant la racine carré du rapport entre l'énergie du réfléchi fond et l'énergie du trajet direct, toutes deux corrigées des pertes de transmission ;
- Chaque signal traité fournit un couple $[\theta, R(\theta)]$ (rasance θ , coefficient de réflexion R). Le traitement d'une collection de signaux permet de construire une courbe du coefficient de réflexion qui alimente l'algorithme d'inversion ;
- Une structure sédimentaire est choisie (nombre de couches, fluide ou élastique) et paramétrée par le vecteur de propriétés $\vec{\alpha}$. Les paramètres du modèle géoacoustique sont ensuite estimés par minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre le coefficient de réflexion modélisé et le coefficient de réflexion mesuré ;
- La recherche de l'optimum $\vec{\alpha}_{opt}$ est effectuée par l'algorithme Levenberg-Marquard dans le cas d'un minimum global et par algorithme génétique dans le cas de l'existence de plusieurs minima secondaires.

Le synoptique 3.2 présente l'enchaînement des traitements de l'étape 1.

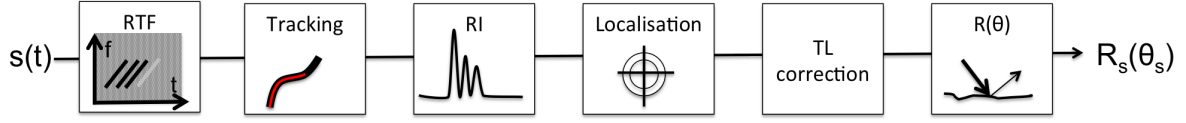


FIGURE 3.2 – Phases du traitement individuel du signal mises en œuvre pour des sources omnidirectionnelles dans le cas de multitraj ts r s l s dans le spectrogramme



FIGURE 3.3 – Configuration des signaux synthétiques. La source est   35 m de profondeur, l'hydrophone à 70 m de profondeur dans 130 m d'eau. La distance source/récepteur varie de 20 m   250 m avec un signal synthétique créé tous les 10 m

3.2 Démonstration du schéma d'inversion sur données synthétiques

3.2.1 Configuration des simulations

Nous appliquons la méthode décrite dans le paragraphe 3.1 à des signaux synthétiques respectant les caractéristiques des sifflements de dauphin étudiés dans le chapitre 2 (voir tableau 2.1), c'est à dire des rampes de fréquence de pente 20 kHz/s centrées autour de 11 kHz. Les signaux simulés représentent une source à 35 m de profondeur se dirigeant vers un hydrophone à 70 m de profondeur dans 130 m d'eau (voir figures 3.3 et 3.4) de 20 m   250 m de distance source/récepteur, tous les 10 m. A noter que l'on a fait le choix de l'hypothèse 1 (le 2  me arrivé est le premier réfléchi surface) en prenant une source à 35 m. Le premier milieu simulé est un canal de Pékéris constitué d'un sédiment de vitesse de compression 1836 m/s (densité 2 kg/m  ). Le second milieu est plus absorbant avec une vitesse de compression de 1650 m/s (densité de 1.8 kg/m  ). le bruit ambiant est représentatif du bruit durant la campagne ERATO 2009.

La figure 3.4 illustre les étapes de traitements du signal individuel. On sélectionne la piste temps-fréquence de la vocalise, on calcule la réponse impulsionnelle à partir de cette signature. Les temps d'arrivée sont identifiés sur la RI.

Le rapport entre les niveaux du trajet fond et du trajet direct, corrigés des pertes de transmission, permet une estimation du coefficient de réflexion local   l'angle de rasance θ du réfléchi fond :

$$|R(\theta)| = \sqrt{\frac{E_f \cdot L_f^2}{E_d \cdot L_d^2}} \quad (3.2)$$

On répète ce traitement sur l'ensemble des signaux synthétiques pour obtenir une courbe du coefficient de réflexion mesuré en fonction de la rasance.

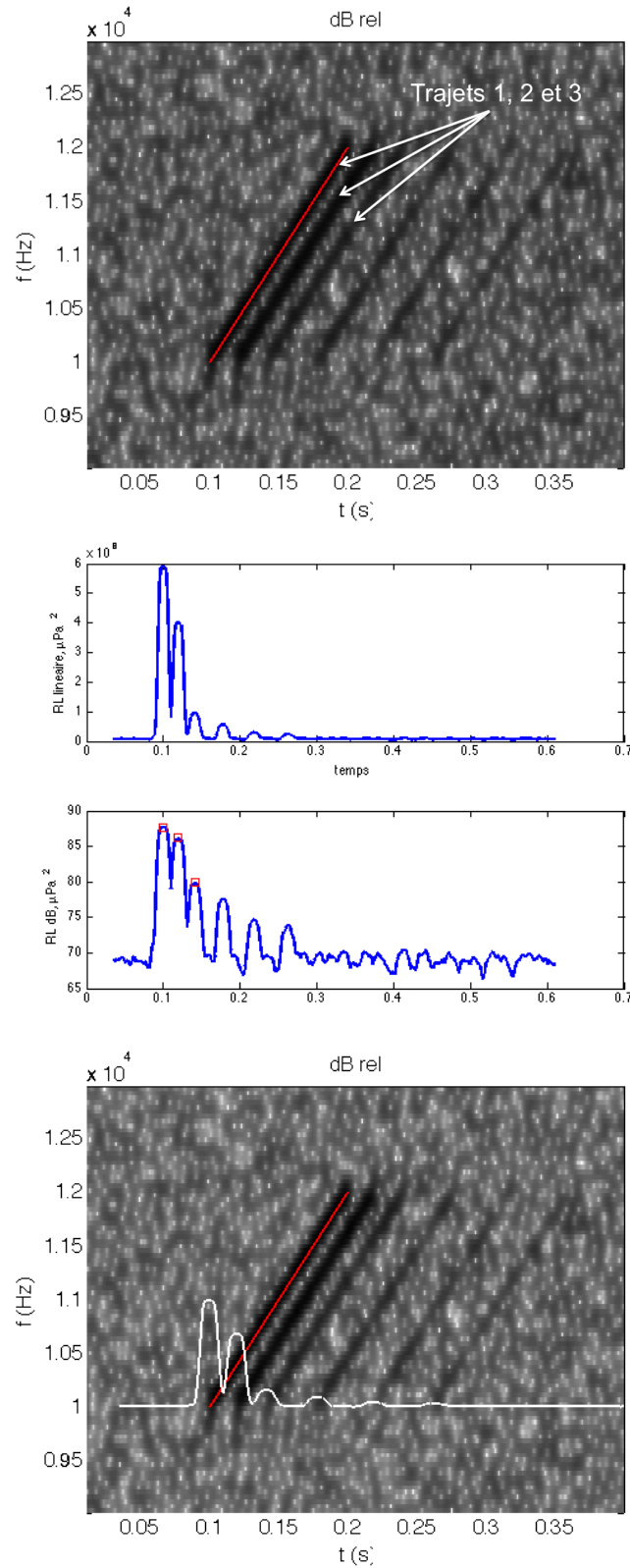


FIGURE 3.4 – Signal synthétique à 150 m. En haut : le spectrogramme du signal avec la piste sélectionnée en rouge. Au milieu : la RI en linéaire et en dB rel. $1\mu\text{Pa}^2$ avec les 3 premiers trajets sélectionnés (carrés rouges). En bas : la RI en blanc représentée sur le spectrogramme du signal

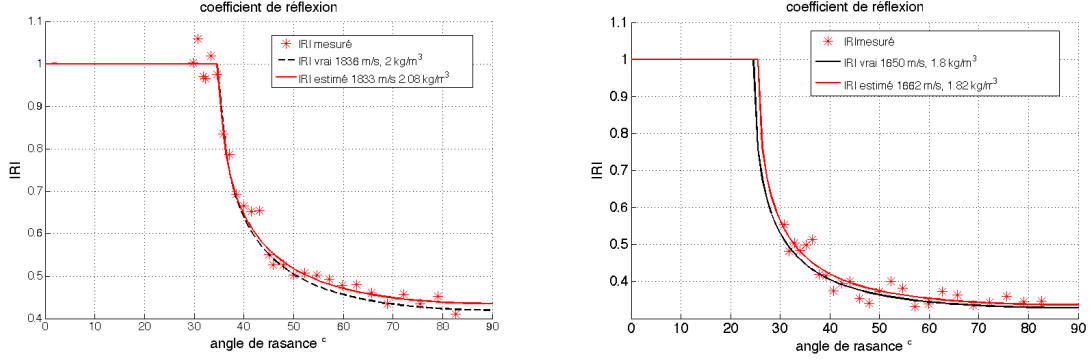


FIGURE 3.5 – Résultat de l’inversion des deux fonds simulés avec le module du coefficient de réflexion vrai (noir pointillé), mesuré (étoiles rouges) et estimés (rouge trait plein). A gauche : le fond le plus réfléchissant avec un angle critique de 35° . La vitesse de compression est estimée à 1833 m/s contre 1836 m/s, la densité à 2.08 kg/m^3 contre 2 kg/m^3 . A droite : le fond le plus absorbant avec un angle critique de 25° . La vitesse de compression est estimée à 1662 m/s contre 1650 m/s, la densité à 1.8 kg/m^3 contre 1.8 kg/m^3 .

3.2.2 Résultats obtenus et discussion

Les courbes des coefficients de réflexion estimés sont présentées en figure 3.5. Les valeurs mesurées du coefficient de réflexion sont indiquées par les étoiles ; les lignes continues sont les coefficients théoriques. La vitesse de compression et la densité dans le sédiment sont estimées par une méthode d’optimisation de type Levenberg-Marquard. La célérité est explorée entre 1500 et 3000 m/s et la densité entre 1.5 et 3 kg/m^3 .

On remarque que l’estimation du fond le plus absorbant est moins bonne. La portée de 250 m ne suffit en effet pas à couvrir l’angle critique de ce fond. Le fond moins absorbant (1836 m/s) est quant à lui bien décrit autour de l’angle critique. Dans un canal isocèle avec un fond horizontal (bathymétrie plate), la relation 3.3 relie l’angle minimal accessible et la géométrie source/récepteur.

$$\theta_{lim} = \text{atan}\left(\frac{2 \cdot h - z_s - z_h}{r_m}\right) \quad (3.3)$$

avec h la hauteur d’eau, z_s (resp. z_h) la profondeur de la source (de l’hydrophone) et r_m la distance associée à la mesure de cet angle limite. Dans la configuration des simulations, un angle limite de 20° nécessite une portée d’au moins 426 m. A l’inverse, pour obtenir les angles grands de rasance avec uniquement le premier réfléchi fond (pas de trajet d’ordre supérieur disponible), il faudra pouvoir exploiter des sources proches de l’hydrophone.

Certains fonds seront plus difficiles à estimer, notamment les plus absorbants qui présentent un angle critique faible et les fonds complexes qui présentent des allures de courbes de coefficient de réflexion particulières aux grands angles (ex : présence de cisaillement dans le socle).

Ces simulations montrent cependant qu’il est possible de remonter aux propriétés du fond à partir de plusieurs rampes de fréquence enregistrées sur un unique capteur et présentant au moins trois trajets résolus dans le spectrogramme, pour le cas simple d’un canal de Pékéris. Nous allons maintenant présenter l’étude de performances de la méthode que nous avons réalisée. Nous avons choisi un modèle de fond plus complexe que le canal de Pékéris pour être plus représentatif de l’application sur les émissions contrôlées dans le Golfe du Lion et ainsi soutenir l’analyse des résultats. Cette application sur données réelles contrôlées sera présentée dans le paragraphe suivant celui de l’étude de performances (§3.4).

3.3 Etude de performances

3.3.1 Performances de la méthode IGA-VMM-BR sur la localisation

La localisation de la source est réalisée à partir des différences de temps d'arrivée mesurées sur la RI. Les performances de localisation dépendent de la résolution de la RI.

La résolution de la RI est directement liée aux paramètres de la représentation du spectrogramme utilisé, i.e. la taille de la fenêtre de la FFT et le taux de recouvrement ainsi qu'à la pente du signal étudié. Le principe d'incertitude permet d'écrire la résolution temporelle minimale (formule de Storey) : $\Delta t_{sp} \geq l_{fft}/(2.f_e)$, pour une longueur de la fenêtre FFT l_{fft} . Ainsi, pour un réglage adapté à la pente α du signal traité, le principe d'incertitude permet d'écrire la résolution temporelle en fonction de cette pente :

$$\Delta t_{sp} \geq \sqrt{1/(2\alpha)} \quad (3.4)$$

Pour des sifflements de dauphin de pente 20 kHz/s (cf. tableau 2.1), la résolution temporelle est estimée à 0,005 s.

Cette résolution impacte la portée de localisation de la méthode. Sur une configuration proche de celle de l'expérimentation ERATO 2011 (cf. paragraphe 3.4), les zones aveugles de la méthode peuvent être anticipées, c'est-à-dire les positions de sources qui ne pourront pas être localisées par la méthode en raison de trajets trop proches. Pour cela, on calcule les deux premières différences de temps d'arrivée théoriques pour une source dans le plan distance/profondeur, connaissant la position de l'hydrophone et la hauteur d'eau. On seuille ensuite selon la résolution temporelle minimale imposée par le spectrogramme (calculée précédemment). Si une des différences de temps est inférieure à cette limite alors la source correspondante n'est pas considérée comme exploitable par la méthode (zone noire dans la figure 3.6) ; dans le cas contraire, elle l'est (zone blanche dans la figure 3.6).

Performances de la méthode pour la localisation à partir du traitement du spectrogramme

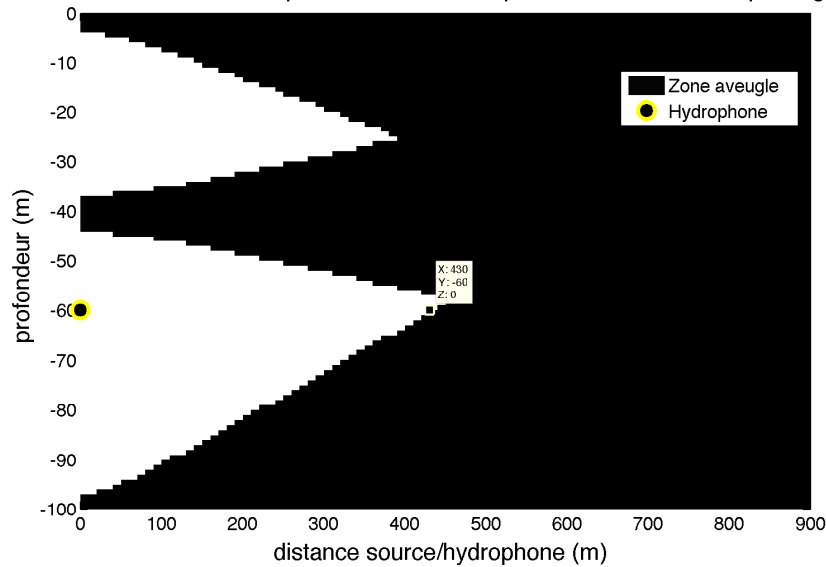


FIGURE 3.6 – Illustration des régions dans lesquelles les sources seraient localisables par la méthode IGA-VMM-BR pour un hydrophone à 60 m de profondeur (rond jaune) dans 100 m d'eau. Les zones blanches correspondent aux positions de la source telles que les 3 premiers trajets sont détectables par les outils de la méthode. Les zones noires sont les zones où les sources ne sont pas exploitables en raison d'une différence de temps trop faible

La figure 3.6 illustre ce domaine de fonctionnement pour un hydrophone à 60 m dans 100 m d'eau, et des signaux de pentes 20 kHz/s. Les zones blanches sont les régions dans lesquelles une source peut être localisée avec les outils de traitement de la méthode IGA-VMM-BR (les deux premières différences de temps d'arrivée). Les zones noires sont les régions inexploitable pour la localisation. Pour les caractéristiques de milieu et de source considérées dans ce calcul, la portée maximale est de 430 m. On observe 2 zones blanches de fonctionnement de la méthode. La zone supérieure correspond aux positions de la source lorsque le 2^{ème} arrivée est le premier réfléchi surface. La zone inférieure correspond aux positions de la source lorsque le 2^{ème} est le premier réfléchi fond.

3.3.2 Performances de la méthode IGA-VMM-BR sur l'inversion

Nous étudions le conditionnement de notre méthode basée sur l'inversion du coefficient de réflexion (*Jensen et al. (1994)*) à partir d'un modèle géoacoustique simulé proche du fond de la zone d'ERATO 2011. Pour cela nous supposons un fond constitué d'une couche de sédiment posée sur un socle semi-infini.

La couche sédimentaire possède les propriétés suivantes :

- vitesse de compression dans le sédiment $c_p = 1677$ (m/s) ;
- densité du sédiment $\rho_p = 1.8$ (kg/m³) ;
- l'atténuation de compression notée $\alpha_p = 0.59$ (dB/λ) ;
- l'épaisseur du sédiment (pour les sédiments intermédiaires) notée $h = 50$ (cm).

Le socle semi-infini possède les propriétés suivantes :

- vitesse de compression dans le socle $c_s = 3000$ (m/s) ;
- vitesse de cisaillement $c_{cis} = 1600$ (m/s) ;
- densité du socle $\rho_s = 2.4$ (kg/m³) ;
- l'atténuation de compression notée $\alpha_s = 0.5$ (dB/λ) ;
- atténuation de cisaillement (pour un socle dur) notée $\alpha_{cis} = 0.4$ (dB/λ).

L'ensemble de ces paramètres constitue le vecteur α_{opt} dont dépend le coefficient de réflexion du fond. Pour la collection de rasances, nous supposons posséder $N_t=50$ mesures pour des rasances comprises entre 15° et 57°. Pourquoi ces valeurs ? On pourrait théoriquement prendre des angles entre 0° et 90° mais de tels angles correspondent à des distances sources-récepteurs allant de 0 m à l'infini alors que dans la pratique, les angles de rasance atteints sont dictés par la distance minimale et la distance maximale accessibles. 15° et 57° correspondent aux angles limites accessibles lors de l'expérimentation ERATO 2011 (voir paragraphe 3.4.1). De la même manière, le modèle de fond choisi pour faire l'évaluation est cohérent avec la zone d'étude de la campagne ERATO 2011. On étudie ainsi les performances théoriques avec des données d'entrée réalistes. Afin d'étudier le conditionnement du procédé d'inversion, nous calculons l'erreur quadratique moyenne entre la collection des coefficients de réflexion générée avec les propriétés α_{opt} et la collection de coefficients générée avec les propriétés α . Le vecteur α correspond au vecteur α_{opt} dont un ou deux des paramètres sont modifiés pour évaluer l'impact sur le résultat de l'inversion de l'erreur sur ce(s) paramètre(s). Les variations de l'erreur quadratique sont évaluées paramètre par paramètre (cf. figure 3.7) puis par couple de paramètres (cf. figure 3.8).

La figure 3.7 présente l'étude de sensibilité mono-paramètre. L'erreur quadratique moyenne comise sur le coefficient de réflexion est calculée pour chaque paramètre x , pour des erreurs Δx à la vraie valeur x_{opt} variant de -50 % à +50 %. Plus l'erreur est importante pour de petites erreurs Δx , plus le procédé est considéré sensible au paramètre et donc meilleure sera l'estimation de ce paramètre. Toutes les courbes de la figure 3.7 tendent vers 0 en 0. Plus une courbe est haute dans la figure, plus le paramètre est sensible. On lit donc l'ordre de sensibilité de haut en bas.

On constate que les paramètres les plus sensibles sont les paramètres du sédiment, notamment la vitesse de compression dans le sédiment c_p , sa densité ρ_p et son épaisseur h . Vient ensuite l'atténuation de compression dans le sédiment α_p . Les paramètres relatifs au socle semi-infini sont les paramètres les moins sensibles à l'exception de la vitesse de cisaillement dans le socle c_{cis} . Les paramètres d'atténuation de compression dans le socle α_s et d'atténuation de cisaillement α_{cis} sont les paramètres

les moins sensibles et seront plus difficiles à estimer par la méthode. Les erreurs évoluent de façon monotone (croissante lorsque l'écart à la valeur vraie augmente) à l'exception de celle du paramètre épaisseur de sédiment qui oscille dès 5 % d'erreur sur l'estimation de l'épaisseur h . Ainsi les écarts d'estimation de l'épaisseur de 2 % et 20 % par rapport à sa valeur vraie induisent la même erreur sur le coefficient de réflexion. Ces minima locaux indiquent que, même si l'épaisseur de sédiment fait partie des paramètres les plus sensibles, elle reste un paramètre difficile à estimer si on s'éloigne trop de sa valeur vraie.

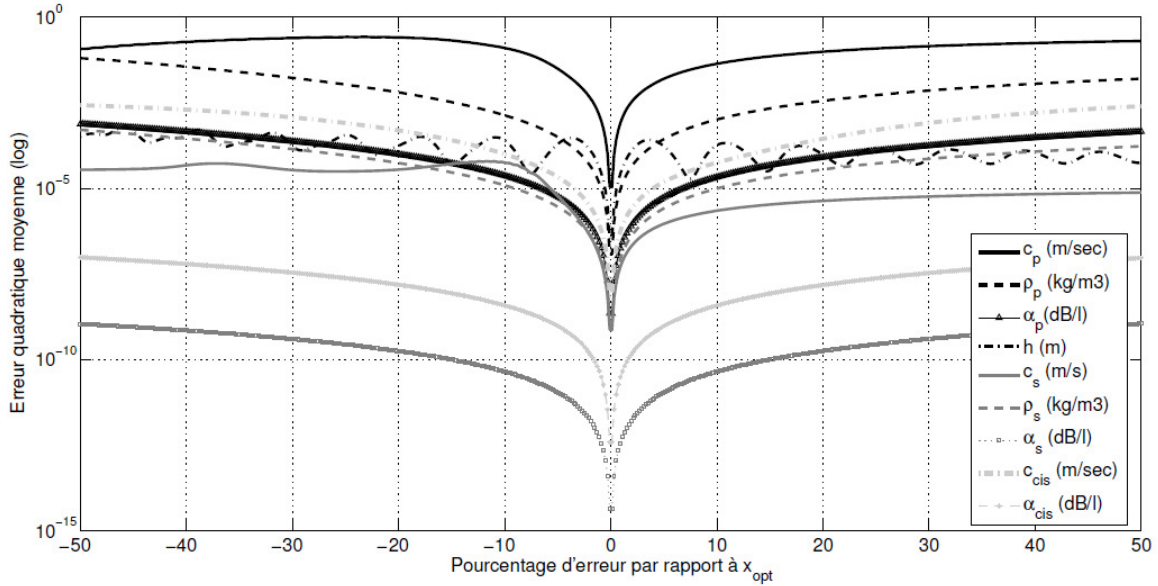


FIGURE 3.7 – Critères monoparamètre du conditionnement du problème d'inversion pour un fond constitué d'un sédiment sur socle dur. En abscisse, l'écart en pourcentage entre la valeur supposée estimée pour le paramètre et la valeur vraie du paramètre. En ordonnée, l'erreur quadratique moyenne sur le coefficient de réflexion pour l'écart du paramètre à la valeur vraie

La figure 3.8 montre la sensibilité du modèle pour chaque couple de paramètres lorsque tous les autres paramètres sont connus. Cette étude que nous avons réalisée permet d'observer la sensibilité du modèle aux erreurs sur des couples de paramètres. Les motifs caractéristiques sont les profils horizontaux ou verticaux qui indiquent qu'une erreur sur le paramètre (aligné au profil) n'influence pas l'estimation du second paramètre, les profils obliques qui indiquent une dépendance entre deux paramètres, et enfin les profils ronds qui indiquent une sensibilité aux deux paramètres. L'encadré A regroupe les couples de paramètres propres à la couche de sédiment. L'encadré C regroupe les couples de paramètres propres au socle semi-infini. L'encadré B correspond aux couples croisés. Dans la suite, pour chaque encadré, on repère les cases avec un couple (ligne, colonne).

On remarque que l'encadré B (sensibilité croisée entre les couches) présente des profils horizontaux ou verticaux pour la moitié des couples, ce qui indique que l'estimation des paramètres de la couche de sédiment est insensible aux variations des paramètres du socle semi-infini. C'est le cas de la case (1,1) qui correspond à la sensibilité croisée entre la vitesse de compression dans le sédiment et celle dans le socle. Dans les encadrés A et C (sensibilité propre à chaque couche), on observe des motifs droits le long des atténuations de compression α_p (encadré A case (1,2)), α_s (encadré B cases (1,2), (2,2) et (3,3)) et de cisaillement α_{cis} (encadré C cases (1,4), (2,4) et (4,4)) en regard des paramètres de vitesses de compression c_p , c_s , de cisaillement c_{cis} et de densités ρ_p , ρ_{socle} . Les paramètres α_p , α_s et α_{cis} seront donc difficiles à estimer même avec une bonne estimation des autres paramètres. Dans l'encadré A, le couple densité-vitesse de compression (case (1,1)) décrit des motifs obliques indiquant une corrélation entre ces paramètres. Dans C, on observe que les motifs liant le cisaillement aux autres paramètres du socle sont concentrés (cases (2,3), (3,4)). Le paramètre c_{cis} de vitesse de cisaillement est un paramètre relativement sensible. Dans l'encadré A, la sensibilité de la hauteur d'eau h aux autres paramètres de la couche de sédiment est marquée par des motifs concentrés (colonne 3).

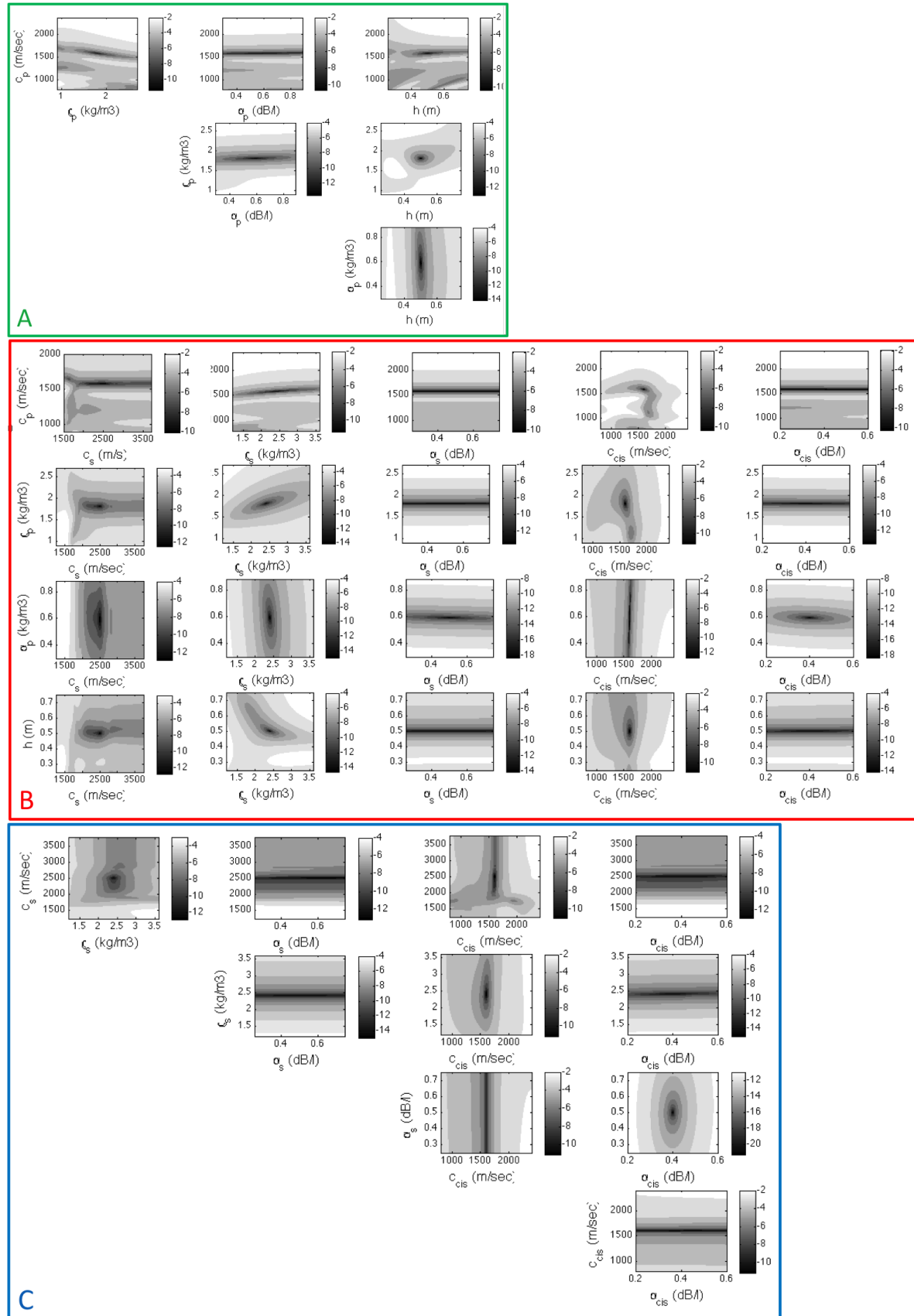


FIGURE 3.8 – Critères biparamètres pour le conditionnement du problème d'inversion pour un fond constitué d'un sédiment sur socle dur. Les encadrés permettent d'identifier les critères biparamètres propres à chacune des couches (A pour le sédiment et C pour le socle) et les critères croisés (B)

L'examen de l'évolution du critère d'erreur en fonction des paramètres pris individuellement (cf. figure 3.8) permet de démontrer que :

1. les paramètres les plus sensibles sont la célérité, la densité et l'épaisseur de la couche supérieure de sédiment ;
2. le critère présente des minima secondaires dans sa dépendance à l'épaisseur de la couche supérieure sédimentaire, ce qui rend l'estimation plus difficile malgré la sensibilité ;
3. les célérités et la densité du socle restent des paramètres sensibles ;
4. les propriétés des deux couches sont peu dépendantes l'une de l'autre ;
5. les atténuations sont des paramètres peu sensibles.

L'examen de l'évolution du critère d'erreur pour des couples de paramètres (cf. figure 3.8) confirme la hiérarchie de sensibilité entre paramètres et montre une légère corrélation entre la densité et la célérité de compression de la couche sédimentaire, entre la densité et la célérité de compression du socle ainsi qu'entre les atténuations de compression et de cisaillement du socle (paramètres individuellement peu sensibles).

On cherchera donc en priorité à estimer les célérités de compression et l'épaisseur du sédiment. On pourra estimer les densités à partir de ces vitesses de compression. Les atténuations seront difficiles à estimer, on pourra ne pas les inverser. Nous présentons dans la suite de ce chapitre une application de notre méthode d'inversion géoacoustique passive sur des émissions réelles contrôlées dans un environnement répondant aux conditions imposées dans les hypothèses de travail (§3.1.1).

3.4 Application du schéma d'inversion sur des émissions contrôlées en environnement réel

3.4.1 Matériel et méthode - campagne ERATO 2011

La campagne ERATO 2011 s'est déroulée en juin 2011 dans la région du Golfe du Lion en Méditerranée à bord du navire océanographique le *Pourquoi Pas ?*. La mission consistait à récolter des données pour évaluer les algorithmes développés dans le cadre du projet ERATO¹ - suite du projet STEREO (2.2) - et d'évaluer le démonstrateur Daurade du projet REA discret², un AUV³ réalisant du levé d'environnement avec des capteurs acoustiques. Durant cette campagne, les systèmes STEREO et TELEMAQUE ont été déployés (2.2). L'antenne TELEMAQUE était en configuration petits fonds avec 6 hydrophones répartis entre 17 m et 85 m de profondeur (figure 3.9). La source acoustique de STEREO utilisée durant la campagne n'est pas parfaitement isotrope. [Perrier \(2008\)](#) donne les gains de directivité mesurés sur la source en site et en gisement. Néanmoins, ces données ont été exploitées pour l'inversion géoacoustique sur données de source omnidirectionnelle.

La zone de travail est une zone dite de référence CALIMERO-B, ayant fait l'objet de levés hydro-océanographiques intensifs dans le cadre du projet CALIMERO⁴ mené conjointement par le SHOM et l'IFREMER [Lurton and Le Gac \(2004\)](#), [Theuillon et al. \(2008\)](#). A l'endroit de l'antenne acoustique, les prélèvements par carottiers d'interface et de gravité [Roubi et al. \(2009\)](#) montrent que le fond est constitué d'une couche de 50 cm de sédiments sableux (vitesse de compression de 1580 m/s) sur un sous-bassement sableux consolidé (vitesse de compression de 1850 m/s).

Durant la campagne, le navire s'est déplacé autour de l'antenne acoustique TELEMAQUE selon une trajectoire indiquée dans la figure 3.10. Les couleurs de la trajectoire identifient les phases de l'expérimentation ainsi que la distance (en mètres) séparant la source de l'antenne au début de chaque

1. Evaluation RAPide de l'environnement par Tomographie Océano-acoustique - programme d'études amont de la DGA

2. Rapid Environmental Assessment discret - programme d'études amont de la DGA

3. Autonomous Underwater Vehicle

4. CALibration des METHodes de Reconnaissances des fonds Océaniques.

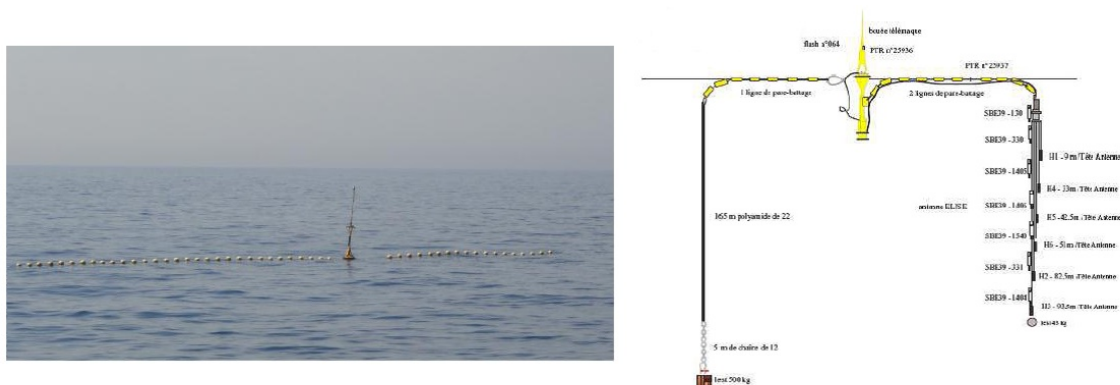


FIGURE 3.9 – L'antenne d'hydrophones ELISE et l'antenne TELEMAQUE (source : SHOM)

phase. Pendant la phase n° 8 (phase qui nous concerne, segment vert clair sur la figure, débutant à environ 490 m de l'hydrophone) le bateau se dirigeait à une allure de 4 nœuds vers l'antenne d'hydrophones mouillée au point de coordonnées [lat : 42.8495N, lon : 3.6579E]. Le long de cette radiale, la source acoustique de STEREO émettait une rampe de fréquence de durée 10 ms, entre 1 kHz et 2 kHz, à 180 dB rel. $1\mu Pa^2$ au rythme d'une émission toutes les 2 secondes (soit une tous les 4 m) et ce jusqu'à un éloignement de 1 km de l'antenne. Le passage au CPA⁵ correspond à une distance source/antenne d'approximativement 140 m.

La figure 3.11 présente la hauteur d'eau issue du sondeur bathymétrique mis en œuvre pendant l'expérimentation (ligne continue verte), et l'immersion de la source STEREO (ligne continue rouge) fournie par la source elle-même le long de la radiale n° 8. Elle confirme bien la bathymétrie plate de la zone. L'immersion de la source est quasi-constante autour de 60 m.

Les rampes de fréquence émises présentaient des caractéristiques représentatives des signaux de dauphins analysés sur la campagne ERATO 2009 (2.2). Néanmoins, la source acoustique de STEREO étant basses fréquences, il n'était pas possible d'émettre dans la bande de fréquences des dauphins communs. Les signaux émis ont donc conservé une pente cohérente avec les signaux de dauphins d'ERATO 2009 mais se situaient dans la bande de fréquences [1000 Hz 2000 Hz]. La figure 3.12 (image du haut) présente un exemple du signal reçu par l'hydrophone n° 6 de l'antenne situé à 60 m de profondeur⁶. On observe plus de 3 trajets résolus.

Ces émissions contrôlées représentent un jeu de données exploitables, de difficulté intermédiaire entre des données purement simulées (milieu simulé, signaux synthétiques) et des données réelles (milieux réels, signaux réels) et nous ont permis d'évaluer la méthode en environnement représentatif. Dans le paragraphe suivant sont présentés les résultats de l'application de la méthode sur les données de la radiale n° 8 à partir des enregistrements sur un seul hydrophone de l'antenne (l'hydrophone n° 6 situé à 60 m de profondeur - cf. figure 3.9).

3.4.2 Résultats sur la phase n° 8 - Scénario AMELOCHE

La méthode IGA-VMM-BR, dont les outils sont décrits dans la section 3.1.2, est appliquée à l'ensemble des signaux de la phase n° 8. Le tracking des émissions exploitées est réalisé à partir de la

5. Closest point of approach

6. L'hydrophone H6 présente le moins de bruit (bruit de la surface de la mer) et est idéalement positionner pour optimiser la séparation des trajets. L'hydrophone H1 (ou H2), est prêt d'une interface ce qui rapproche le trajet direct du premier réfléchi fond (resp. surface pour H2)

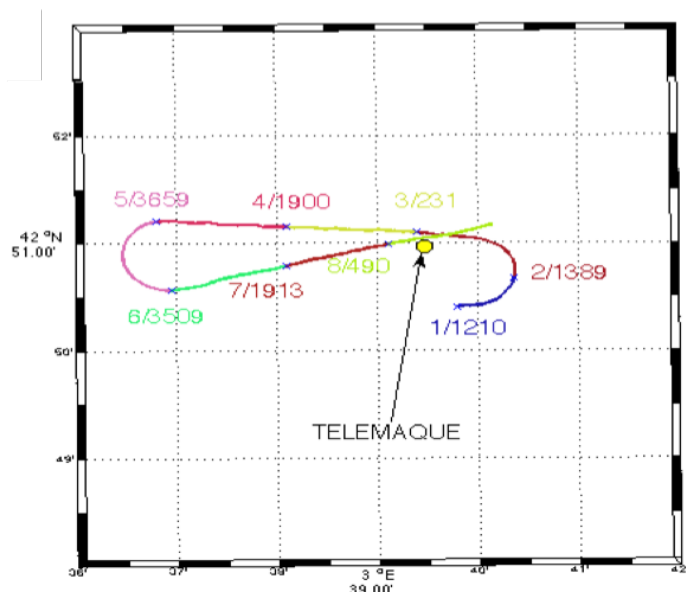


FIGURE 3.10 – Mouvements effectués par le navire autour de l’antenne acoustique TELEMAQUE. Les couleurs de la trajectoire identifient les phases de l’expérimentation ainsi que la distance (en m) séparant la source de l’antenne au début de chaque phase. La radiale n° 8 est le segment vert clair en fin de déplacement, débutant à environ 490 m de l’hydrophone

sélection manuelle de points caractéristiques du signal (ligne blanche continue sur l’image du haut de la figure 3.12). Cette piste temps-fréquence permet l’obtention de la réponse impulsionnelle du canal (figure du bas de la figure 3.12), nécessaire à l’estimation des temps et niveaux d’arrivée qui sont les pics de cette RI.

La source est ensuite localisée à l’aide des différences de temps d’arrivée des multitrajets [Aubauer et al. \(2000\)](#). La figure 3.13 présente l’estimation de la position de la source par l’algorithme à partir des transmissions enregistrées sur l’hydrophone n° 6 en superposition de la trajectoire GPS du bâtiment (corrigée de la distance GPS/source).

[Aubauer et al. \(2000\)](#) permettent d’exprimer les angles de rasance des réfléchis fond en fonction de la hauteur d’eau (h), des profondeurs de la source (z_s) et de l’hydrophone (z_h) ainsi que de la distance source-récepteur (r). Pour chaque émission, nous estimons le couple [coefficient de réflexion, angle de rasance] à partir du rapport des énergies du trajet direct et du réfléchi fond.

A noter que contrairement aux données analysées dans le chapitre 2, les mesures présentent plus de trois trajets de propagation. La configuration de l’expérimentation nous permet donc d’accéder à un 4^{ème} trajet qui cache en réalité deux trajets présentant une réflexion fond et une réflexion surface (l’un commençant par la réflexion fond et l’autre par la réflexion surface), trop proches l’un de l’autre pour être résolus par le spectrogramme. Le 4^{ème} trajet permet la localisation sans ambiguïté de la source. Ces trajets ont de plus été réfléchis une fois sur le fond et peuvent donc être exploités de la même manière que le premier réfléchi fond. Ils donnent accès à des angles de rasance plus importants, ce qui permet de décrire les angles supérieurs à 35° . Sur la figure 3.14, les croix rouges montrent les points qui auraient été obtenus avec seulement le premier réfléchi fond ; les étoiles noires indiquent les points accessibles avec les premiers réfléchis fond.

Le traitement de l’ensemble des signaux émis et propagés dans le canal lors de la phase 8 (étape 1.2 de la méthode, détaillée dans la section 3.1.2) fournit une courbe du coefficient de réflexion mesuré en fonction des angles de rasance sur le fond présentée dans la figure 3.14.

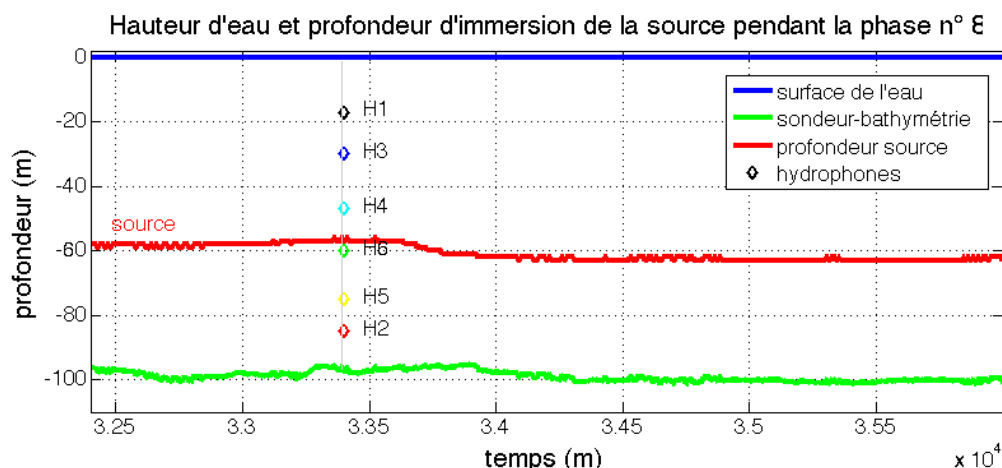


FIGURE 3.11 – Profondeur d’eau et immersion de la source durant la radiale n  8 mesurée par le Pourquoi Pas ?. On observe bien la bathymétrie plate (ligne continue verte). La position de la source (ligne continue rouge) est relativement constante autour de 60 m de profondeur. Les profondeurs des hydrophones de l’antenne TELEMAQUE sont dessinés à titre indicatif par des losanges notés H1   H6. Nous utilisons l’unique hydrophone H6 pour l’inversion g eoacoustique passive.

Les données semblent assez peu dispersées pour les rasances inférieures à 50  (cf. zone 1 figure 3.14) et plus dispersées au-delà (cf. zone 2 figure 3.14). Nous avons donc choisi d’inverser les paramètres du fond à partir des angles compris entre 0  et 50 . Les données de la zone 1 (cf. figure 3.14) servent ainsi d’observable à l’algorithme d’inversion.

L’aspect de la courbe du coefficient de réflexion estimé traduit la présence d’au moins 2 couches de sédiments avec un premier angle critique aux alentours de 32 . Nous avons donc choisi un modèle de fond composé d’un sédiment sur un socle semi-infini.

L’optimisation des paramètres du modèle de fond est faite à l’aide d’un algorithme génétique (adaptation par les auteurs du code source libre de droit de [Houck et al. \(ACM Transactions on Mathematical Software 1996\)](#)) avec une population de 20 individus (20 fonds candidats) sur 100 générations. Pour valider la méthode sur ce problème d’inversion et s’assurer de la stabilité de l’algorithme génétique, l’algorithme génétique est exécuté 500 fois pour des populations de 20 individus sur 100 générations. Ce multirun permet d’extraire les écarts types des paramètres estimés. La figure 3.15 présente les histogrammes des meilleurs sites visités au fil des répétitions de l’algorithme génétique, pour chaque paramètre du modèle. Le tableau 4.1 indique pour chaque paramètre du modèle, l’optimum, l’écart type et la moyenne observés sur les résultats de l’algorithme génétique pour les 500 expériences ainsi que les bornes données en entrée de l’algorithme génétique. Aucun cisaillement n’a été considéré dans le socle. Le résultat final de l’inversion est tracé dans la figure 3.16. Nous estimons une couche de sédiment de faible vitesse de compression (1580 m/s) et de 50 cm d’épaisseur sur un fond sableux de vitesse de compression 1767 m/s.

3.4.3 Analyse des résultats

La portée maximale de localisation observée (distance au-delà de laquelle les trajets n’étaient plus résolus dans le spectrogramme) est d’environ 300 m pour un hydrophone à 60 m de profondeur dans 100 m d’eau, et une source de profondeur variant entre 56 m   63 m (voir figure 3.13). Cette limite est cohérente avec l’analyse décrite dans le paragraphe 3.3 et le domaine de performances de localisation

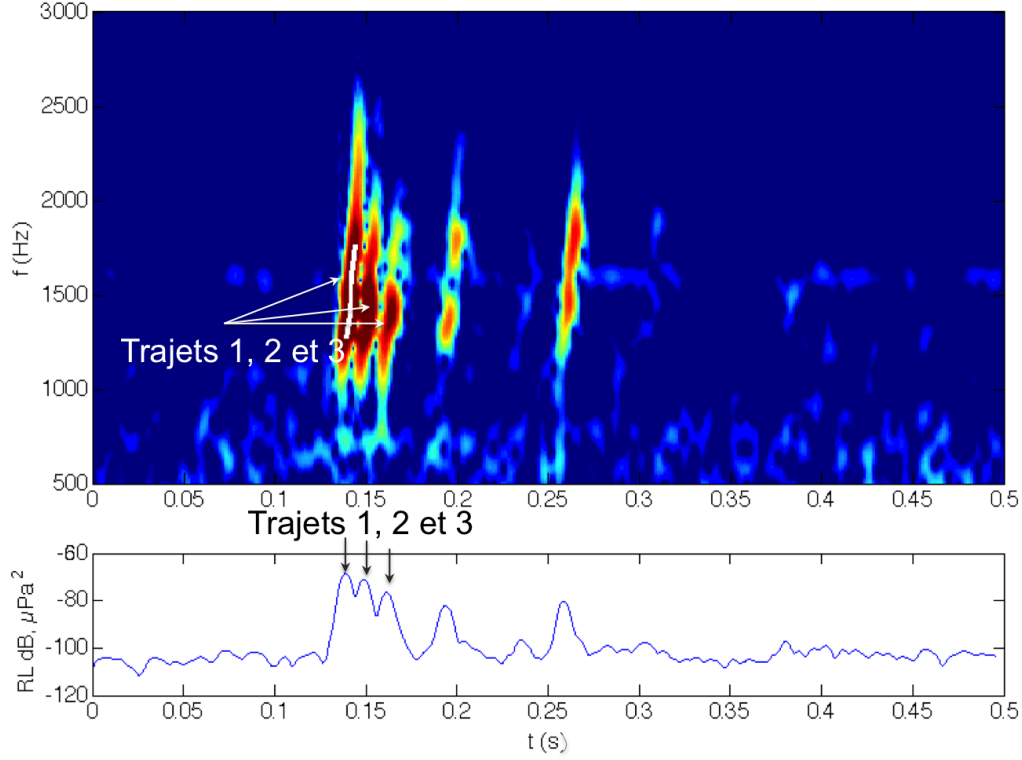


FIGURE 3.12 – Rampe de fréquence reçue par l’hydrophone H6 situé à 60 m d’immersion après propagation dans le canal (Golfe du Lion), le long de la radiale n° 8 pour une source à environ 150 m de distance de l’hydrophone. En haut : spectrogramme d’une émission contrôlée propagée en environnement réel. La piste utile sélectionnée est indiquée par la ligne blanche continue. Les 3 premiers trajets d’arrivée sont numérotés et fléchés. En bas : réponse impulsionnelle obtenue avec la piste temps-fréquence. Les pics de cette RI sont les temps d’arrivée des trajets. On peut voir plus de 3 trajets d’arrivée contrairement aux données de la campagne ERATO 2009

présenté en figure 3.6. Avec une émission toutes les 2 secondes à 4 nœuds, on dispose ainsi de 150 émissions exploitables.

Pour une source et un hydrophone à 60 m de profondeur dans 100 m d’eau et pour des distances source-récepteur variant de 140 m (CPA) à 300 m (portée limite de localisation), l’exploitation des 2 premiers réfléchis fond permet d’explorer des angles de rasance entre 15° et 55° :

$$\begin{aligned}\theta_{min} &= \arctan \frac{2.h - z_h - z_s}{r_{max}} \approx 15^\circ \\ \theta_{max} &= \max\left(\arctan\left(\frac{2.h + z_h - z_s}{r_{min}}\right), \arctan\left(\frac{2.h - z_h + z_s}{r_{min}}\right)\right) \approx 55^\circ\end{aligned}\quad (3.5)$$

au lieu de seulement 30° maximum avec le premier réfléchi fond :

$$\theta_{min} = \arctan \frac{2.h - z_h - z_s}{r_{max}} \approx 15^\circ$$

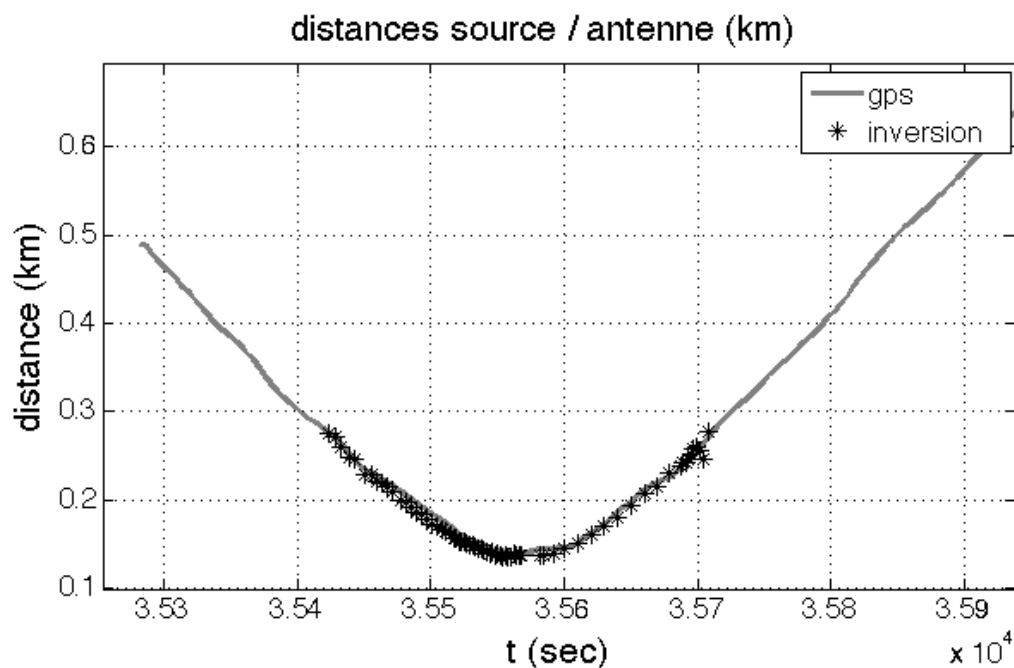


FIGURE 3.13 – Comparaison entre l’estimation de la distance s eparant la source STEREO de l’antenne d’hydrophones TELEMAQUE durant la phase n  8 par la m ethode IGA-VMM-BR ( toile) et par le GPS du bateau (ligne continue). On observe une bonne localisation de la source par notre m ethode

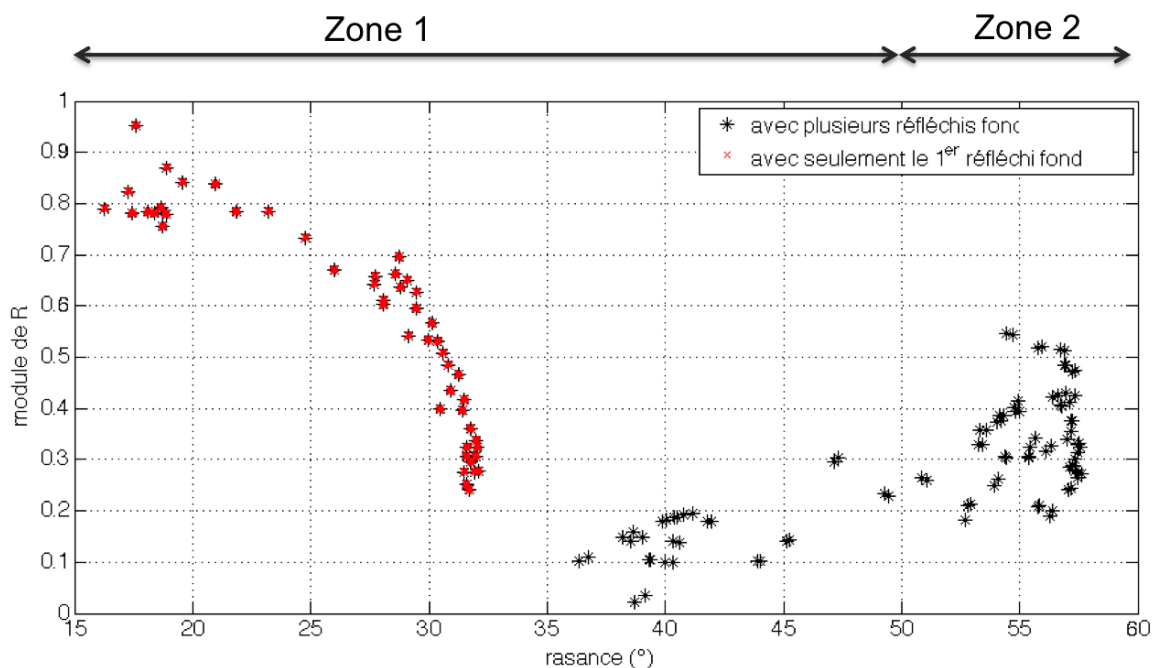


FIGURE 3.14 – Courbe du coefficient de r eflexion mesurée sur la zone de la radiale en fonction des angles de rasance obtenue gr ace au traitement d’un ensemble d’émissions contr ol ees le long de cette radiale. En rouge sont indiquées les points que l’on aurait obtenus en utilisant uniquement le premier r efl echi fond. La zone 1 est la zone qui sera exploit ee pour l’inversion g eoacoustique passive. La zone 2 n’est pas utilis ee car trop bruit ee

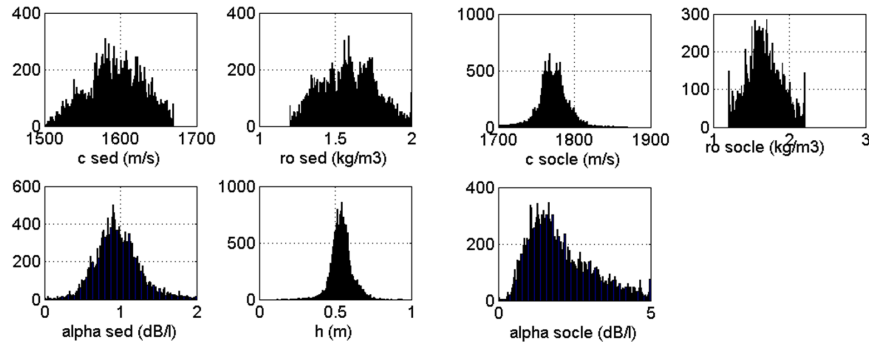


FIGURE 3.15 – Histogrammes des sites parcourus par l'algorithme génétique. En ordonnée, le nombre de visites - en abscisses les valeurs des sites visités. Les noms des paramètres sont explicités dans la section 3.3

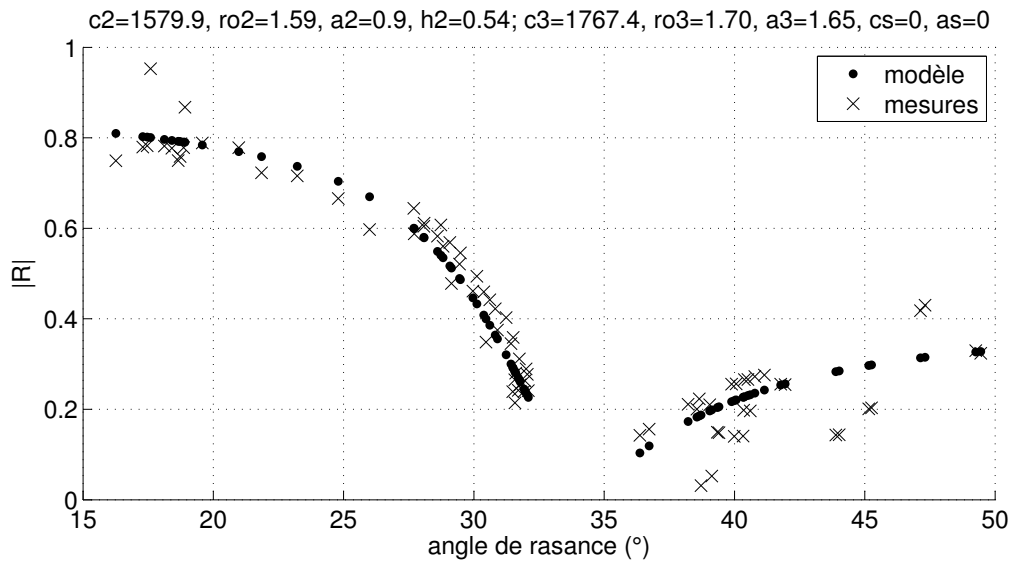


FIGURE 3.16 – Résultats de l'inversion géoacoustique par algorithme génétique des données de la phase n° 8 par la méthode IGA-VMM-BR (× pour les mesures et • pour l'estimation)

TABLE 3.1 – Statistiques sur l’application d’un algorithme génétique (20 individus, 100 générations, 100 répétitions de l’algorithme génétique)

	<i>opt</i>	<i>mean</i>	<i>std</i>	<i>borne inf</i>	<i>borne sup</i>
c_p (m/s)	1579.9	1592.9	36.7	1500	1670
ρ_p (kg/m ³)	1.59	1.59	0.17	1.2	2.0
α_p (dB/λ)	0.9	0.96	0.29	0	2
h (m)	0.54	0.54	0.07	0.1	1
c_s (m/s)	1767.4	1772.1	20.5	1700	1870
ρ_s (kg/m ³)	1.70	1.67	0.22	1.2	2.2
α_s (dB/λ)	1.65	2.04	1.04	0	5
c_{cis} (m/s)	0	0	0	0	0
α_{cis} (dB/λ)	0	0	0	0	0

$$\theta_{max} = \arctan \frac{2 \cdot h - z_h - z_s}{r_{min}} \quad (3.6)$$

Ce qui correspond aux points de mesures en rouge sur la figure 3.14. L’angle critique est atteint mais l’information sur le socle donnée par les angles supérieurs est perdue.

Des carottes effectuées sur la zone montrent la présence d’une couche de faible célérité de compression - 1588 m/s - de 50 cm, sur une couche de sable de vitesse de compression 1850 m/s (source : SHOM). Notre méthode permet donc une bonne estimation de la première couche de sédiment. La seconde couche correspond à un sable plus absorbant que la vérité terrain. La courbe du coefficient observé présente néanmoins une dispersion des points de la partie correspondant à la seconde couche, dispersion pouvant provenir de la diffusion sur cette couche ou encore de la directivité de la source.

Les statistiques issues des répétitions de l’algorithme génétique (cf. tableau 4.1) confirme l’étude de sensibilité mono-paramètre du paragraphe 3.3. Les paramètres le plus sensibles sont les vitesses de compression des sédiments et l’épaisseur de la première couche. On constate également que la vitesse de compression du fond semi-infini est plus facile à estimer (écart type plus faible). L’expérience confirme également la faible sensibilité du modèle aux atténuations pour lesquelles on observe un fort étalement des histogrammes des valeurs estimées.

La figure 3.17 présente l’ensemble des couples de paramètres estimés par l’algorithme génétique au cours des 500 répétitions. Cette figure confirme plusieurs points déjà observés dans l’étude théorique du conditionnement bi-paramètre du paragraphe 3.3. Il y a une corrélation entre la vitesse de compression et la densité des sédiments pour les deux couches (sédiment superficiel et socle). Les graphes étalés pour les couples de paramètres croisés entre les deux couches indiquent que les estimations des couches sont indépendantes l’une de l’autre.

3.5 Discussion

La méthode d’inversion proposée, monocapteur, se base sur la propagation multitrajets et l’étude d’une collection de modulations de fréquence pour estimer la courbe de coefficient de réflexion sur le fond en fonction de la rance, observable classique en inversion géoacoustique [Dettmer et al. \(2008\)](#), [Stotts et al. \(2004\)](#). Sa déclinaison basse résolution (méthode IGA-VMM-BR) met en œuvre des outils de traitement simples pour l’estimation de la RI basés sur l’exploitation du spectrogramme du signal exploité. Les performances de la méthode IGA-VMM-BR ont été analysées théoriquement (cf. paragraphe 3.3). L’intérêt de cette méthode a ensuite été démontré sur des émissions contrôlées en

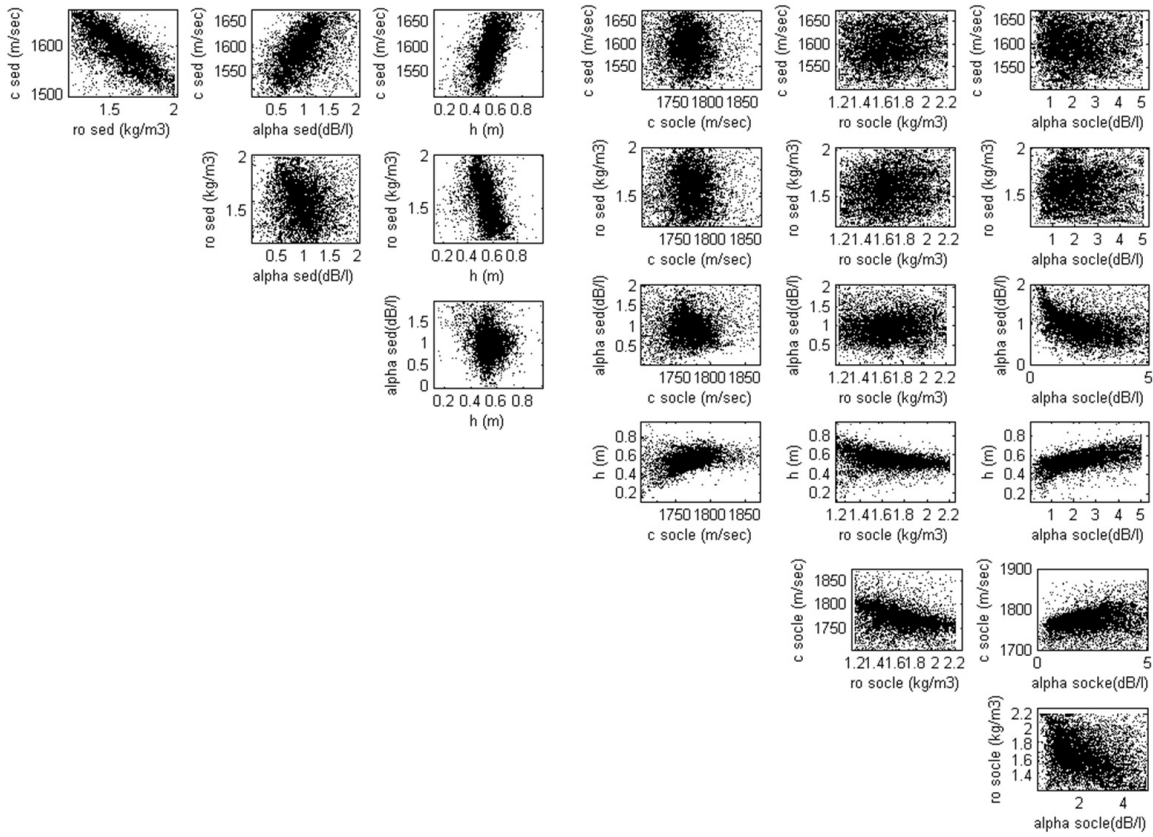


FIGURE 3.17 – Représentation des couples de paramètres estimés par l'algorithme génétique sur 500 répétitions

environnement réel lors de la campagne ERATO 2011 (cf. paragraphe 3.4). Les résultats ont de plus confirmé l'analyse de performances. Les résultats de l'inversion sont cohérents, pour la couche superficielle de sédiment, avec des prélèvements in situ effectués dans la zone de travail.

Cette méthode n'intègre pas la prise en compte de la directivité des sources. Or la directivité, peu documentée pour les sources d'opportunité biologiques, impacte les niveaux des trajets utilisés et devra donc être prise en compte (cf. chapitre 2). Néanmoins, comme discuté dans ce chapitre 2, la correction de la directivité ne sera pas intégrée dans la méthode d'inversion dans le cadre de cette thèse.

Dans cette méthode, le mouvement de la source est pris en compte par compensation uniforme du mouvement (*Josso, 2010*) par le fait même que l'on utilise le premier arrivé comme référence du signal. Dans la section 2.1.1, cette question a été soulevée et nous avons fait le choix de négliger les différences de facteurs d'échelle entre les trajets 2 et 3 sachant que nous travaillons en relatif du premier trajet. Loin de faire une démonstration mathématique, nous avons tout de même réalisé une petite simulation sur des signaux synthétiques équivalents à ceux des données ERATO 2011 de ce chapitre avec un fond composé de deux couches de sédiments sans cisaillement. Trois vitesses de sources ont été considérées dont une à 2 m/s qui est la vitesse de déplacement du Pourquoi Pas? pendant la radiale n° 8 de la campagne ERATO 2011. La figure 3.18 présente les résultats de cette simulation. Le signal émis est une rampe de fréquence identique à celle d'ERATO 2011, avec une émission tous les 25 m de 100 m à 250 m pour trois vitesses de sources : 0 m/s (courbe cyan), 2 m/s (courbe verte) et 10 m/s (courbe rose). Pour chaque émission, deux valeurs de coefficient de réflexion sont estimées par la méthode IGA-VMM-BR, le coefficient de réflexion correspondant à la rasance du premier réfléchi fond (un trait continu relie les points) et celui correspondant à la rasance du second réfléchi fond (un

trait pointillé relie les points), ce qui permet d'atteindre des rasances plus élevées et donc d'évaluer l'impact du Doppler pour des angles d'émissions plus élevés. On observe une bonne correspondance entre les courbes aux différentes vitesses et la courbe théorique (noire). Notre analyse est que les outils mis en œuvre dans la méthode IGA-VMM-BR n'offre pas une résolution suffisante en fréquence pour être sensible aux différences de vitesses apparentes entre les trajets. De plus, la modification de l'amplitude des trajets due au mouvement relatif de la source est négligeable devant le coefficient de réflexion que l'on cherche à estimer.

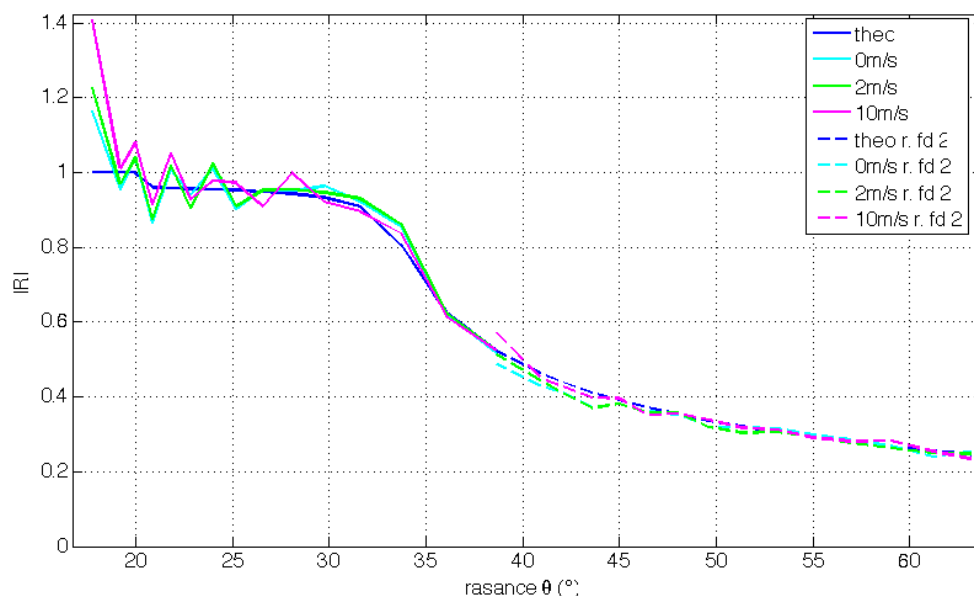


FIGURE 3.18 – Le signal émis est une rampe de fréquence identique à celle d'ERATO 2011, avec une émission tous les 25 m de 100 m à 250 m pour trois vitesses de sources : 0 m/s (courbe cyan), 2 m/s (courbe verte) et 10 m/s (courbe rose). Pour chaque émission, deux valeurs de coefficient de réflexion sont estimées par la méthode IGA-VMM-BR, le coefficient de réflexion correspondant à la rasance du premier réfléchi fond (un trait continu relie les points) et celui correspondant à la rasance du second réfléchi fond (un trait pointillé relie les points), ce qui permet d'atteindre des rasances plus élevées et donc d'évaluer l'impact du Doppler pour des angles d'émissions plus élevés. Le premier réfléchi fond ne permet d'atteindre que des rasances jusqu'à 38°. On observe une bonne correspondance entre les courbes aux différentes vitesses et la courbe théorique (noire).

La portée de la méthode IGA-VMM-BR est directement liée aux angles de rasances accessibles et donc à la capacité à décrire le fond aux petits angles (couverture de l'angle critique). L'exploitation de plusieurs réfléchis fond, lorsqu'ils sont disponibles, permet d'accéder à des angles plus importants pour lesquels il faudrait un passage au CPA beaucoup plus proche si on voulait les couvrir avec seulement le premier réfléchi fond. Comme on le voit dans l'analyse des données d'ERATO 2011, l'accès aux angles plus élevés permet de déduire la présence d'une deuxième couche de sédiment sous le sédiment superficiel. Dans le processus, les outils de traitement jouent un rôle prépondérant car ils permettent de prétraiter les données et d'en extraire les observables nécessaires à l'inversion, c'est-à-dire :

- les temps d'arrivée relatifs des échos nécessaires pour l'estimation de la position de la source et l'estimation des pertes de transmission ;
- l'énergie de chaque écho nécessaire pour l'estimation du coefficient de réflexion associé à la vocalise traitée.

Le domaine de fonctionnement (portée notamment) de la méthode d'inversion est donc dicté par ces outils. Une vocalise n'est exploitable que si les outils temps-fréquence mis en œuvre sont capables de séparer les échos correspondant aux différents trajets. Les outils classiques de traitement du signal mis en œuvre pour séparer les échos limitent donc la portée des sources et la pente des signaux exploitables, et par conséquent la connaissance sur le fond. En effet, dans la méthode IGA-VMM-BR, nous mettons

en œuvre un tracking de la vocalise sur le spectrogramme servant de piste le long de laquelle l'énergie est intégrée sur une fenêtre temporelle glissante pour estimer la réponse impulsionnelle et permettre d'estimer les temps et niveaux des trajets. Les caractéristiques nécessaires à l'inversion sont donc extraites du spectrogramme. La résolution des trajets dans cet espace de représentation impose des limites en termes de portée des signaux exploitables et de pente de modulation de fréquence (3.3).

SYNTHESE

La méthode IGA-VMM-BR est décrite dans [Barazzutti et al. \(2013\)](#).

Hypothèse - Dans ce chapitre, nous avons supposé une bathymétrie plate et la propagation de modulations de fréquence, sous l'hypothèse de la propagation en rayons et présentant au moins 3 trajets résolus et mesurables dans le spectrogramme du signal reçu. La source est omnidirectionnelle contrairement aux vocalises de dauphins que l'on souhaite utiliser à termes.

Outils - La méthode IGA-VMM-BR met en œuvre des outils simples de traitement du signal basés sur la sélection de la piste temps-fréquence de la vocalise et l'exploitation du spectrogramme pour estimer la RI. Les temps et niveaux d'arrivée des trajets sont extraits de cette RI et permettent de fournir l'observable - courbe du coefficient de réflexion en fonction de la rasance - à un algorithme générique. La bathymétrie plate offre des relations géométriques permettant de calculer facilement les longueurs et angles d'arrivée des trajets.

Principaux résultats - La démonstration sur signaux synthétiques dans le cas simple du canal de Pékérís a montré la faisabilité d'estimer les propriétés géoacoustiques du fond à partir de la courbe du coefficient de réflexion obtenue par le traitement, par notre méthode passive, d'une série de rampes de fréquence présentant au moins trois trajets résolus. Cette simulation a de plus montré l'importance de la gamme de rasance sur l'estimation du fond. En effet, pour un canal de Pékérís, cette gamme doit couvrir l'angle critique du milieu (angle au-delà duquel les trajets se réfléchissant sur le fond sont absorbés, en dessous, le coefficient vaut 1). Une étude de performances réalisées sur le procédé d'inversion pour un modèle de fond représentatif de celui de la zone ERATO 2011 nous a permis d'anticiper les performances et les limites de la méthode et d'analyser les résultats de l'application de notre méthode sur des émissions réelles contrôlées propagées dans la zone d'étude ERATO 2011. L'application de la méthode IGA-VMM-BR à ces émissions réelles contrôlées a démontré l'intérêt de notre méthode d'inversion géoacoustique passive. Les résultats sont cohérents avec des mesures in situ dans la zone de travail et sont également cohérents avec l'analyse a priori des performances de la méthode.

Limites et Perspectives - Les outils de traitement mis en œuvre limitent la portée des sources exploitables et donc la gamme des angles de rasance accessibles, gamme qui est liée à la capacité à bien décrire le fond. L'exploitation de plusieurs réfléchis fond a permis, dans les travaux présentés dans ce chapitre, non seulement de localiser sans ambiguïté la source mais également d'avoir une gamme suffisante de rasances. Cependant, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, les vocalises de dauphins que l'on souhaite utiliser présentent rarement plus de trois trajets. Pour détecter des sources plus éloignées, il faut donc améliorer la résolution de la RI pour permettre de résoudre des différences de temps d'arrivée plus petites. Autre limitation, la méthode ne permet pas la prise en compte de sources directives.

TRANSITION

Un axe de progression est donc l'extension de la portée des sources exploitables par notre méthode d'inversion. Le chapitre suivant introduit de nouveaux outils permettant une plus fine résolution des trajets.

Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - séparation haute résolution des multitrajets

Sommaire

4.1 Outils de traitement du signal pour la séparation haute résolution des trajets - méthode IGA-VMM-HR	96
4.1.1 Hypothèses de travail	96
4.1.2 Description des outils mis en œuvre - le <i>warping</i> temporel appliqué aux modulations de fréquence	96
4.2 Etude de performances HR vs. BR	101
4.3 Application du schéma d'inversion sur des émissions contrôlées en environnement réel	102
4.3.1 Matériel et méthodes	102
4.3.2 Présentation des résultats	103
4.3.3 Analyse des résultats	105
4.4 Discussion	106

Dans ce chapitre, nous présentons de nouveaux outils de séparation haute résolution des trajets basés sur des opérateurs de *warping* temporel (opérateur de déformation temporelle décrits dans la section 4.1). Ces outils doivent permettre d'augmenter la portée des sources exploitables par la méthode et ainsi augmenter le domaine des angles de rasance accessibles. Après une présentation des hypothèses de travail, nous décrirons les nouveaux outils développés pour la méthode d'inversion géoacoustique passive (section 4.1.2). Les performances de cette méthode seront comparées à celle de la méthode IGA-VMM-BR (section 4.2) puis seront confirmées par le traitement du jeu d'émissions contrôlées sur lequel la méthode BR a été évaluée dans le chapitre précédent (section 4.3).

La méthode d'inversion géoacoustique passive dotée de ces outils de séparation des trajets sera nommée IGA-VMM-HR pour Inversion GéoAcoustique à partir de Vocalises de Mammifères Marins Haute Résolution.

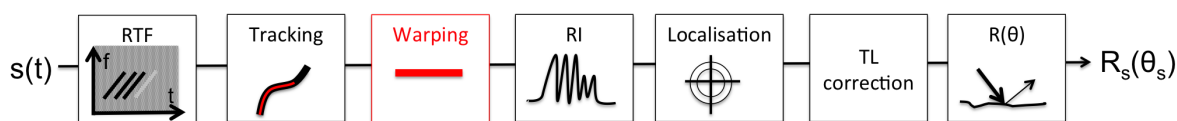


FIGURE 4.1 – Phases du traitement individuel du signal mises en œuvre pour des sources omnidirectionnelles dans la cas de multitrajets **non résolus** dans le spectrogramme

4.1 Outils de traitement du signal pour la séparation haute résolution des trajets - méthode IGA-VMM-HR

4.1.1 Hypothèses de travail

Dans ce chapitre, nous supposons, comme dans le chapitre précédent, que le signal source est une modulation de fréquence, que les conditions de propagation permettent une propagation en multitrajets avec au moins trois trajets reçus sur un unique hydrophone mais **ces trois trajets ne sont pas nécessairement séparables avec les outils de la méthode IGA-VMM-BR présentée précédemment (i.e. identifiables dans le spectrogramme)**

Le canal est toujours supposé isocélère sur un fond plat, hypothèse réaliste pour les zones de travail d'ERATO 2009 (campagne avec enregistrement des signaux de dauphins, section 2.2) et ERATO 2011 (campagne d'émissions contrôlées, section 3.4.1). La trajectoire des rayons acoustiques peut donc être considérée rectiligne. Ces deux dernières hypothèses nous permettent de disposer de relations analytiques entre les temps d'arrivée et les caractéristiques des trajets (longueurs, angles d'arrivée, etc.).

Les effets de la surface de l'eau sur la propagation sont négligés et on considère que le signal subit une simple inversion de phase à l'interface eau/air.

Toujours dans un souci opérationnel, un unique hydrophone est utilisé.

4.1.2 Description des outils mis en œuvre - le *warping* temporel appliqué aux modulations de fréquence

Pour palier la limite de portée de la méthode IGA-VMM-BR présentée dans le chapitre précédent, un étage de séparation haute résolution des trajets a été ajouté (bloc rouge dans le synoptique 4.1) à l'étape des traitements individuels des signaux (cf. figure 2.1). Il se base sur l'application d'opérateurs de déformation temporelle ou *warping* exploitant la piste temps-fréquence du signal. La méthode d'inversion, dotée de cet étage de séparation haute résolution, est appelée dans la suite du manuscrit IGA-VMM-HR (Inversion GéoAcoustique - à partir de Vocalises de Mammifères Marins - Haute Résolution). Nous présentons dans ce paragraphe les outils de déformation temporelle.

4.1.2.1 Pourquoi déformer le signal ?

Partant du constat que les signaux de mammifères marins possèdent généralement des structures temps-fréquence non-linéaires pour lesquelles les représentations standards temps-fréquence (classe de Cohen) sont peu adaptées, *Ioana and Quinquis* (2004) proposent l'utilisation d'une combinaison de transformations unitaires pour linéariser le contenu temps-fréquence des signaux. Ces outils leur permettent d'estimer et de visualiser les paramètres temps-fréquences des signaux, dans un contexte passif. *Jarrot et al.* (2006) décrivent l'application des opérateurs de *warping* temporel (déformation temporelle) à des séries temporelles discrètes et décrivent également les conditions d'application du

warping inverse. En contexte actif et passif, [Josso \(2010\)](#) utilise les déformations temporelles pour filtrer efficacement les trajets d'arrivée dans le cadre d'un algorithme de correction de la RI de l'effet Doppler dû au mouvement de la source d'opportunité. En passif, dans des milieux petits fonds, [Bonnel and Thode \(2013\)](#) utilisent le *warping* temporel pour améliorer la séparation des modes d'une source basses fréquences et pouvoir ainsi estimer les temps d'arrivée et courbes de dispersion des modes. Cette séparation leur permet de proposer un schéma d'inversion géoacoustique dans un guide d'onde dispersif. [Bonnel et al. \(2014\)](#) appliquent ces mêmes outils pour la localisation de sources très basses fréquences en passif.

Dans notre méthode basse résolution (BR), nous avons vu que dans certaines configurations source-récepteur et surtout à partir d'une certaine distance, nous n'étions plus capables de distinguer les trois premiers trajets de la propagation multitrajets ce qui limite la portée de la méthode BR. Pour pouvoir atteindre des distances plus grandes, il faut être capable de distinguer des différences de temps plus petites. La représentation temps-fréquences d'une modulation de fréquence dans le spectrogramme impose un compromis entre résolution temporelle et résolution fréquentielle. La figure 4.2 illustre l'impact de la taille de la fenêtre FFT (Fast Fourier Transform) sur une rampe de fréquence de pente 10 kHz/s, avec un recouvrement de 50 %. On observe que les fenêtres 256 et 512 sont mieux adaptées que 1024 et 2048 pour ce signal.

Lorsque deux trajets sont trop proches l'un de l'autre, il est difficile de définir un réglage du spectrogramme permettant de les séparer temporellement et fréquentiellement. L'idée est donc de transformer les trajets en fréquence pure (i.e. "coucher" les trajets dans le plan temps-fréquence). Il sera ainsi plus aisé de résoudre finement en fréquence et de filtrer ces trajets pour les exploiter dans le schéma d'inversion géoacoustique passive.

4.1.2.2 Le *warping* temporel, un peu de théorie

Le *warping* temporel est une classe de transformation unitaire selon l'axe temporel. Il est défini par un opérateur de $l^2(\mathbb{R})$ W_w , associé à la fonction de déformation $w(t)$, tel que :

$$(W_w s)(t) = |\dot{w}(t)|^{1/2} s(w(t)) \quad (4.1)$$

avec $\dot{w}(t)$ la dérivée selon la variable t de la fonction de déformation $w(t)$.

Cet opérateur présente plusieurs caractéristiques intéressantes pour améliorer notre schéma d'inversion. En particulier, il s'agit d'un changement de variable temporelle qui permet la linéarisation du comportement temps-fréquence d'un signal (voir [Ioana and Quinquis, 2004](#); [Jarrot et al., 2006](#)) ce qui va faciliter la séparation des trajets dans le plan temps-fréquence déformé. De plus, cette déformation

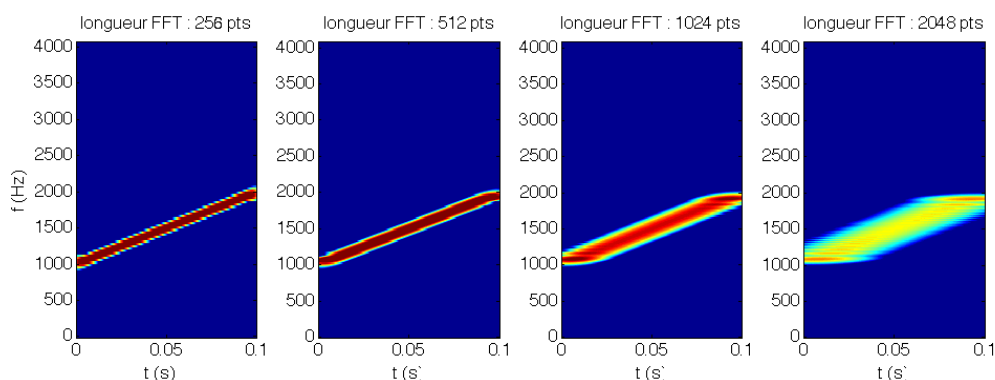


FIGURE 4.2 – Impact de la taille de la fenêtre FFT sur une rampe de fréquence de pente 10 kHz/s, avec un recouvrement de 50 % à chaque fois (de gauche à droite : 256 points, 512 points, 1024 points et 2048 points). On observe que les fenêtres 256 et 512 sont mieux adaptées que 1024 et 2048

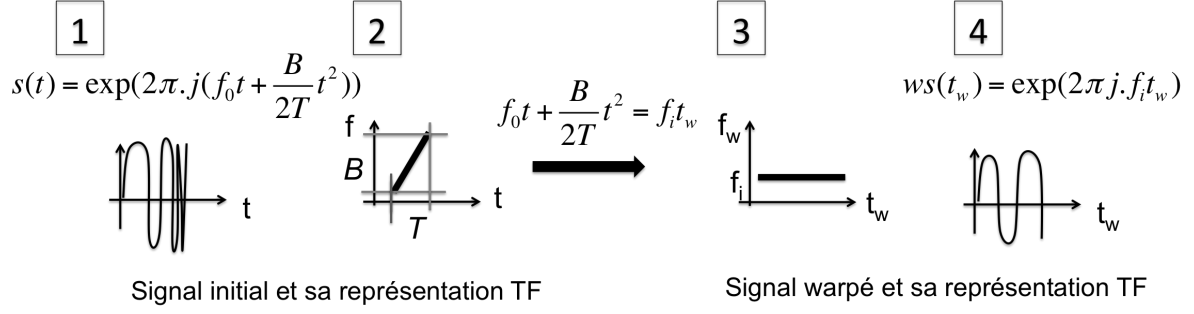


FIGURE 4.3 – Représentation schématique de l'effet de déformation temporelle (*warping temporel*) sur une rampe de fréquence $s(t)$, avec t_w le temps déformé et f_i la fréquence de déformation, B la bande de fréquences et T la durée d'un écho

temporelle conserve l'énergie, ce qui permet de travailler indifféremment à partir des énergies du signal initial ou de celles du signal déformé.

Soit $s(t) = \exp(2\pi j\phi(t))$ le signal étudié avec $\phi(t)$ la phase du signal. La loi de déformation temporelle permettant de transformer le signal en fréquence pure est donc basée sur la phase du signal à laquelle elle est reliée par :

$$w(t) = \phi(t)/f_i \quad (4.2)$$

avec la fréquence de déformation f_i choisie telle que :

$$\begin{aligned} w(0) &= 0 \\ w(T) &= T \end{aligned} \quad (4.3)$$

avec T la durée du warping [Ioana and Quinquis \(2004\)](#). On applique, sur le signal d'origine (non déformé)¹, le changement de variable temporelle suivant :

$$t = \phi^{-1}(f_i w) \quad (4.4)$$

avec w la nouvelle variable temporelle et f_i la fréquence de warping. Une représentation de l'effet de la déformation temporelle sur le signal est schématisée dans la figure 4.3 pour le cas d'un chirp linéaire. La nouvelle variable temporelle est $(f_0 t + B/(2T)t^2)/f_i$ avec $f_i = f_0 + B/2T$.

Pour obtenir la loi de modulation $\phi(t)$ du signal $s(t)$ qui servira de loi de déformation conformément à l'équation 4.2, la loi de fréquence instantanée $f(t) = d\phi(t)/dt$ du signal d'origine est apprise sur sa représentation temps-fréquence puis intégrée pour obtenir la loi de déformation temporelle. En contexte passif, le signal émis n'étant pas connu, la loi de fréquence instantanée utilisée est donc celle du premier trajet arrivé. Comme dans la méthode IGA-VMM-BR (cf. chapitre 3), l'estimation de la loi de fréquence instantanée peut être réalisée à l'aide d'algorithmes de tracking temps-fréquence comme ceux décrits dans [Dadouchi et al. \(2013\)](#) ou manuellement (dans notre cas). La figure 4.4 illustre l'application de cette déformation temporelle sur une modulation linéaire de fréquences de pente B de 10 kHz/s (de 1 à 2 kHz sur 0.1 s). La représentation temps-fréquences du signal d'origine correspond à l'image 1, celle du signal déformé est donnée en image 2. L'image 3 présente le spectre du signal déformé. On observe un pic prononcé à la fréquence de déformation f_i . La déformation temporelle nous permet de résoudre finement les trajets et d'estimer la réponse impulsionnelle du canal.

1. On désigne par "d'origine" ce qui se réfère au signal avant déformation et par "déformé" ce qui se réfère au signal après déformation temporelle

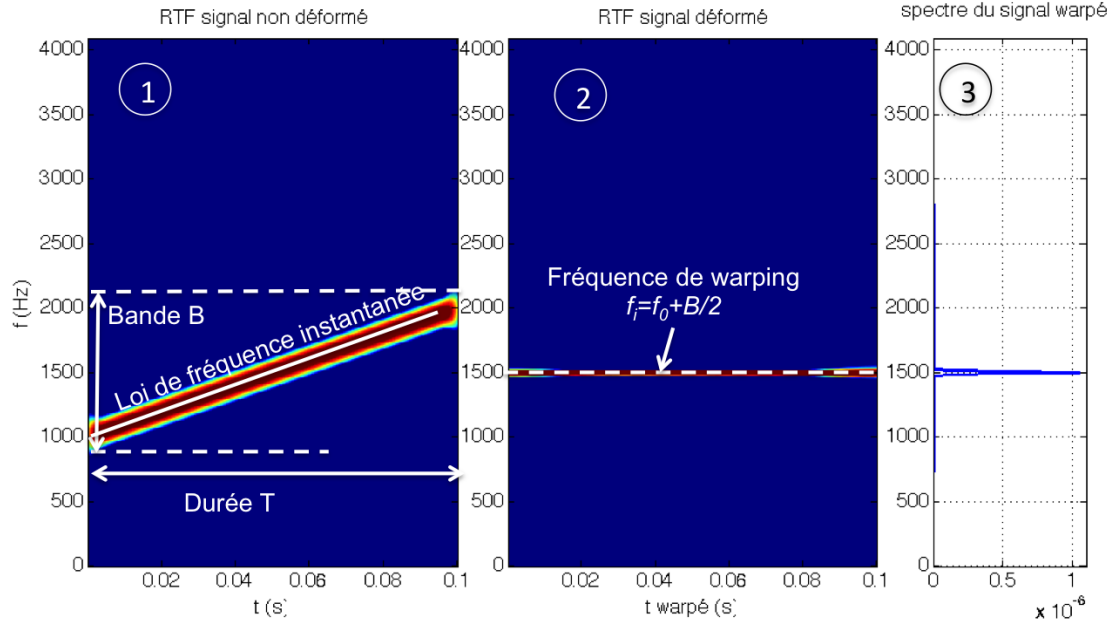


FIGURE 4.4 – Application de la déformation temporelle basée sur la phase sur une modulation linéaire de fréquence de pente B de 10 kHz/s (de 1 à 2 kHz sur 0.1 s). Sur l'image 1 : RTF du signal d'origine avec sa bande B et sa durée T ainsi que la loi de fréquence instantanée (segment continu blanc). Sur l'image 2 : RTF du signal après déformation avec la fréquence de warping f_i tracée en pointillés blanc. Image 3 : spectre du signal déformé. On observe un pic au niveau du signal déformé, à la fréquence de warping f_i

4.1.2.3 Estimer la RI du canal à partir du signal déformé

Les outils d'estimation de la RI du canal, nécessaire à l'extraction des observables, diffèrent de ceux de la méthode IGA-VMM-BR. Les trajets de la propagation en multitrajets d'une modulation de fréquence ont tous la même loi de fréquence instantanée (si on néglige les effets du Doppler lorsque la source est en mouvement). Par conséquent, la même déformation temporelle peut être utilisée pour tous les trajets. Par contre, si on applique la déformation temporelle à l'instant d'arrivée toa_1 du premier trajet, un autre trajet $s(t - \tau)$ retardé de τ subit la déformation suivante :

$$s(t - \tau) = s(\phi^{-1}(f_i w) - \tau) \quad (4.5)$$

Soit pour une modulation de fréquence :

$$\begin{aligned} s(t - \tau) &= \exp(2\pi j \phi(t - \tau)) \\ s(t) &= \exp(2\pi j \phi(\phi^{-1}(f_i w) - \tau)) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Un développement de Taylor à l'ordre 1 pour $\tau < t$ nous donne :

$$\begin{aligned} s(t - \tau) &= \exp(2\pi j [\phi(\phi^{-1}(f_i w)) - \phi'(\phi^{-1}(f_i w))\tau]) \\ s(t - \tau) &= \exp(2\pi j (f_i w - \phi'(\phi^{-1}(f_i w))\tau)) \\ s(t - \tau) &= \exp(2\pi j f_i w) \exp(-\phi'(\phi^{-1}(f_i w))\tau) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Le trajet retardé de τ n'est donc pas transformé en fréquence pure. Le terme $\exp(-\phi'(\phi^{-1}(f_i w))\tau)$ indique en effet une dépendance au temps déformé w . La figure 4.5 illustre ce phénomène sur la modulation présentée dans la figure 4.4 avec un écho retardé. Le warping est appliqué à l'instant

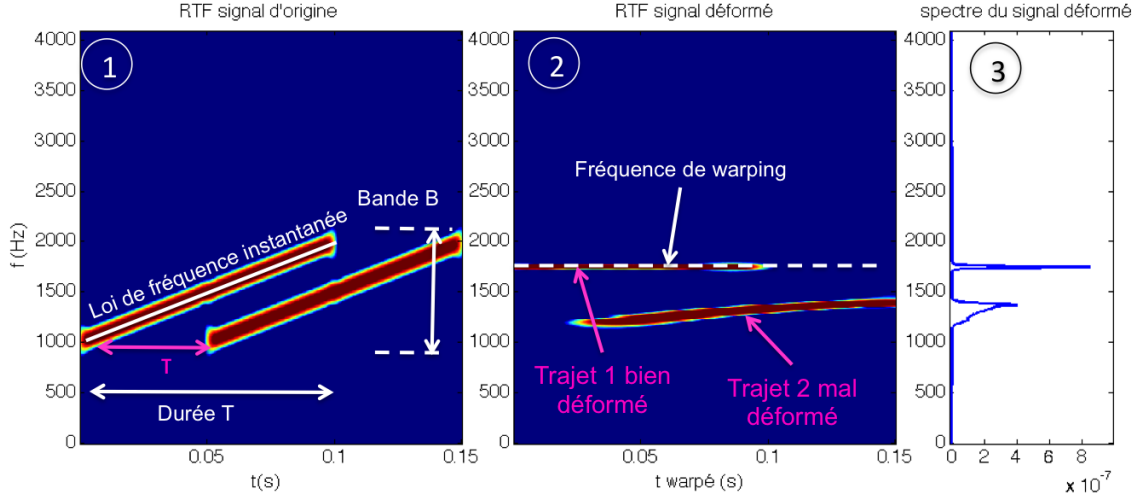


FIGURE 4.5 – Application de la déformation temporelle basée sur la phase sur une modulation linéaire de fréquences de pente B de 10 kHz/s (de 1 à 2 kHz sur 0.1 s) et son écho retardé de τ . Le warping est appliqué à l’instant d’arrivée du premier trajet. Sur l’image 1 : RTF du signal d’origine avec sa bande B et sa durée T ainsi que la loi de fréquence instantanée (segment continu blanc). Les 2 échos sont décalés de τ s mais ont la même loi de fréquence instantanée. Sur l’image 2 : RTF du signal après déformation avec la fréquence de warping f_i (pointillés blanc). On voit que le premier trajet est proprement transformé en fréquence pure à la fréquence f_i tandis que son écho retardé est courbé en raison du retard τ . Image 3 : spectre du signal déformé. On observe un pic au niveau du signal, à la fréquence de warping f_i indiquant le premier trajet. Le deuxième trajet est visible également sur le spectre mais décalé en fréquence

d’arrivée du premier trajet et sur toute la durée du signal. L’image 1 présente la RTF du signal d’origine avec sa bande B et sa durée T ainsi que la loi de fréquence instantanée (segment continu blanc). Les 2 échos sont décalés de τ s mais ont la même loi de fréquence instantanée. Sur l’image 2 est représentée la RTF du signal après déformation appliquée à l’instant $t = 0$ (instant du premier écho) en la fréquence de warping f_i (pointillés blanc). On observe que le premier trajet est proprement transformé en fréquence pure à la fréquence f_i tandis que son écho retardé est courbé en raison du retard τ . Le spectre du signal déformé est tracé sur l’image 3. On observe le pic au niveau du premier écho, à la fréquence de warping f_i indiquant le premier trajet. Le deuxième trajet est visible également sur le spectre mais décalé et étalé en fréquence. Chaque trajet retardé sera donc transformé en fréquence pure f_i uniquement lorsque la déformation temporelle sera appliquée à son instant d’arrivée.

Pour estimer la RI du canal entre la source et le récepteur, on applique donc la déformation temporelle sur une fenêtre glissante de longueur T , le long de l’axe des temps d’origine, T choisie comme étant égale à la durée d’un écho reçu. Pour chaque instant n/f_e , $n = 1 : N - T \times f_e$ (avec f_e la fréquence d’échantillonnage, N la taille du signal) : on applique la déformation temporelle sur l’extrait du signal $s[n : n + T \times f_e - 1]$, puis la représentation temps-fréquence du signal déformé est calculée et son énergie est intégrée le long de l’axe des temps déformés t_w (spectre du signal déformé à la fréquence f_i). Les instants d’arrivée des échos maximisent cette intégrale à la fréquence de déformation f_i . En conservant la valeur de l’intégrale en f_i à chaque instant, on obtient ainsi la RI du signal dans l’espace des temps non déformés. Une fois la RI estimée, les différences de temps d’arrivée sont calculées en recherchant les dates des maxima de la RI et en formant leurs différences.

Le reste de la méthode IGA-VMM-HR se déroule ensuite comme la méthode IGA-VMM-BR. La source est localisée à l’aide des différences de temps d’arrivée ([Aubauer et al., 2000](#)). Comme la déformation temporelle conserve l’énergie, les énergies des trajets déformés $W_w s(t_d)$ (avec t_d l’instant d’arrivée du trajet direct) et $W_w s(t_f)$ (avec t_f l’instant d’arrivée du premier réfléchi fond), corrigées des pertes de transmission, peuvent être utilisées pour l’estimation du coefficient de réflexion à l’angle de rasance θ du réfléchi fond, sans avoir besoin de retourner dans l’espace temps-fréquence d’origine.

A l'instar de la méthode BR, le traitement d'une collection de signaux individuels fournit une courbe du coefficient de réflexion mesuré en fonction des angles de rasance (étape 2 figure 2.1). Cette courbe sert d'observable pour l'algorithme d'inversion (étape 3 figure 2.1).

Les outils de déformation temporelle, construits à partir de la fréquence instantanée du premier arrivé, permettent de résoudre finement les trajets dans le plan temps-fréquence de l'espace déformé. Comme le *warping* conserve l'énergie, le reste de la méthode d'inversion géoacoustique passive reste inchangé. Le caractère haute résolution et les performances de la méthode IGA-VMM-HR présentée ci-dessus sont étudiés dans le paragraphe suivant.

4.2 Etude de performances HR vs. BR

Pour localiser la source, nous avons besoin des différences de temps d'arrivée. La distance limite, au-delà de laquelle une source n'est plus exploitable, dépend donc de la capacité des outils de traitement utilisés à pouvoir séparer les différents échos.

Dans la méthode HR, les outils de déformation temporelle appliqués transforment les trajets en fréquence pure f_i (fréquence de déformation). Cela autorise un réglage optimal pour résoudre finement en fréquence le signal warpé. La déformation $w(t)$ est appliquée de manière glissante sur l'axe des temps non déformés. La résolution temporelle de la méthode HR vaut $\Delta t_w = 1/f_e$ avec f_e la fréquence d'échantillonnage du signal non déformé, résolution meilleure que celle offerte par la méthode BR (cf. 3.3).

Les outils de déformation offrent donc une séparation haute résolution des échos d'un signal et permettent ainsi l'exploitation de sources plus éloignées qu'avec la méthode basée sur le spectrogramme. Comme la rasance du premier réfléchi fond est liée à la distance r entre la source et le récepteur par $\arctan(\frac{2 \cdot h - z_s - z_h}{r})$ (avec h la hauteur d'eau, z_s et z_h les profondeurs respectives de la source et du capteur), les sources plus éloignées offrent des rasances plus faibles ce qui permet de décrire les fonds peu réfléchissants pour lesquels l'angle critique est faible. Pour un hydrophone et une source à 60 m dans 100 m d'eau, la résolution temporelle de la méthode BR permet d'atteindre une portée de 300 m soit une rasance minimale de 15° (cf. section 3.3) contre plusieurs kilomètres de portée avec la méthode HR. Il s'agit d'une portée théorique. Il faut, en effet, que la fonction de déformation soit correctement déterminée, or en concept passif, la phase instantanée $\phi(t)$, qui permet de construire la loi de déformation temporelle, est inconnue et doit être estimée à partir du signal reçu.

Si la loi de déformation est dégradée, le signal ne sera pas transformé en fréquence pure f_i et la RI sera en conséquence dégradée. Soit $g(t)$ la phase 'fausse' estimée, le signal déformé sera :

$$\begin{aligned} s(t) &= \exp(2\pi(\phi \circ g^{-1})(f_i t)) \\ &\text{au lieu de :} \\ s(t) &= \exp(2\pi(\phi \circ \phi^{-1})(f_i t)) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Cela entraînera une erreur sur la fréquence de *warping* du signal, sur la représentation temps-fréquence du signal déformé et donc sur l'estimation de la RI. Cette erreur est difficile à quantifier dans un contexte passif.

Pour illustrer les différences de performances précédemment décrites, nous estimons la RI d'une des émissions du jeu de données qui sera évalué dans la section 4.3 à partir des deux méthodes (BR et HR). La source est à 60 m de profondeur et à 550 m du récepteur. La figure 4.6 présente l'émission reçue non traitée avec les arrivées détectées par la méthode HR. Les RI estimées selon les deux méthodes sont présentées en figure 4.6. Les 3 premiers trajets, encadrés sur la figure 4.6, ne sont résolus que par la méthode HR, or ils sont indispensables pour la localisation de la source dans notre schéma.

4.3 Application du sch ema d'inversion sur des émissions contr ol es en environnement réel

4.3.1 Matériel et méthodes

Ce jeu de données est décrits en section 3.4.1

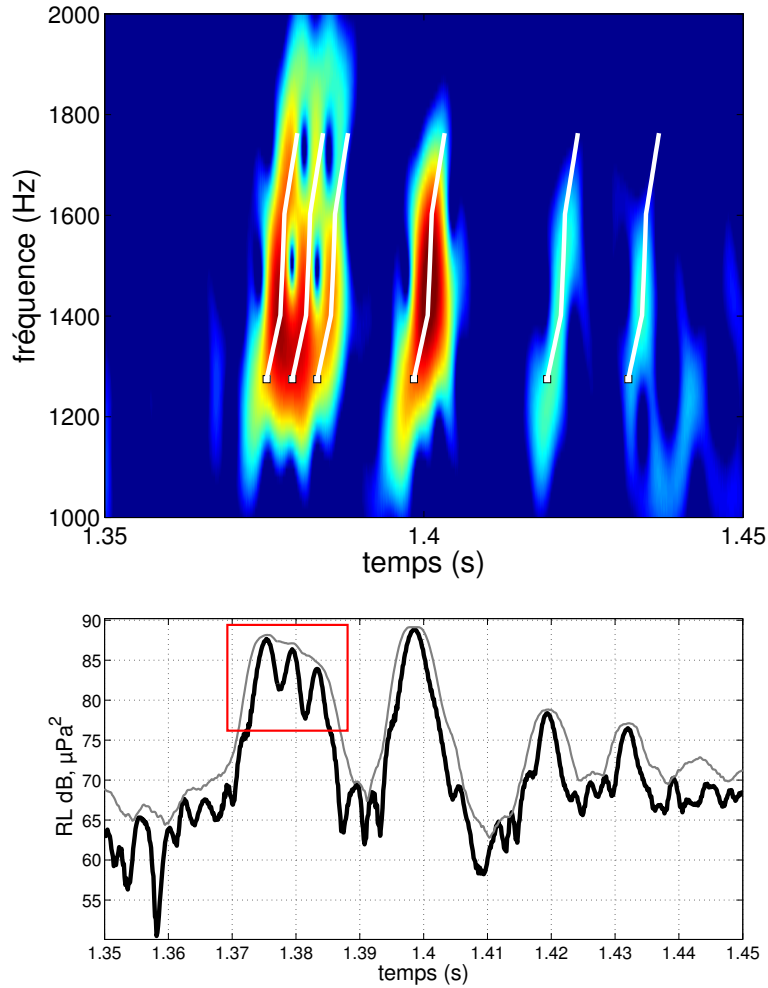


FIGURE 4.6 – Haut : représentation temps-fréquence de l'émission reçue avant déformation, la source est   550 m. Les trajets d'arrivée détectés par la méthode HR sont les traits blancs. Bas : RI estimée par la méthode BR (courbe grise fine) et par la méthode HR (courbe noire épaisse). Le cadre rouge souligne les 3 premiers trajets détectés par la méthode HR et invisibles en BR

4.3.2 Présentation des résultats

On évalue la méthode IGA-VMM-HR sur le même jeu d'émissions que celui utilisé pour la méthode BR (cf. paragraphe 3.4) avec le même hydrophone à 60 m de profondeur. Chaque signal traité est néanmoins déformé pour permettre l'estimation HR de la RI puis localiser la source. La figure 4.7 présente les résultats de localisation superposés des 2 méthodes (HR en noir, BR en gris).

Le coefficient de réflexion mesuré est un coefficient moyen sur la bande de fréquences du signal. Il est estimé à partir du rapport des trajets réfléchi-fond et direct corrigés des pertes de transmission. Les résultats de l'estimation du coefficient de réflexion par les deux méthodes BR et HR sont présentés dans la figure 4.8 (HR en noir, BR en gris). La courbe du coefficient de réflexion mesuré alimente un algorithme génétique permettant d'inverser les paramètres optimaux pour le fond.

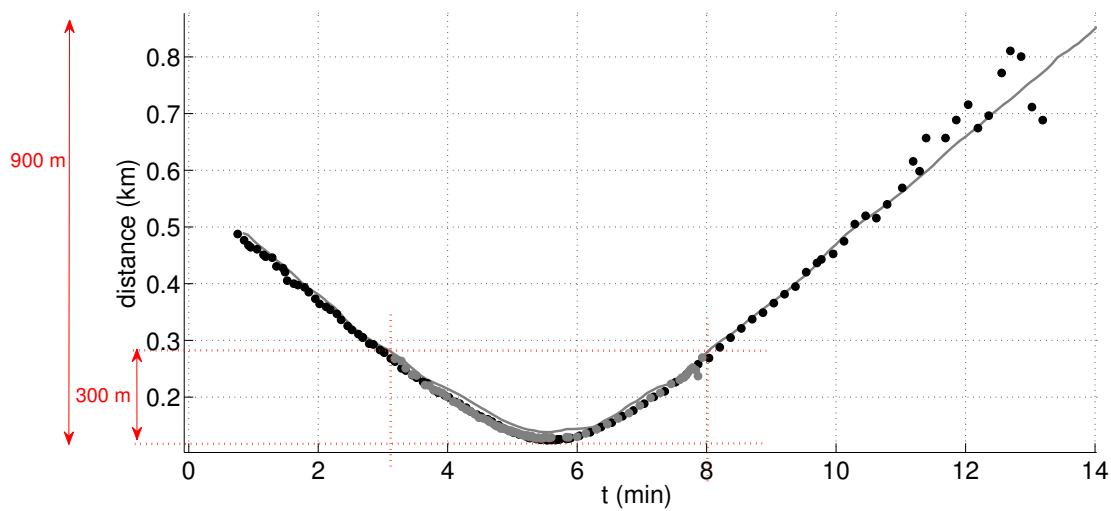


FIGURE 4.7 – Estimation de la distance source / récepteur (km). La ligne continue correspond à la localisation par GPS. Les points noirs correspondent à l'estimation de la position de la source par la méthode IGA-VMM-HR, les points gris à l'estimation de la position par la méthode IGA-VMM-BR.

Pour l'évaluation du coefficient de réflexion, nous considérons uniquement la phase d'approche de la source vers l'hydrophone (entre 0 et 6 min, figure 4.7), plus riche en mesures. De plus, au-delà de 500 m, la dispersion des points est plus importante. La structure géoacoustique retenue pour l'inversion est un fond marin constitué d'une couche de sédiment sur un socle semi-infini. Le sédiment est supposé fluide et le socle est supposé élastique. Les paramètres du modèle géoacoustique sont estimés par minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre le coefficient de réflexion moyen mesuré et le coefficient de réflexion moyen modélisé (équation 2.10). On procède de la même manière que pour la méthode BR. L'algorithme génétique est exécuté 100 fois avec 100 générations de 20 individus. Les sites les plus visités parmi les meilleurs candidats de l'algorithme génétique (AG) sont les paramètres optimaux. Les paramètres inversés sont : la vitesse de compression c_p dans la première couche de sédiment, son atténuation α_p , la vitesse de compression dans le socle c_s , son atténuation α_s , la vitesse de cisaillement c_{cis} et l'épaisseur h de la première couche de sédiment. Cependant, nous avons choisi d'exploiter les relations entre la vitesse de compression et la densité du sédiment [Hamilton \(1978\)](#). Les densités sont estimées à partir de [Hamilton \(1978\)](#) selon les vitesses de compression : *sea floor* selon la loi $\rho = 14,8 \times c_p - 21,014$, *soft sediment* selon la loi $\rho = 1,135 \times c_p - 0,19$ et *shale curve* selon $\rho = 0,917 + 0,744 \times c_p - 0,08 \times c_p^2$ avec (c_p en km/s et ρ en g/cm³). L'inversion du cisaillement a également été ajoutée par rapport à l'inversion dans le cas BR. Les histogrammes des paramètres inversés sont représentés en figure 4.9 et analysés dans le tableau 4.1. Ce tableau présente les résultats obtenus avec la méthode HR (optimaux, moyennes et écarts types des paramètres sensibles, donc hors atténuation). Les deux dernières colonnes rappellent les résultats obtenus par la méthode BR et les paramètres issus de la mesure directe in situ disponible.

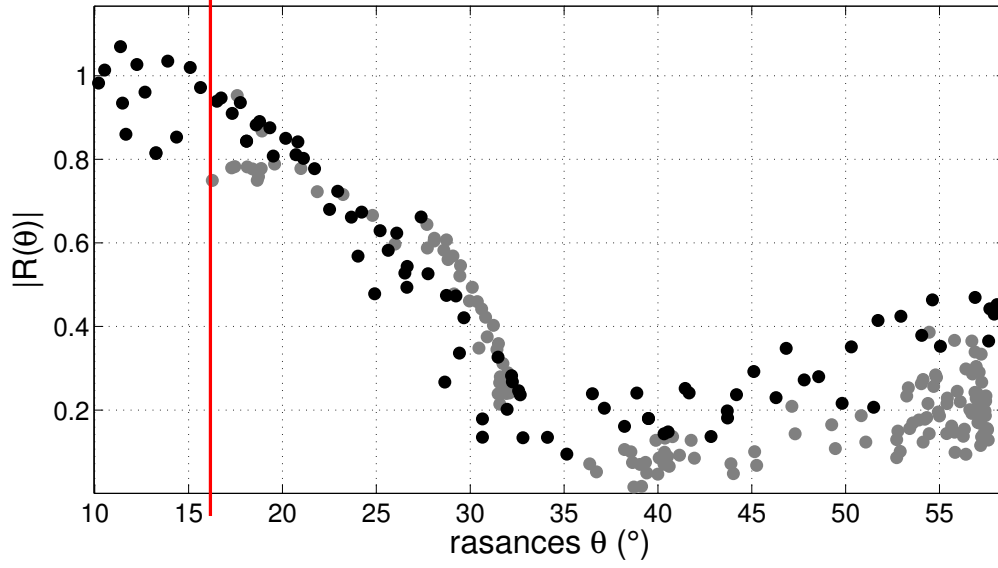


FIGURE 4.8 – Estimation du coefficient de réflexion $|R(\theta)|$ en fonction de l'angle de rasance θ avec la méthode IGA-VMM-BR (gris) et avec la méthode IGA-VMM-HR (noir). La limite des rasances accessibles en BR est indiquée par la droite verticale rouge

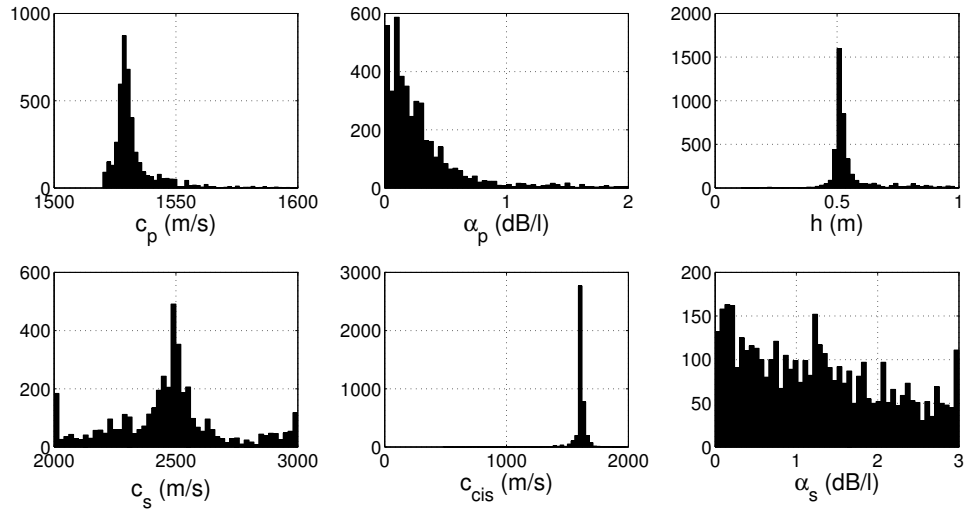


FIGURE 4.9 – Histogrammes des sites les plus visités pour les 100 répétitions de l'AG, avec la vitesse de compression dans la première couche de sédiment c_p , son atténuation α_p , la vitesse de compression dans le socle c_s , son atténuation α_s , la vitesse de cisaillement c_{cis} et l'épaisseur h de la première couche de sédiment

TABLE 4.1 – Statistiques sur l'application de l'AG (20 individus, 100 générations, 100 répétitions de l'AG) pour la méthode HR, la dernière colonne rappelle les résultats de l'inversion par la méthode BR

	<i>estim.</i> <i>HR</i>	<i>mean</i>	<i>std</i>	<i>borne</i> <i>inf.</i>	<i>borne</i> <i>sup.</i>	<i>estim.</i> <i>BR</i>	<i>in</i> <i>situ</i>
c_p (m/s)	1 530,4	1 534,7	12,4	1 520	1 600	1 579,9	1 588
h (m)	0,51	0,57	0,13	0,1	1	0,54	0,50
c_s (m/s)	2 510,0	2 432,1	242,6	2 000	3 000	1 767,4	1 850
c_{cis} (m/s)	1 605,5	1 600,3	77	100	2 000	<i>na</i>	<i>na</i>

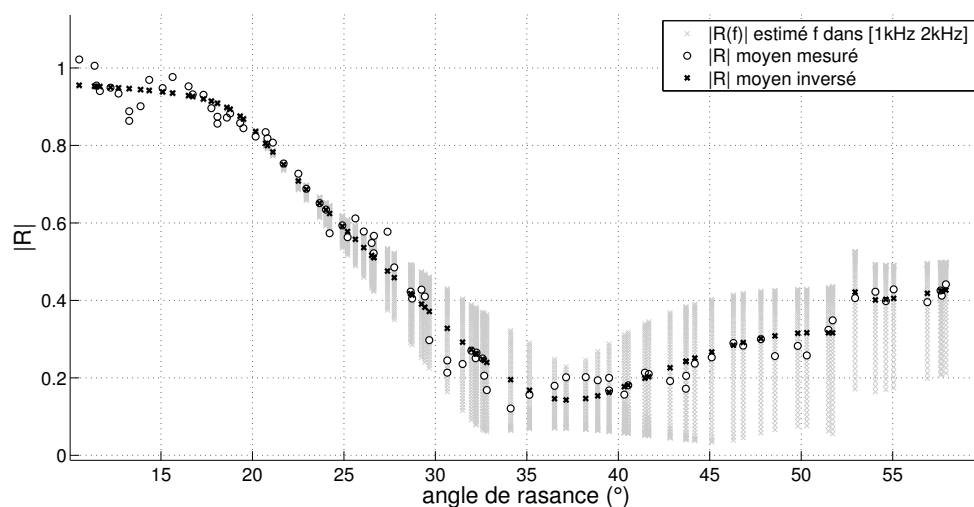


FIGURE 4.10 – Estimation du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance avec la méthode HR (moyen en croix noires et pour chaque fréquence en croix grises). Le coefficient mesuré est un coefficient moyen sur la bande de fréquence du signal

L'algorithme estime donc un fond constitué d'un sédiment de vitesse de compression 1530 m/s sur 51 cm d'épaisseur, sur un socle très réfléchissant de vitesse de compression 2510 m/s et de vitesse de cisaillement 1605 m/s. La figure 4.10 représente la courbe du coefficient de réflexion estimée par la méthode HR.

4.3.3 Analyse des résultats

Dans la figure 4.7, on observe une bonne localisation de la source par la méthode haute résolution IGA-VMM-HR sur le domaine de fonctionnement de la méthode IGA-VMM-BR. De plus, conformément à l'étude de performances (cf. paragraphe 4.2), la méthode IGA-VMM-HR permet la localisation précise sur une plus grande plage de distances (jusqu'à 900 m) et sur des durées plus importantes tandis qu'avec la méthode BR, la source n'est localisée que jusqu'à 300 m et seules 5 minutes d'enregistrement sont exploitables. L'erreur quadratique moyenne sur l'estimation de la distance par la méthode IGA-VMM-HR est inférieure à 13 m jusqu'à 500 m de l'hydrophone puis atteint 21 m entre 500 m et 800 m.

L'étude de sensibilité de l'inversion géoacoustique à partir du coefficient de réflexion (cf. paragraphe 3.3) montre que les paramètres d'atténuation sont peu sensibles ; les histogrammes de résultats

présentées en figure 4.9 sont en accord avec cette étude. Nous ne faisons donc pas de comparaison sur ces paramètres.

La méthode IGA-VMM-HR offre un gain en portée de source et nombre d'émissions exploitables sur une durée d'enregistrement donnée. Sur les données de la campagne ERATO 2011, la durée d'enregistrement utile pour l'inversion est doublée (de 5 à plus de 10 min) et la portée des sources localisées triplée (passant d'environ 300 m à 900 m). La méthode HR permet ainsi d'atteindre des rasances plus petites et de décrire notamment la tranche $[10^\circ\text{-}20^\circ]$. Cependant, on note que l'estimation devient également plus bruitée aux angles inférieurs à 15° . Ce bruit peut avoir diverses explications dont les distances source / récepteur grandes devant la hauteur d'eau, une potentielle variation du profil de célérité ou encore une perte d'information fréquentielle sur le coefficient de réflexion due à l'intégration des niveaux des trajets pour son estimation. Les trajets 4 et 5 (trajets réalisant une réflexion fond et une surface) sont très proches dans les conditions de l'expérimentation avec une différence de temps d'arrivée de l'ordre de 2.10^{-3} s. Ils n'étaient pas résolus par les outils de la méthode IGA-VMM-BR tandis que les outils de déformation temporelle permettent la résolution de ces trajets. Ces échos sont donc identifiables sur le signal déformé et leur niveau peut être extrait comme ceux du direct et du premier réfléchi fond. Leur exploitation permet ainsi d'enrichir la description de la deuxième partie de la courbe de coefficient, témoin des couches de sédiment plus profondes.

Les paramètres du fond estimés par la méthode HR diffèrent de ceux estimés en BR. Dans l'inversion BR, le modèle choisi ne comprenait pas de cisaillement. Cela peut expliquer, en partie, les résultats très différents sur le socle. Le socle semble mieux décrit en HR. Il est estimé avec une erreur quadratique moyenne de 0.05 sur l'estimation du coefficient de réflexion moyen. Tout comme le socle estimé par l'ancienne méthode, le socle estimé avec la méthode HR ne correspond pas à la carotte disponible dans la zone, on ne peut donc pas conclure du meilleur résultat. Pour le sédiment, l'épaisseur est équivalente à celle estimée par la méthode BR. La vitesse de compression estimée est plus faible. La différence provient d'une pente plus faible du coefficient de réflexion estimé en HR au niveau de l'angle de rasance limite. L'écart à la vérité terrain donnée par la carotte doit être nuancé car on compare une mesure ponctuelle à une estimation sur un disque d'un rayon de plusieurs centaines de mètres centré sur l'hydrophone. De plus, les résultats correspondent à une "vision" du fond par des fréquences comprises en 1 et 2 kHz. Enfin, la zone présente des zones d'affleurement rocheux très réfléchissants, cohérents avec les paramètres estimés en HR.

4.4 Discussion

Ce chapitre décrit la déclinaison haute résolution (IGA-VMM-HR) de la méthode d'inversion. Il introduit une nouvelle étape de traitement individuel des signaux dans notre méthode d'inversion. Cette étape se situe en amont de l'estimation de la réponse impulsionnelle et met en œuvre des outils de déformation temporelle. L'opérateur de déformation temporelle est adapté au signal analysé - dont il exploite la signature temps-fréquence - ainsi qu'à sa propagation. Il permet de transformer le signal et ses échos en fréquences pures facilement identifiables et exploitables dans le plan temps-fréquence déformé *Jarrot et al. (2006)*. Cet opérateur de déformation temporelle est ensuite appliqué sur une fenêtre glissante sur l'axe temporel du signal initial pour fournir la réponse impulsionnelle du canal entre la source et le récepteur. Ce traitement permet d'obtenir une meilleure résolution de la RI dont découlent les paramètres utilisés pour localiser la source et estimer le coefficient de réflexion. L'ajout de cet outil étend la portée de la méthode en termes de distance et, par conséquent, en termes d'angle de rasance. Le coefficient de réflexion est donc décrit de manière plus complète.

Tout comme sa version BR, cette méthode n'intègre pas la directivité et compense uniformément la vitesse de la source. Dans le cas des mesures ERATO 2011, l'effet Doppler, dû au mouvement de la source, induit des erreurs négligeables devant la résolution intrinsèque des échos dans le plan déformé (décalage Doppler de 2 Hz, estimé avec une vitesse relative de 2 m/s, pour un étalement fréquentiel de 100 Hz).

La méthode IGA-VMM-HR décrite dans ce chapitre a fait l'objet de la publication [Barazzutti et al. \(2016a\)](#).

Hypothèse - Dans ce chapitre, nous avons supposé une bathymétrie plate et une propagation en rayons présentant des trajets non résolus dans le spectrogramme du signal reçu.

Outils - Des outils de déformation temporelle ont été ajoutés en amont de l'estimation de la RI. L'opérateur de déformation (*warping*), basé sur la loi de fréquence instantanée du signal est appliqué sur une fenêtre glissante sur l'axe temporel du signal initial pour fournir la réponse impulsionnelle (RI) du canal entre la source et le récepteur. Tout comme la méthode IGA-VMM-BR, l'estimation des temps d'arrivée des trajets sur la RI permet de déduire la position de la source, l'angle de rasance et les pertes de transmission. L'opérateur de déformation conservant l'énergie, les niveaux des trajets sont directement estimés à partir du signal déformé et permettent une évaluation du coefficient de réflexion.

Résultats principaux - Ces nouveaux outils permettent d'augmenter la portée de la méthode, donc le domaine angulaire couvert, et permettant ainsi une meilleure description du contexte environnemental, notamment des fonds peu réfléchissants. Les résultats de l'inversion par cette méthode HR diffèrent néanmoins des résultats issus de la méthode BR.

Limites et Perspectives - La séparation haute résolution des trajets permet d'envisager l'exploitation des vocalises très basses fréquences, peu directives mais présentant des difficultés en termes de séparation/résolution des échos. Par contre, si malgré les outils de séparation, les trajets restent non séparables, la localisation de la source ne sera plus réalisable avec les moyens décrits dans les chapitres 3 et 4.

TRANSITION

Cette déclinaison HR de la méthode étend le domaine de fonctionnement de la méthode mais que se passe-t-il lorsque malgré l'application des outils de séparation des trajets, ceux-ci ne sont toujours pas séparables ? Il est alors impossible d'identifier les trajets. La localisation de la source est donc compromise. Dans une telle situation, la localisation n'est pas réalisable avec les outils décrits jusqu'à présent dans le manuscrit.

Pour nous rapprocher des signaux pressentis pour notre méthode (modulations hautes fréquences) sans devoir lever le verrou technique de la directivité, nous avons choisi de traiter des modulations plus basses fréquences, donc moins directive. Les données dont nous disposons (émissions de baleines à bosse) nous placent dans la situation de trajets non résolus même après application de la déformation temporelle.

Le chapitre suivant présente donc une nouvelle méthode d'inversion géoacoustique passive dans le cas de trajets non séparés et non séparables avec les outils que nous avons développés.

Inversion géoacoustique passive à partir de sources omnidirectionnelles - réponse impulsionnelle très basse résolution

Sommaire

5.1	Motivation des travaux	110
5.2	Matériel et méthodes	112
5.2.1	La zone des campagnes CABO 2013 et CABO 2015	112
5.2.2	Campagne CABO 2013 - émissions de baleine à bosse	113
5.2.3	Campagne CABO 2015 - <i>Playbacks</i> de baleine à bosse	116
5.3	Outils développés pour la localisation de la source en présence de trajets non séparables	118
5.3.1	Nouvelles hypothèses de travail - nouveaux enjeux techniques	118
5.3.2	Description des outils de localisation de la source	118
5.3.3	Etude de la faisabilité sur données synthétiques	122
5.4	Faisabilité sur des émissions contrôlées représentatives des émissions de baleines à bosse (zone de Punta Ballena)	126
5.4.1	Matériel et méthode : campagne CABO 2015	126
5.4.2	Première analyse à partir de rampes de <i>playback</i> propagée dans l'envi- ronnement de la zone Cabo - campagne CABO 2015	127
5.4.3	Application aux données de <i>playbacks</i> de baleine de la campagne CABO 2015 - émissions contrôlées	134
5.5	Application aux données réelles de la zone Cabo (Punta Gorda) . . .	139
5.6	Discussion	143

Dans ce chapitre, les trajets individuels ne sont pas séparables malgré l'application des outils de séparation haute résolution de la méthode IGA-VMM-HR. Après une description des motivations des travaux (section 5.1), nous présentons donc une nouvelle méthode, dotée d'outils permettant la localisation de la source à partir d'une réponse impulsionnelle dite dégradée (i.e. ne permettant pas l'accès aux trajets individuels). Les outils sont décrits en section 5.3. La méthode est ensuite évaluée sur :

- des données synthétiques : rampes de fréquences synthétiques propagées dans un milieu simplifié constitué de profils de pentes constantes allant de 0% à 10%. L'objectif est de comprendre l'impact de la bathymétrie sur l'algorithme de localisation (section 5.3.3).

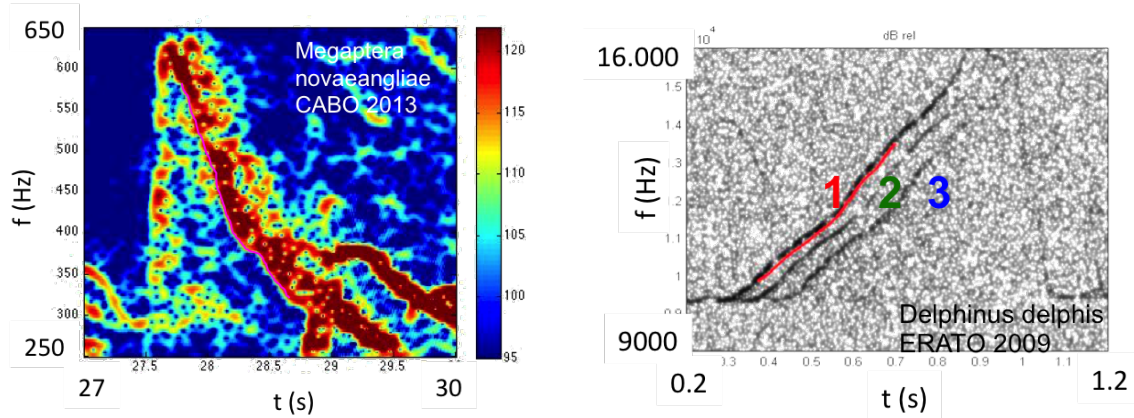


FIGURE 5.1 — A gauche : rampe de fréquence décroissante monotone de 700 à 300 Hz sur 2 s d’une baleine à bosse dans la zone de Cabo San Lucas, candidate à l’inversion par notre schéma d’inversion. A droite : pour rappel, vocalise de dauphin commun de la campagne ERATO 2009 (2.2) présentant une propagation multitrajets. Les deux vocalises présentent une propagation multitrajets. Cependant, les trajets sur la vocalise de baleine à bosse sont difficiles à distinguer tandis qu’on identifie facilement les 3 premiers trajets (numérotés) sur la vocalise de dauphin

- des émissions contrôlées représentatives de signaux de baleines à bosse appelées *Playback*. Pour ces données, une étude préalable sur données simulées équivalentes a été réalisée puis l’algorithme a été évalué sur les émissions de *Playback* (section 5.4).
- une série d’émissions réelles de baleine à bosse (section 5.5).

5.1 Motivation des travaux

Dans les chapitres 3 et 4, une des hypothèses de travail était l’accès aux trajets individuels de propagation de modulation de fréquence de mammifères. Dans le cas d’une propagation multitrajets non résolue, nous avons montré que l’application d’outils de déformation temporelle permet de séparer les trajets individuels. La source est alors localisée à l’aide des différences de temps d’arrivée entre les trajets individuels. Les énergies des trajets sont exploitées pour estimer le coefficient de réflexion en fonction de la rasance. Nous avons également montré, dans le chapitre 2, que l’application du schéma d’inversion à des vocalises de sources hautes fréquences comme les dauphins n’était pas réalisable sans la prise en compte de la directivité, verrou qui a été étudié mais n’a pas été levé dans le cadre de la thèse.

Dans ce chapitre, nous essayons de nous approcher totalement de la source ciblée pour notre schéma d’inversion (vocalise de dauphin) tout en continuant à nous affranchir de la directivité. Les vocalises de baleines à bosse, plus basses fréquences, sont pour cela de bonnes candidates.

Nous disposons d’un jeu de données comprenant des émissions de baleines à bosse ; la campagne d’acquisition de ces données (CABO 2013) est décrite dans le paragraphe 5.2. L’analyse de ce jeu de données a permis d’identifier des modulations de fréquence présentant une propagation multitrajets. Un exemple d’une de ces modulations est présenté en figure 5.1 à gauche. On observe une rampe de fréquence décroissante monotone de 700 à 300 Hz sur moins de 2 s. A droite de la figure 5.1 est présentée une vocalise de dauphin d’ERATO 2009, signal candidat, à l’origine des travaux (cf. section 2.2). Les deux vocalises présentent une propagation multitrajets, cependant, les trajets sur la vocalise de baleine à bosse sont difficiles à distinguer tandis qu’on identifie facilement les 3 premiers trajets (numérotés) sur la vocalise de dauphin.

L’intérêt des vocalises basses fréquences est qu’elles sont supposées moins directives que les hautes

fréquences. Comme la propagation multitrajets n'est pas bien résolue dans le plan temps-fréquence du signal (cf. figure 5.1), nous allons appliquer l'algorithme avec séparation haute résolution (outils décrits dans le chapitre 4) sur une de ces vocalises, considérée comme omnidirectionnelles. La trace de la vocalise est sélectionnée à partir du premier trajet (courbe blanche sur le spectrogramme de la figure 5.2). Elle permet de construire la loi de déformation temporelle qui est ensuite appliquée sur une fenêtre glissante le long du signal d'origine (de 11 s à 12.5 s dans la figure 5.2). Nous estimons ainsi la réponse impulsionnelle du canal à partir de laquelle sont estimés les temps d'arrivée des trajets (croix rouges sur la RI sur la figure 5.2). Les trajets identifiés sont retracés en rose sur le spectrogramme de la vocalise.

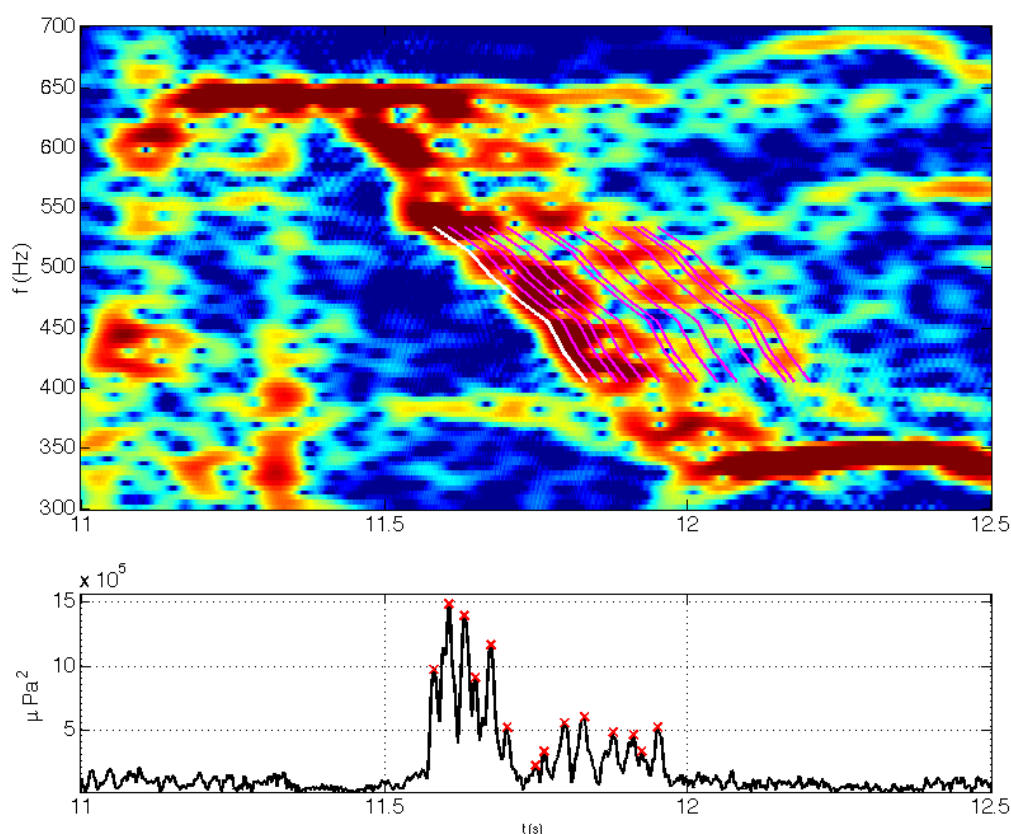


FIGURE 5.2 – En haut : spectrogramme d’une vocalise de baleine à bosse. En bas : RI estimée par application de la méthode IGA-VMM-HR (voir chapitre 4). La trace de la vocalise est sélectionnée à partir du premier trajet (courbe blanche sur le spectrogramme). Elle permet de construire la loi de déformation, temporelle qui est ensuite appliquée sur une fenêtre glissante le long du signal d’origine (soit de 11 s à 12.5 s). Nous estimons ainsi la réponse impulsionnelle du canal (courbe du bas) qui permet d’obtenir les temps d’arrivée des trajets (croix rouges sur la RI). Les trajets identifiés sont retracés en rose sur le spectrogramme de la vocalise

On cherche ensuite à localiser la source avec la méthode IGA-VMM-HR, sous les mêmes hypothèses et avec les outils décrits dans le chapitre 4. Les deux premières différences de temps d’arrivée sont exploitées selon [Aubauer et al. \(2000\)](#) pour localiser la source. Il existe une ambiguïté car deux différences de temps ne permettent pas d’identifier le deuxième arriv (est-ce le premier réfléchi fond ou le premier réfléchi surface?). On conserve les deux possibilités mais malgré tout aucune position ne vérifie ces différences de temps d’arrivée. **Que se passe-t-il ??** Tout d’abord, contrairement aux données recueillies dans le Golfe du Lion, la bathymétrie de la zone CABO présente une variabilité avec, certes, un simili plateau entre la côte et l’hydrophone, mais avec également une chute rapide de la bathymétrie

au-delà (cf. figures 5.3 et 5.5 de la section 5.2). De plus l'hydrophone est très près du fond (à 5 m) ce qui rapproche déjà *a minima* le trajet direct et le premier réfléchi surface. Il est possible, aux portées de sources telles que celles des baleines à bosse, que les trajets individuels ne soient pas séparés même après l'application des traitements de séparation haute résolution de la méthode IGA-VMM-HR.

Nous sommes donc en fait en présence d'une propagation "multipaquets" et non plus "multitrajets". La RI donne accès à des groupes de trajets dans lesquels il n'est pas possible de connaître *a priori* l'identité des trajets composant le groupe. Il va ainsi falloir revoir la méthode d'inversion à commencer par la localisation qui reposait sur l'accès aux 3 premiers trajets individuels (*a minima*) et l'utilisation de relations géométriques sous les hypothèses d'un canal isocélère sur fond plat.

5.2 Matériel et méthodes

Je dispose d'un jeu de données enregistrées en 2013 dans la région de Cabo San Lucas par des équipes de l'institut océanographique du Scripps¹ (Californie, USA) et de l'université autonome de Baja California Sur² (La Paz, Mexique). L'équipe du Scripps m'a également fourni un jeu de données dites de *Playback* enregistrées en 2015 dans la même région de Cabo San Lucas. La zone d'étude ainsi que les deux jeux de données sont présentés dans les paragraphes suivants.

5.2.1 La zone des campagnes CABO 2013 et CABO 2015

La baie de San Lucas est une aire marine protégée. Dans ces travaux de thèse, [Jiménez-López \(2006\)](#) présente les enregistrements de baleines à bosse dans cette zone durant l'année 2004. Sa thèse s'inscrit dans un projet appelé "Structure de la population, des niveaux d'abondance et de la Condition des baleines à bosse" (SPLASH) visant à étudier les baleines à bosse. Des observations visuelles ont été conduites en parallèle des enregistrements (*passive acoustic monitoring*) ainsi que des mesures environnementales (météorologiques et océanographiques).

La zone est considérée comme une zone de transition avec une structure océanographique très dynamique et complexe. [Jiménez-López \(2006\)](#) a notamment étudié l'abondance, la répartition et la composition des groupes (mère avec petit, chanteurs isolés, etc.). [Jiménez-López \(2006\)](#) a réalisé les images de la figure 5.3 qui permettent de visualiser la bathymétrie dans la zone en 3 classes de profondeurs (A) et en termes de distance à la côte (B). La zone de Punta Gorda est la zone de la campagne CABO 2013 (acquisition de signaux de baleines à bosses).

Le Scripps dispose de profils de températures mesurés en 2015 sur la zone et notamment au point Punta Gorda. Un profil mesuré en février est illustré en figure 5.4. Ces relevés sont faits manuellement (un opérateur met à l'eau à son rythme un capteur). Ce profil est donc peu précis mais permet d'avoir une idée de la célérité dans la zone.

L'équipe du SCRIPPS nous a fourni des cartes bathymétriques de résolution 1/20.000 et 1/100.000 rasterisées mais elles ne couvrent pas le point de mouillage de l'hydrophone que l'on utilise (celui de Punta Gorda) pour la campagne CABO 2013. J'ai donc téléchargé la bathymétrie GEBCO à la résolution de 30 secondes d'arc (*The GEBCO 2014 Grid*, www.gebco.net). La bathymétrie ne permet pas de décrire assez finement la zone (30 secondes d'arc équivalent à un peu moins d'1 km à ces latitudes). A cette résolution, il n'est pas possible d'avoir exactement les hauteurs d'eau sous les hydrophones telles que relevées par l'équipe du SCRIPPS.

La figure 5.5 présente la zone de Cabo San Lucas en isobathes ainsi que la position des deux hydrophones que nous allons utiliser dans les travaux présentés dans ce chapitre : celui de Punta Ballena pour les données de *Playback* de la campagne CABO 2015 et celui de Punta Gorda pour les signaux réels de la campagne CABO 2015.

1. A. Thode & K. Seger

2. J. Urbán, P. Martínez-Loustalot, M. E. Jiménez-López, D. López-Arzate & al

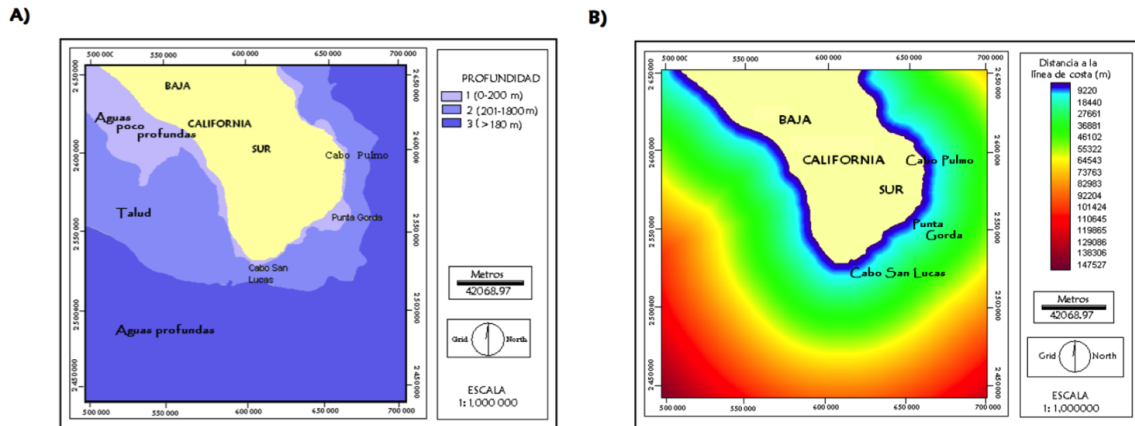


FIGURE 5.3 – Images extraites de [Jiménez-López \(2006\)](#) présentant les traitements de données bathymétriques effectués par [Jiménez-López \(2006\)](#) à partir d'une carte bathymétrique de l'Institut national de la statistique géographique et informatique (INEGI, carte des "Iles Revillagigedo" Key CB- 006, échelle 1 : 1000 000) et permettant de visualiser 3 classes de profondeurs (A) et la distance à la côte (B). La zone de Punta Gorda est la zone de la campagne CABO 2013

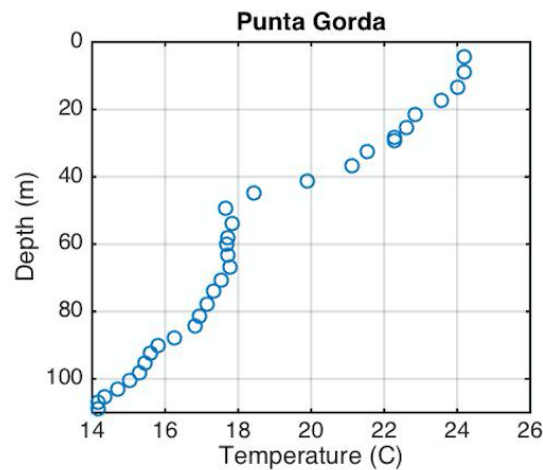


FIGURE 5.4 – Profil de célérité mesuré in situ en février 2015 par les équipes de l'institut océanographique du Scripps et de l'université autonome de Baja California Sur au niveau de Punta Gorda (Courtesy of K. Seger)

5.2.2 Campagne CABO 2013 - émissions de baleine à bosse

La campagne CABO 2013 avait pour objectif l'enregistrement d'émissions de baleines à bosse présentes dans la baie de San Lucas. Ces données ont été utilisées dans le cadre du monitoring de ces mammifères marins par acoustique passive (voir notamment [Jiménez-López, 2006](#); [Seger et al., 2016](#)).

Plusieurs hydrophones ont été placés à environ 5 m du fond le long de la côte. L'hydrophone utilisé dans nos travaux est indiqué par un carré sur la figure 5.5, il est mouillé dans 108 m d'eau à un point

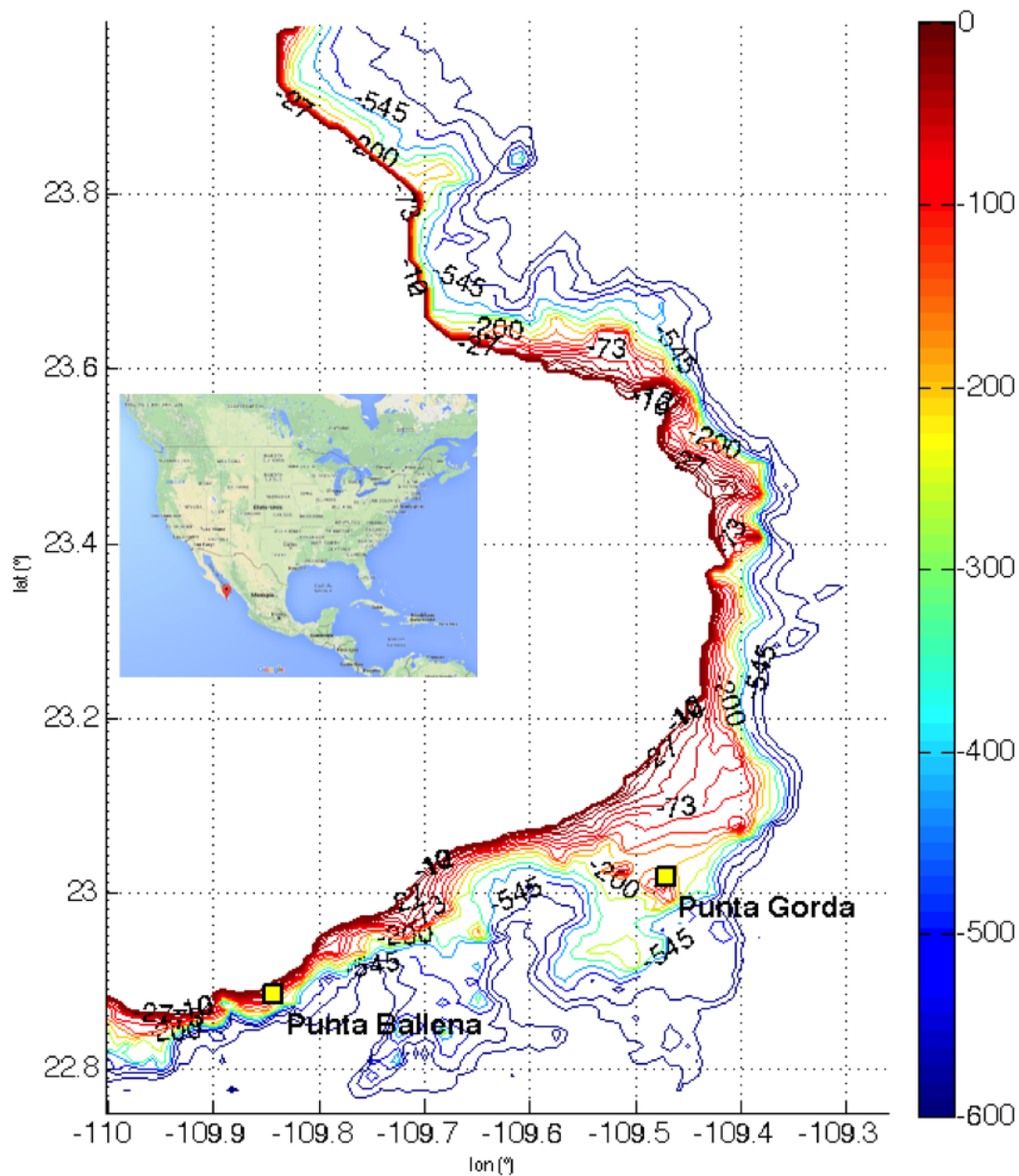


FIGURE 5.5 – Environnement bathymétrique de la zone de Cabo San Lucas à la résolution de 30 secondes d’arc (source : *The GEBCO 2014 Grid*, www.gebco.net). Les hydrophones sont tous les 2 placés à 5 m du fond et représentés par un carré jaune. Punta Ballena correspond aux données de la campagne CABO 2015 et Punta Gorda à la campagne CABO 2013.

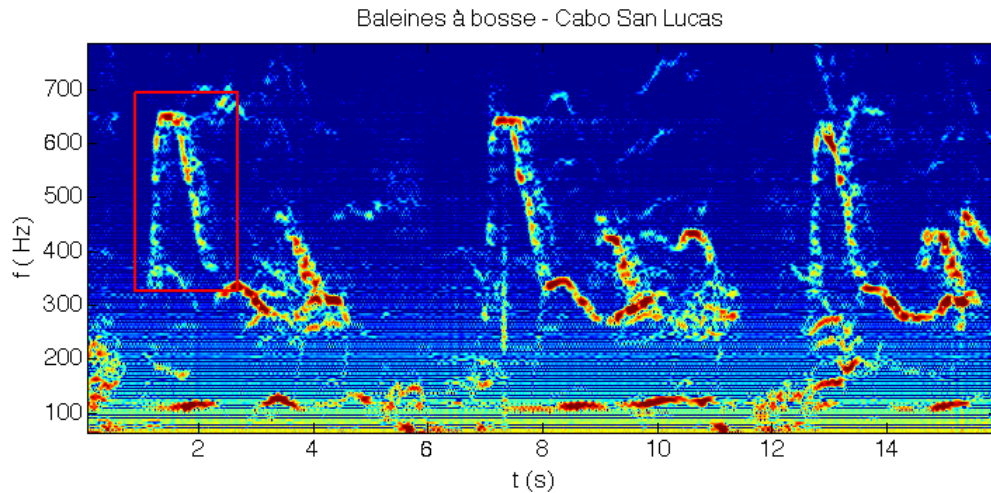


FIGURE 5.6 – Répétition d'un *song unit* d'un chanteur isolé dans la zone de CABO - 2013 (K. SEGER, communication personnelle). Le motif est la modulation de fréquence encadrée en rouge que l'on retrouve 3 fois dans cet extrait. *Courtesy of : Scripps Institution of Oceanography & Universidad Autónoma de Baja California Sur*

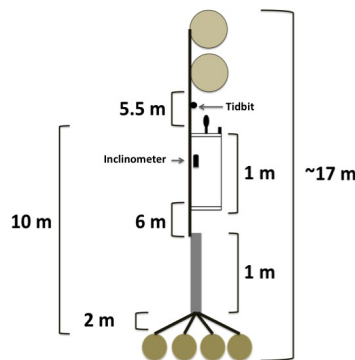


FIGURE 5.7 – Dispositif de mouillage de l'hydrophone (K. Seger, communication personnelle)

nommé Punta Gorda. Le dispositif de mouillage est présenté en figure 5.7. Des mesures de vent, de marée et de température ont été réalisées durant la campagne par les équipes (K. Seger, communication personnelle et documents de travail). Cet hydrophone a enregistré des vocalises de mammifères marins telles que celles présentées dans la figure 5.6. On y observe des émissions de baleine à bosse dans la bande 0-800 Hz et plus particulièrement, on peut observer la répétition d'une unité de chant (*song unit*) d'un même individu (chanteur isolé, cf. K. Seger, communication personnelle) encadrée en rouge. Ces unités de chant sont des rampes de fréquence entre 300 et 700 Hz de durée environ une seconde. On devine sur ces rampes de fréquence une propagation multitrajets à leur réception.

Nous disposons donc de rampes de fréquence basses fréquences de mammifères marins, présentant une propagation multitrajets visible mais non résolue dans la RTF du signal reçu. Cependant, la position de l'hydrophone, très près du fond, réduit drastiquement les différences de temps d'arrivée et rend difficile l'exploitation de ces signaux.

5.2.3 Campagne CABO 2015 - *Playbacks* de baleine à bosse

En 2015, une équipe du SCRIPPS a effectué une campagne d'émissions représentatives de vocalises de baleines à bosse dans la zone de Cabo San Lucas. Ces émissions sont appelées *playbacks* dans la suite. Une source omnidirectionnelle était immergée manuellement par un opérateur à certains points géolocalisés, présentés par des triangles blancs numérotés "WPxxx" dans la figure 5.8. L'hydrophone utilisé est celui de Punta Ballena localisé au point de coordonnées [22.88413 N ; -109.84315W] et placé à 5 m du fond dans la bathymétrie GEBCO. Il est matérialisé par un carré jaune sur la figure 5.8. Comme pour la campagne CABO 2013 présentée précédemment, nous disposons de la bathymétrie GEBCO téléchargée à la résolution de 30 secondes d'arc (*The GEBCO 2014 Grid*, www.gebco.net).

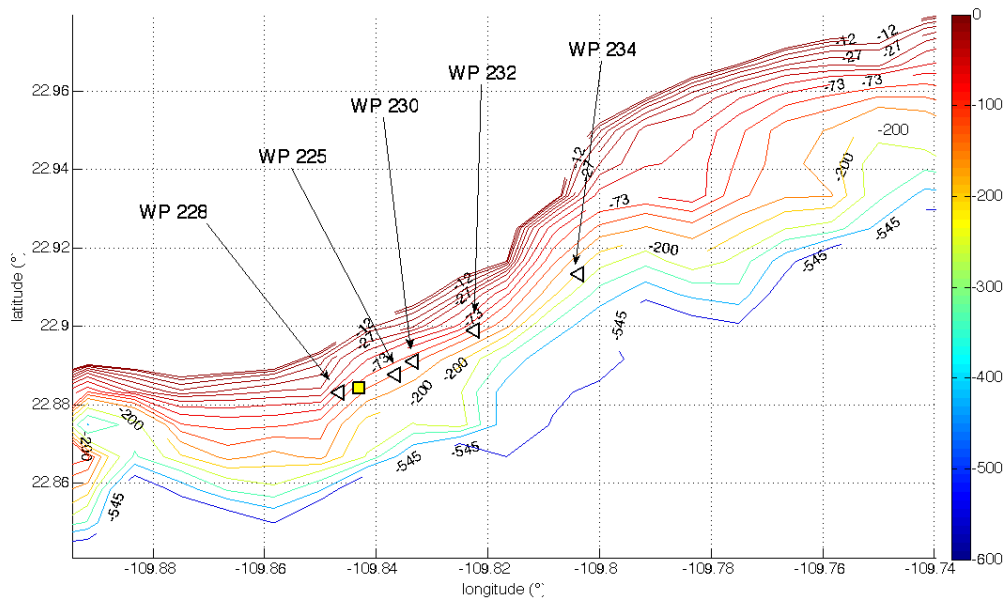


FIGURE 5.8 – Zone de Cabo San Lucas zoomée autour du point Punta Ballena. L'hydrophone de Punta Ballena est indiqué par le carré jaune, mouillé à 5 m du fond aux coordonnées [22.88413 N ; -109.84315W]. Les points géolocalisés auxquels des rampes de fréquence ont été émises (bathymétrie : *The GEBCO 2014 Grid*, www.gebco.net) sont représentés par des triangles blancs numérotés WPxxx

A chaque point GPS, la source émettait une rampe linéaire de fréquences de durée 8 s sur la bande de 100 Hz à 1000 Hz, l'objectif étant d'émettre des signaux représentatifs des vocalises de baleines à bosse observées dans la zone. Le spectrogramme de signaux émis à 1.33 km de l'hydrophone de Punta Ballena est présenté en figure 5.9.

Le relevé des mesures est détaillé dans le tableau fourni par K. Seger (tableau 5.1) avec l'heure de début de séquence d'émissions, la position WP et la distance à l'hydrophone lorsqu'elle a été relevée par les opérateurs.

Ce jeu de données offre des émissions contrôlées, proches des vocalises de mammifères marins basses fréquences que l'on souhaite exploiter, propagées dans le milieu réel de la zone de Cabo San Lucas. Par contre, les réponses impulsionnelles sont courtes dans l'environnement autour de Punta Ballena et nous disposerons de peu de paquets pour appliquer la méthode IGA-VMM-BF. Ce point sera étudié à travers l'étude préliminaire de signaux synthétiques équivalents aux émissions de *playbacks* et propagés dans le même environnement, simulé par BELLHOP[®] (voir paragraphe 5.4.2). L'application de la méthode IGA-VMM-BF aux données de *playbacks* est décrite dans la

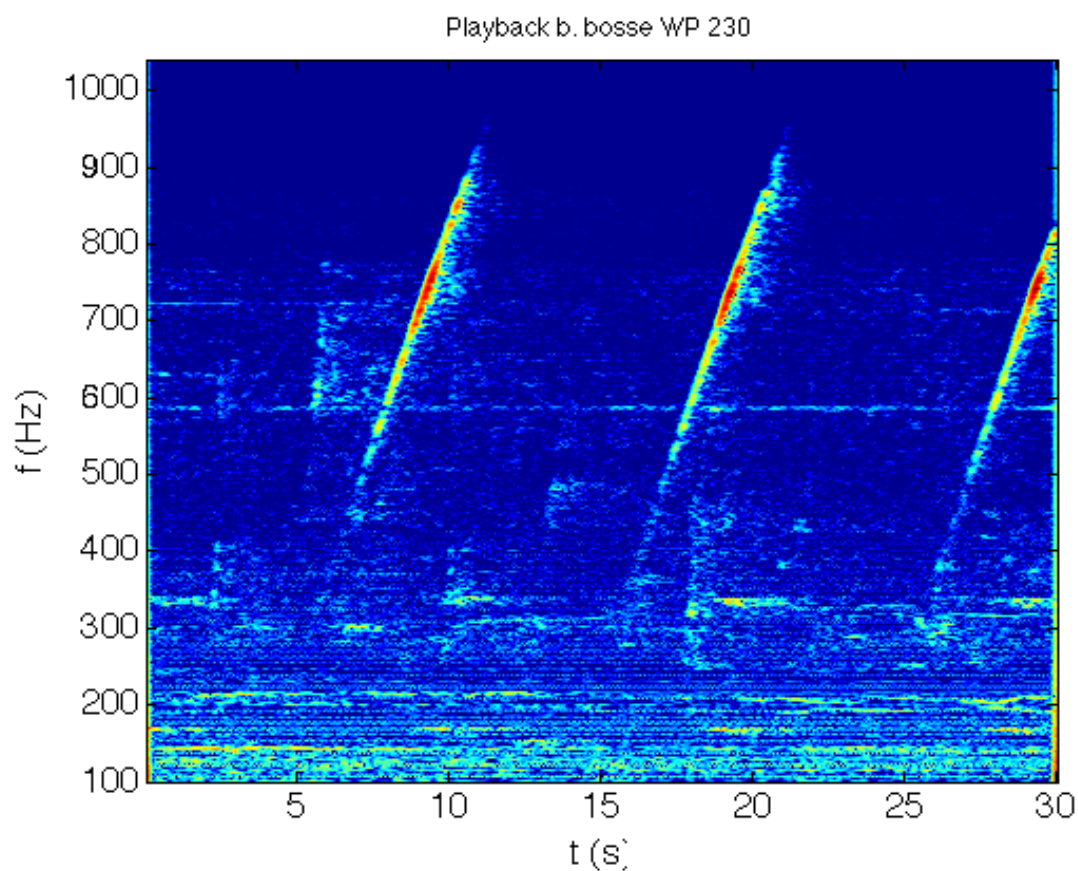


FIGURE 5.9 – Signal reçu sur l’hydrophone de Punta Ballena correspondant à une rampe linéaire de fréquences entre 100 Hz et 1000 Hz de 8 s de durée émise au point géolocalisé WP 230 (*Courtesy of Scripps*)

■ section 5.4.

heure	numéro du point WP	distance de l’hydrophone
15 : 50	225	<i>non notée</i>
16 : 05	228	<i>non notée</i>
16 : 16	230	1.33 km
16 : 28	232	2.71 km
16 : 42	234	5.72 km

TABLE 5.1 – Mesures effectuées le 4 février 2015 (début 15h48) dans la zone nommée Punta Ballena (*Courtesy of Kerri SEGER*)

5.3 Outils développés pour la localisation de la source en présence de trajets non séparables

5.3.1 Nouvelles hypothèses de travail - nouveaux enjeux techniques

Jusqu'à présent, les données utilisées étaient recueillies dans un environnement bathymétrique considéré comme plat avec une célérité considérée comme constante. La localisation de la source pouvait ainsi être faite grâce aux relations analytiques reliant la géométrie source-récepteur (distance, profondeurs et angles) et les différences de temps d'arrivée ([Aubauer et al., 2000](#)). Dans ce chapitre, nous prenons en compte la bathymétrie variée ainsi que le profil de célérité non constant de la zone de Cabo San Lucas (voir section 5.2). On ne dispose donc plus de relations analytiques simples entre les temps d'arrivée et la position de la source. La localisation de la source nécessite donc le développement d'un nouvel algorithme de localisation.

Nous supposons toujours que le signal est une modulation de fréquence présentant à la réception une propagation multitrajets mais cette propagation n'est pas résolue dans le spectrogramme, même après application des outils de séparation haute résolution de la méthode IGA-VMM-HR (cf. chapitre 4). Contrairement à ce qui a été présenté pour les méthodes BR et HR, les trois premiers arrivés ne peuvent pas être distingués. La nouvelle méthode devra donc permettre d'extraire les caractéristiques nécessaires à la localisation de la source et à l'inversion sans les trois premiers trajets résolus.

Ce qui ne change pas par rapport aux méthodes précédentes ? Un seul capteur est utilisé.

La méthode dotée des outils présentés dans ce chapitre sera nommée IGA-VMM-BF pour Inversion GéoAcoustique à partir de Vocalises de Mammifères Marins Basses Fréquences.

5.3.2 Description des outils de localisation de la source

Remarques préliminaires :

1. *L'illustration des étapes de l'algorithme est faite à l'aide d'un signal synthétique représentatif d'une émission de baleine à bosse : une rampe de fréquence croissante de 400 et 600 Hz de durée 0.2 s émise par une source située à 2 km de l'hydrophone et 30 m de profondeur. Le signal est créé à l'aide d'un code personnel MATLAB[®] puis propagé dans l'environnement simulé de la zone CABO autour de l'hydrophone de Punta Gorda à l'aide de l'outil BELLHOP[®]³. La figure 5.10 présente le signal reçu (après propagation) par un hydrophone situé à 5 m du fond comme c'est le cas pour les données de CABO 2013. Dans la bathymétrie GEBCO à la résolution de 30 s d'arc (The GEBCO 2014 Grid, www.gebco.net), l'hydrophone est positionné à 5 m du fond, dans 143 m de fond.*
2. *Nous ne décrivons ici que les traitements qui diffèrent des méthodes IGA-VMM-BR et IGA-VMM-HR présentées dans les chapitres précédents.*

1 et 2 - Le tracking de la signature - Le tracking de la signature temps-fréquence de la vocalise est réalisé dans le plan temps-fréquence du signal avec les mêmes outils que ceux décrits dans les chapitres 3 et 4.

3 et 4 - Séparation HR et estimation de la RI - Pour optimiser la séparation des paquets (i.e. limiter le nombre de trajets par paquets), nous appliquons les outils de séparation HR basés sur les déformations temporelles comme décrits dans le chapitre 4. Pour rappel, la piste de la vocalise permet de construire la loi de déformation temporelle. Cette déformation temporelle est appliquée sur une

3. Modèle de tracer de rayons pour la prédiction des champs de pression acoustique

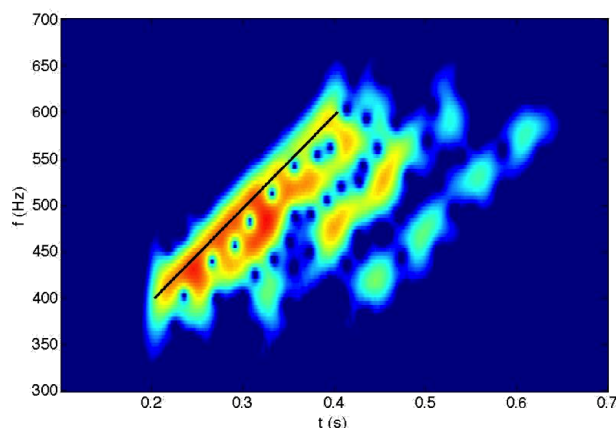


FIGURE 5.10 – Rampe de fréquence croissante de 400 et 600 Hz de durée 0.2 s émise par une source située à 2 km de l'hydrophone et 30 m de profondeur et reçu sur un hydrophone situé à 5 m du fond dans 143 m d'eau

fenêtre glissante le long de l'axe temporel du signal d'origine. Aux instants correspondant aux temps d'arrivées des échos, le signal $s(t)$ est transformé en fréquence pure à la fréquence de déformation f_i . En intégrant, à la fréquence de *warping*, l'énergie de la représentation temps-fréquence du signal déformé, on obtient la RI du canal entre la source et le récepteur.

Sur la figure 5.11, l'image du haut présente le spectrogramme du signal synthétique d'illustration (cf. remarque préliminaire 1). À l'œil nu, 4 trajets ressortent du spectrogramme (indiqués par des flèches blanches). La RI basse résolution (RI BR tracée dans l'image centrale) confirme ces 4 arrivées. Pourtant, après application des outils de déformation temporelle, la RI haute résolution (RI HR présentée dans l'image du bas) indique la présence de plus de trajets avec notamment 3 trajets cachés dans les arrivées 2 et 3, détectés sur la RI BR.

On se concentre sur la zone encadrée en jaune sur la RI haute résolution présentée en bas dans la figure 5.11. Cette zone isole les 4 premiers temps d'arrivée détectés en HR. Comme le signal est synthétique, on connaît la réponse impulsionnelle théorique du canal. La figure 5.12 superpose cette RI théorique (pics bleus) avec les arrivées détectées (pics rouges) sur la RI HR mesurée à l'aveugle avec notre algorithme. On constate que sous le premier temps d'arrivée mesuré se cachent en fait plusieurs trajets individuels. Les arrivées détectées sur la RI HR ne sont que des paquets d'arrivées et non des arrivées individuelles. Utiliser les trois premiers temps d'arrivée en pensant qu'il s'agit de trois premiers trajets individuels entraînera une mauvaise estimation de la position de la source. La RI supposée haute résolution est en fait une RI que l'on nommera "dégradée" par la suite, ne permettant pas d'accéder aux trajets individuels.

5 - Localisation de la source - Pour estimer la position de la source, nous proposons d'exploiter tout de même les temps d'arrivée des paquets (paquets de trajets individuels non identifiés), sans a priori sur la composition de ces paquets. On se place dans le cadre de validité de l'approximation de la propagation acoustique en rayons. [Tiemann et al. \(2006\)](#) estiment la RI du canal à partir des clics de cachalots reçus présentant des multitrajets résolus, puis la comparent à une collection de RI simulées pour une collection de positions (r,z) sur différents profils bathymétriques autour de l'hydrophone. Comme dans [Tiemann et al. \(2006\)](#) et contrairement à la méthode IGA-VMM-BR (et HR) dans laquelle la localisation se faisait par *multipath ranging*, la localisation des sources basses fréquences traitées dans ce chapitre va être réalisée par *acoustic modelling* (voir section 2.1.2.1). La RI dégradée mesurée va donc être comparée à une série de RI simulées correspondant à des signaux propagés dans un environnement simulé représentatif de la zone d'enregistrement (en termes de bathymétrie et de célérité), à partir de sources réparties dans cet environnement, selon une grille [distance r , profondeur

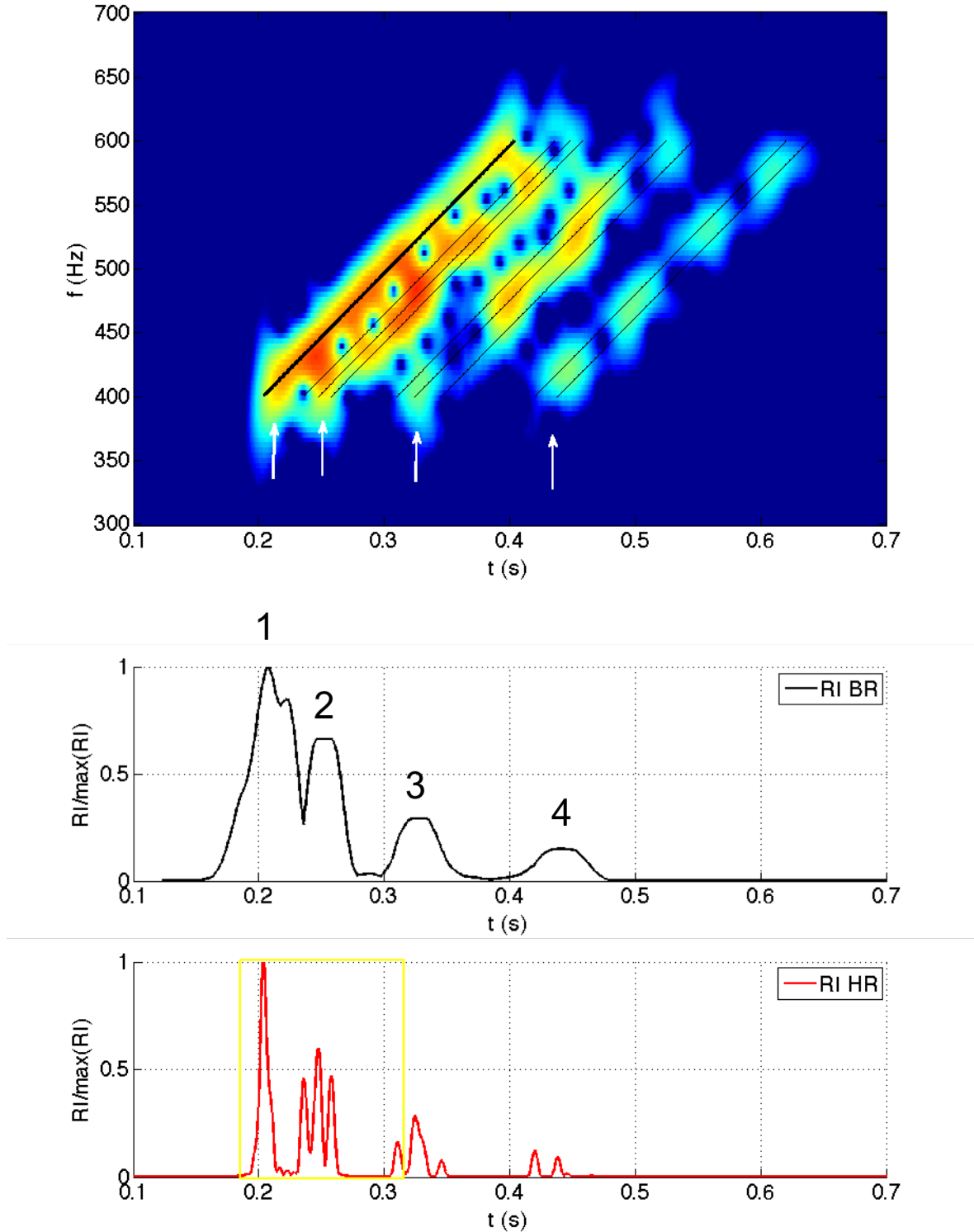


FIGURE 5.11 – En haut : spectrogramme du signal synthétique (cf. remarque préliminaire 1) A l’œil nu, 4 trajets ressortent du spectrogramme (indiqués par des flèches blanches). La RI basse résolution (RI BR) dans l’image centrale confirme ces 4 arrivées numérotées. Pourtant, après application des outils de déformation temporelle, la RI haute résolution (RI HR) présentée dans l’image du bas indique la présence de plus de trajets avec notamment 3 trajets cachés dans les arrivées 2 et 3 détectés sur la RI BR. Le second pic détecté en BR contient en réalité 3 pics que la méthode HR permet de détecter. La zone encadrée isole les 4 premiers temps d’arrivées détectés en HR pour la suite de l’analyse.

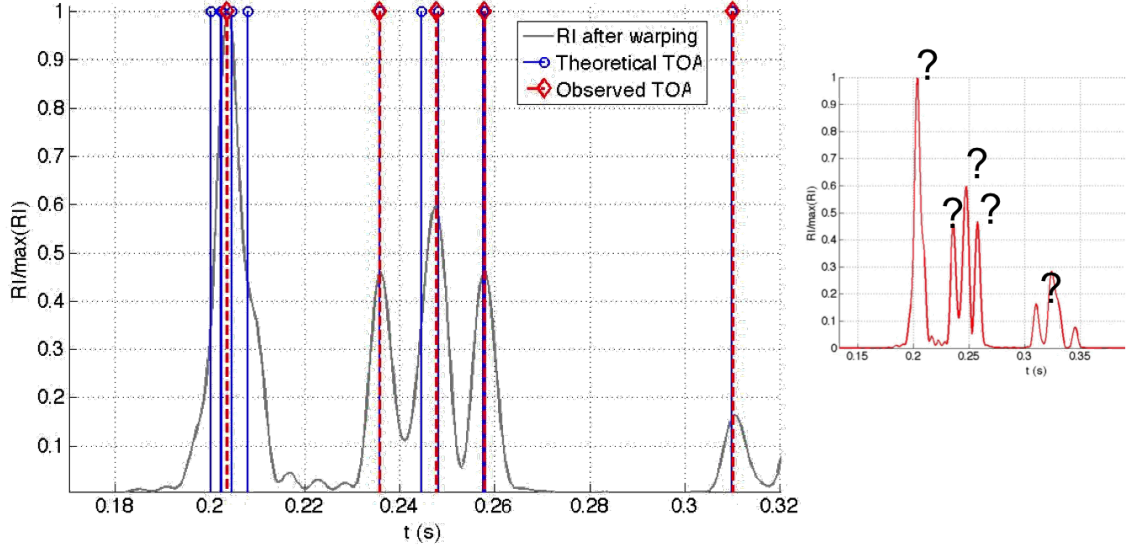


FIGURE 5.12 – Superposition de la RI théorique du signal synthétique (pics bleus) avec les arrivées détectées (pics rouges) sur la RI HR mesurée à l'aveugle avec les outils que nous avons développés pour la méthode IGA-VMM-HR. On constate que sous le premier temps d'arrivée mesuré se cachent en fait plusieurs trajets individuels. Les arrivées détectées sur la RI HR ne sont que des paquets et non des trajets individuels

z , azimuth p].

L'estimation de la meilleure position possible s'apparente à une méthode de *matched-impulse response*. Néanmoins, à la différence de [Tiemann et al. \(2006\)](#), nous ne disposons que d'une réponse impulsionnelle dégradée dans laquelle les trajets individuels ne sont pas accessibles. Il nous faut donc pouvoir comparer des RI théoriques, pour lesquelles les trajets individuels sont identifiés mais non regroupés en paquets, avec une RI mesurée, pour laquelle des trajets individuels non identifiés sont regroupés en paquets.

Pour chaque RI simulée, on associe donc les trajets théoriques toa_i au paquet observé le plus proche tp_m . On crée ainsi des couples $(toa_{i,m}, tp_m)$. Le temps d'arrivée d'un paquet est ensuite estimé comme la moyenne des temps d'arrivée des trajets le constituant.

Ne connaissant pas le contenu des paquets observés, il n'est pas possible de positionner directement le premier trajet simulé par rapport au premier paquet observé. On optimise donc le positionnement relatif de chaque RI simulée avec la RI observée en estimant le décalage $\delta = tp_1 - toa_1$ minimisant l'écart entre le temps moyen d'arrivée des trajets associés à un paquet et le temps d'arrivée observé du paquet (cf. équation 5.1).

δ_{opt} est donc estimé dans $[0 : tp_2 - tp_1]$ tel que :

$$\min_{\delta} \sum_j \left(\frac{\sum_i toa_{i,j}}{N_j} - tp_j - \delta \right)^2 \quad (5.1)$$

avec $toa_{i,m}$ les trajets théoriques associés au paquet n° m et N_m le nombre de ces trajets. Chaque RI simulée est ainsi positionnée de manière optimale et se voit attribuer le coût $C_{r,z,p}$:

$$C_{r,z,p} = \sum_j \left(\frac{\sum_i toa_{i,j}}{N_j} - tp_j - \delta_{opt} \right)^2 \quad (5.2)$$

La RI qui minimise ce coût représente la position optimale de la source dans le plan (distance r , profondeur z , azimuth p). Sont exclues automatiquement par l'algorithme, les RI trop courtes et les RI qui ne permettent pas d'associer au moins un trajet individuel à chaque paquet.

5.3.3 Etude de la faisabilité sur données synthétiques

Pour comprendre l'apport de la bathymétrie sur l'estimation de la position de la source en 3 dimensions, nous avons tout d'abord évalué l'algorithme de localisation dans un cas plus simple que l'environnement Cabo, avec des profils de pente constante.

Pour une première évaluation de la méthode IGA-VMM-BF, nous avons construit un environnement synthétique très simplifié constitué de 11 profils de pentes allant de 0% à 10%. L'hydrophone est placé à 5 m du fond dans 108 m d'eau. Ce milieu est représenté en figure 5.13 avec l'hydrophone indiqué par un carré jaune et les profils tracés en noir. Pour l'algorithme de localisation, on crée une collection de RI théoriques avec l'outil BELLHOP[®] pour des sources positionnées sur une grille construite avec :

- des distances de 200 m à 10 km avec un pas adaptatif à 5% de la distance (cela signifie qu'entre une valeur et la suivante, il y aura 5% d'écart soit 300 m à 6 km) ;
- pour chaque distance, 20 niveaux d'immersion évalués de 2 m jusqu'à 2 m du fond ;
- 11 profils allant de 0% à 10% de pente, découpés en distance et profondeur comme indiqués dans les points précédents.

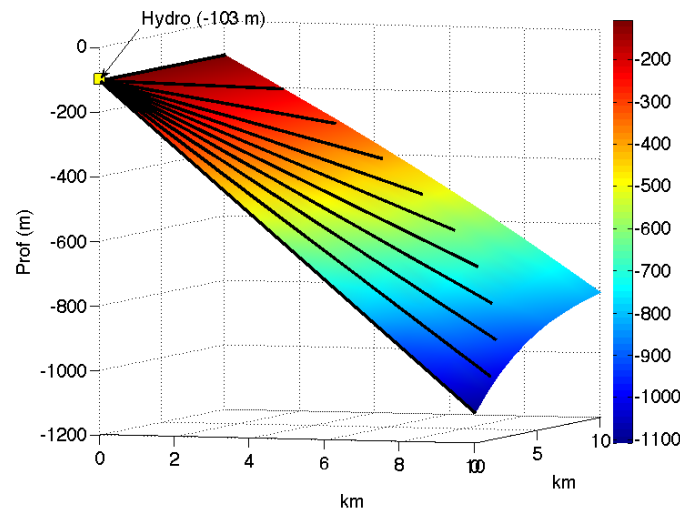


FIGURE 5.13 – Environnement synthétique constitué de profils de pentes droites de 0 % à 10 %. Les profils passent tous à 5 m sous l'hydrophone (carré jaune) et sont tracés en noir

Nous créons une rampe de fréquence entre 400 et 600 Hz de durée 0.2 seconde via un code personnel MATLAB[®] (cf. remarques préliminaires section 5.3).

Mêmes combinaisons de trajets, mêmes différences de temps d'arrivée : Impact de la bathymétrie - La source est positionnée à 1 km de l'hydrophone et 30 m de profondeur. Le signal est capté sur l'unique hydrophone, placé à 5 m du fond, après propagation dans le milieu synthétique à l'aide de l'outil BELLHOP[®].

Nous appliquons la méthode IGA-VMM-BF décrite dans la section 5.3.2 au signal reçu. La RI dégradée est obtenue après application des outils de déformation temporelle et permet d'estimer les temps d'arrivée des paquets. Cette RI dégradée mesurée est ensuite comparée à une collection de 2934 RI

théoriques simulées avec l'outil BELLHOP[®]. Le coût en fonction de la RI de la collection est représenté dans la figure 5.14 avec le coût en ordonnées et le numéro de la RI théorique (donc de la position r , z , p) en abscisses. Sur cette courbe de coût sont marqués d'une étoile rose les 5 premiers minima locaux. Les zones sans valeurs correspondent aux RI exclues par l'algorithme de localisation (RI trop courtes ou ne permettant pas d'associer au moins un trajet individuel à chaque paquet). La position de la source est estimée à 990 m de distance et 32 m de profondeur sur le profil de 1 %, ce qui est une bonne estimation réalisée à partir de la RI dégradée et étant donnée la grille d'évaluation basse résolution.

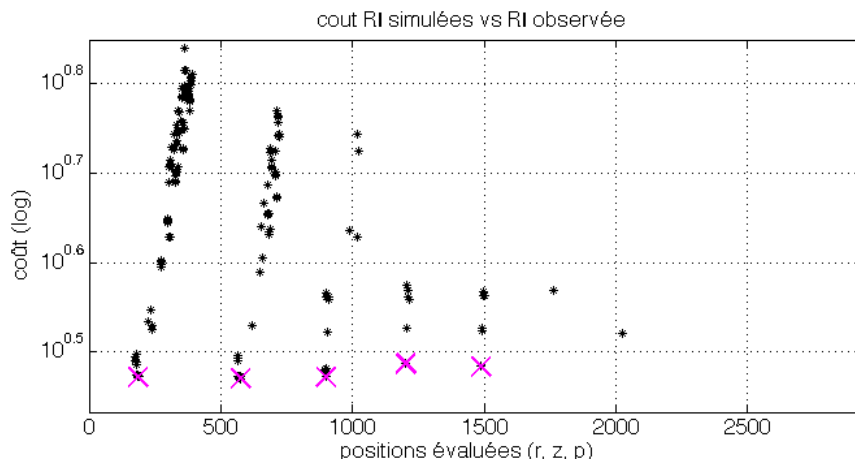


FIGURE 5.14 – Courbe du coût en fonction de la position théorique (r , z , p) évaluée (cf. équation 5.2) pour la localisation de la source située à 1 km et 30 m de profondeur après réception du signal propagé dans l'environnement synthétique (figure 5.13), sur un unique capteur. La collection des RI simulées permettant la localisation contient 2934 RI théoriques représentées par leur indice en abscisse. Les 5 premiers minima sont marqués d'une croix rose. Les RI sans valeurs correspondent aux RI exclues par l'algorithme de localisation

Observons les 5 meilleures positions tracées dans le plan distance / profil (à gauche) et dans le plan distance / profondeur (à droite) en figure 5.15 ainsi que les RI correspondantes tracées en figure 5.16. Les RI théoriques des 5 meilleures positions de la 1^{ère} (en haut) à la 5^{ème} (en bas) sont synchronisées sur le même axe temporel. On constate qu'elles présentent toutes des paquets de trajets constitués du même nombre de trajets. Les meilleures positions estimées se situent entre les positions [896 m, 29 m, 0 %] et [1337 m, 40 m, 3 %], restent dans un secteur de pentes consécutives et ne sont pas dispersées sur des profils non consécutifs. Un même espacement de paquets conduit à une bonne estimation de la position de la source sur le profil de 1 % (1^{ère} ligne en haut). Par contre, sur les profils contigus, cet espacement correspond à une source plus proche sur la pente de 0 % (pente plus faible) et à une source plus éloignée sur la pente plus forte de 2 % (respectivement 2^{ème} et 3^{ème} ligne).

Travailler avec une RI dégradée signifie que les N trajets d'arrivée sont répartis dans M paquets observés. D'une pente à l'autre, les mêmes différences de temps d'arrivée de paquets et mêmes combinaisons de groupes d'arrivées correspondent à des positions différentes. Sur la figure 5.15, on observe bien une trajectoire de dégénérescence de l'algorithme dans le plan distance / pente, ligne qui relie les minima locaux de la fonction de coût. Cela illustre l'impact de la bathymétrie qui pour les mêmes temps d'arrivée de paquets éloignent la source lorsque la pente augmente.

Combinaisons de trajets différents, mêmes différences de temps d'arrivée : Impact de la bathymétrie - On applique la méthode de localisation sur une source maintenant positionnée à 2000 m et 30 m de profondeur, sur le profil 1 %. Avec 7 paquets observés sur la RI dégradée, la position de la source est estimée à 2693 m, 13 m de profondeur sur le profil de 4 %. La position la plus proche de la position réelle n'arrive qu'en 3^{ème} position. Les 5 meilleures positions sont représentées en figure 5.17. Elles sont comprises entre 1717 m et 3821 m en distance, 13 m et 33 m en profondeur et sur les profils de 2 % à 5 %. Comme pour la source à 1000 m, on constate que les meilleures RI théoriques correspondent à des positions différentes mais présentent des arrivées de

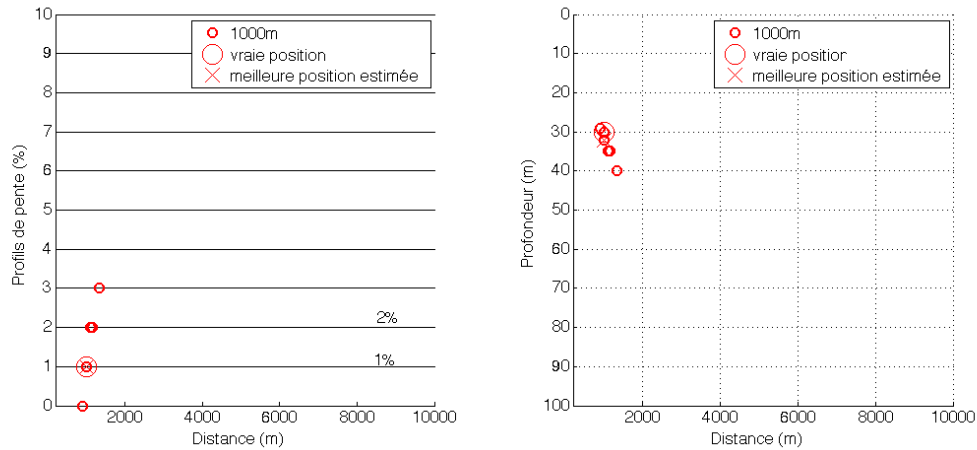


FIGURE 5.15 – Résultats de localisation de la source (vraie position : 1000 m de distance, 30 m de profondeur, profil de 1 % marqué par un grand cercle rouge fin). Les 5 meilleures positions sont représentées dans le plan (distance, profil) à gauche et dans le plan (distance, profondeur) à droite par des ronds rouges. La position de la source est estimée à 990 m de distance et 32 m de profondeur sur le profil de 1 % (marquée par une croix rouge), ce qui est une bonne estimation réalisée à partir de la RI dégradée. Les 5 meilleures positions sont estimées entre les positions [896 m, 29 m, 0 %] et [1337 m, 40 m, 3 %], restent dans un secteur de pentes consécutives et sont peu dispersées en distance, profondeur ou même profils

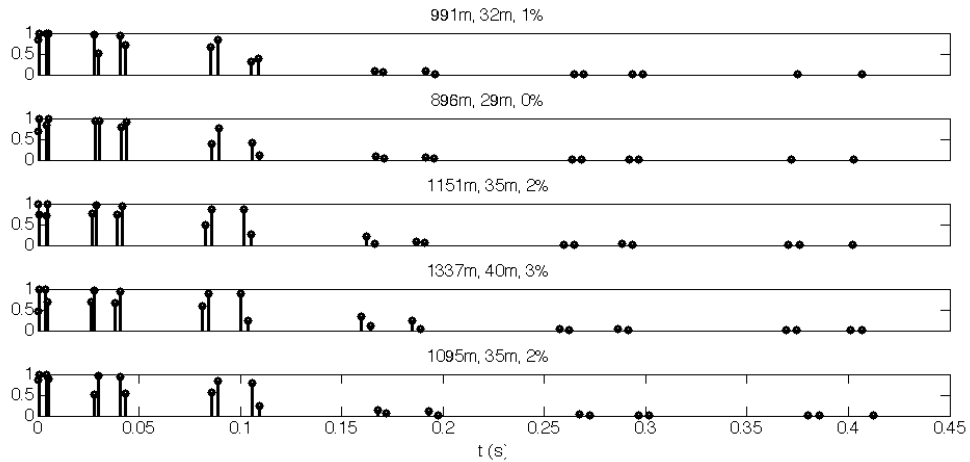


FIGURE 5.16 – RI théoriques des 5 meilleures positions de la 1^{ère} (en haut) à la 5^{ème} (en bas). Les RI sont synchronisées sur le même axe temporel. On constate qu'elles présentent toutes des paquets de trajets constitués ici du même nombre de trajets. Pour les mêmes temps d'arrivée, l'utilisation de la RI dégradée conduit à une bonne estimation de la position de la source sur le profil de 1 % (1^{ère} ligne en haut). Par contre, sur les profils proches, un même espacement de paquets correspond à une source plus proche sur la pente de 0 % (plus faible) et à une source plus éloignée sur la pente plus forte de 2 % (respectivement 2^{ème} et 3^{ème} ligne)

paquets similaires. On constate également que la combinaison de N trajets dans M paquets peut être différente. Ainsi le 7^{ème} paquets n'est pas composé du même nombre de trajets individuels sur toutes les meilleures RI théoriques. Enfin, on peut constater l'impact du nombre de paquets observés. Sur la 5^{ème} RI, il n'y a pas de 8^{ème} paquet alors qu'il y en a un sur les autres RI. Cette RI aurait été rejetée par l'algorithme (car trop courte) si un 8^{ème} paquet avait été observé. Le nombre de paquets

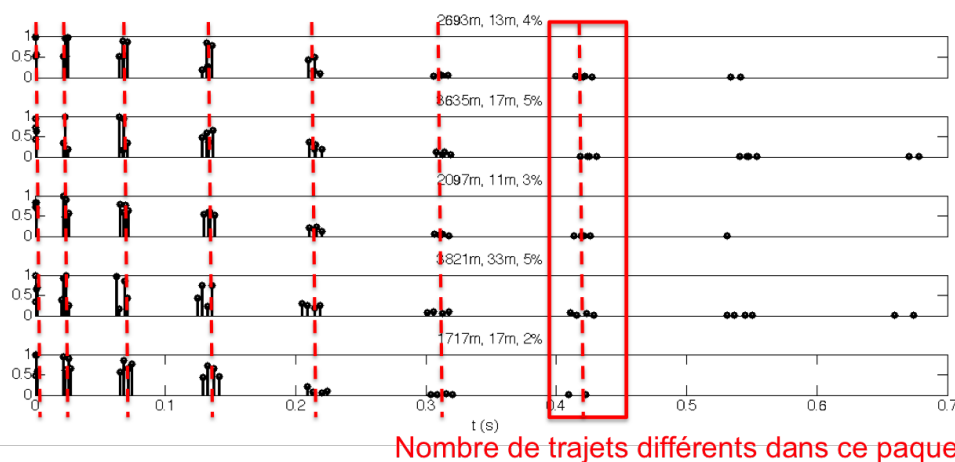


FIGURE 5.17 – RI théoriques des 5 meilleures positions estimées pour une source à 2000 m et 30 m de profondeur, sur le profil 1 %, de la 1^{ère} (en haut) à la 5^{ème} (en bas). Les RI sont synchronisées sur le même axe temporel. On constate qu’elles présentent toutes des paquets de trajets mais le nombre de paquets n’est pas le même. De plus, le nombre de trajets individuels composant chaque paquets varie d’une RI à l’autre. L’utilisation de la RI dégradée ne conduit pas à une bonne estimation de la position de la source, la meilleure position étant estimée à 2693 m, 13 m de profondeur sur le profil de 4 % et la position la plus proche de la position réelle n’arrivant qu’en 3^{ème} position. Néanmoins, l’estimation de la position reste correcte et les RI ne sont pas dispersées.

observables dépend du rapport signal à bruit.

La figure 5.18 présente les résultats de l’algorithme pour d’autres positions sources : 1000 m sur le profil de pente 1% (rond rouge, figure 5.18), 2000 m sur le profil de pente 1% (plus bleu, figure 5.18), 2000 m sur le profil de pente 3% (étoile rose, figure 5.18), 3000 m sur le profil de pente 1% (triangle vert, figure 5.18) et 4000 m sur le profil de pente 1% (étoile cyan, figure 5.18). La profondeur de la source est de 30 m pour chaque distance simulée. Le signal est toujours capté sur l’unique hydrophone, placé à 5 m du fond, après propagation dans le milieu synthétique à l’aide de l’outil BELLHOP[®]. On trace les 5 meilleures positions dans le plan distance / pentes comme précédemment (à gauche figure 5.18) et dans le plan distance / profondeur (à droite figure 5.18). Le cercle fin de la couleur associée à chaque source indique la vraie position, la croix indique la meilleure position estimée. Ces résultats confirment les observations précédentes :

- On observe, dans le plan distance / pentes, des trajectoires de dégénérescence de l’algorithme de localisation qui relient les minima locaux d’un profil à l’autre selon des profils consécutifs ;
- La meilleure position au sens de l’algorithme n’est pas toujours la plus proche de la vraie position. La RI dégradée ne permet pas d’assurer l’unicité de la solution et plusieurs minima locaux sont observés ;
- La meilleure solution est toujours parmi les meilleures estimées ;
- L’apport de la bathymétrie permet de réduire le secteur des directions possibles pour une source ;
- L’estimation de la profondeur se dégrade avec la distance mais cela est également dû à la grille peu résolue utilisée pour créer les RI théoriques.

Cette petite analyse nous permet de mieux comprendre le comportement de la localisation par *matched-impulse response* lorsque la RI est dégradée (détection de temps d’arrivée de groupes de trajets individuels non identifiés).

L’utilisation d’un unique capteur permet une bonne estimation de la position de la source (en profondeur, distance et azimuth). Néanmoins, comme la localisation est réalisée à l’aide de paquets d’arrivée, il convient de ne pas se limiter au seul optimum trouvé. En effet, plusieurs positions de source peuvent conduire à une même RI dégradée observée avec des coûts très proches. De plus, il

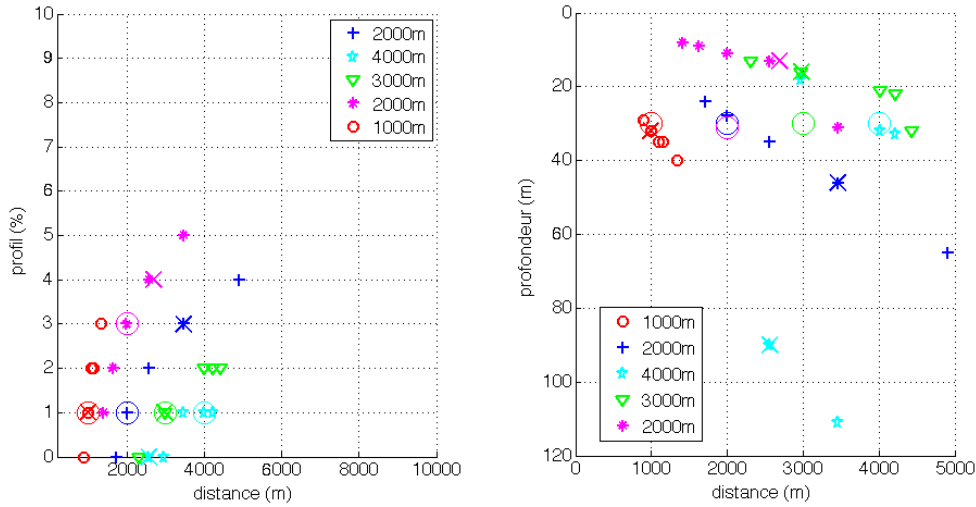


FIGURE 5.18 – On simule les RI dégradée pour différentes position de source : 1000 m sur le profil de pente 1% (rond rouge), 2000 m sur le profil de pente 1% (plus bleu), 2000 m sur le profil de pente 3% (étoile rose), 3000 m sur le profil de pente 1% (triangle vert) et 4000 m sur le profil de pente 1% (étoile cyan). La profondeur de la source est de 30 m pour chaque distance simulée. Les positions réelles sont les cercles larges de la couleur associée. Pour chaque signal testé, on trace les 5 meilleures positions dans le plan (distance, pente) à gauche et dans le plan (distance, profondeur) à droite. Les meilleures positions estimées se situent dans un secteur de pentes consécutives et ne sont pas dispersées. L'estimation de la profondeur se dégrade avec la distance mais cela est également dû à la grille irrégulière utilisée pour crée les RI théoriques.

n'existe pas une unique combinaison de N trajets individuels dans M paquets. Le nombre de paquets observés n'est pas le nombre de paquets réels de la réponse impulsionnelle. Enfin, l'algorithme ne peut éliminer que les réponses impulsionnelles théoriques trop courtes et ne peut pas éviter que des RI de longueur différente soient des minima locaux.

Lorsque la bathymétrie présente des profils de pente variable, l'algorithme de localisation développé permet de réduire le secteur des directions possibles pour la source. La trajectoire de dégénérescence observée dans le plan distance / pente montre que la RI dégradée porte une information physiquement valable pour estimer la position de la source malgré la non unicité de solution.

Nous allons maintenant évaluer la méthode de localisation dans l'environnement de la zone CABO.

5.4 Faisabilité sur des émissions contrôlées représentatives des émissions de baleines à bosse (zone de Punta Ballena)

5.4.1 Matériel et méthode : campagne CABO 2015

Dans cette section, nous allons appliquer la méthode de localisation sur les données de *playback* de la campagne CABO 2015. Des rampes de fréquence de 100 Hz à 1000 Hz sur 8 s de durée ont été émises depuis des positions géolocalisées (voir figure 5.8).

A chaque point GPS, la source émettait une rampe linéaire de fréquences de durée 8 s sur la bande de 100 Hz à 1000 Hz. L'objectif étant d'émettre des signaux représentatifs des vocalises de baleines à

bosse observées dans la zone. Un exemple de signal, émis à 1.33 km de l'hydrophone de Punta Ballena est présenté en figure 5.20 (image de gauche).

La zone de Cabo San Lucas est décrite dans la section 5.2. Nous rappelons juste la position des points d'émissions des signaux de *playback* ainsi que la position de l'hydrophone dans la zone de Punta Ballena en figure 5.19.

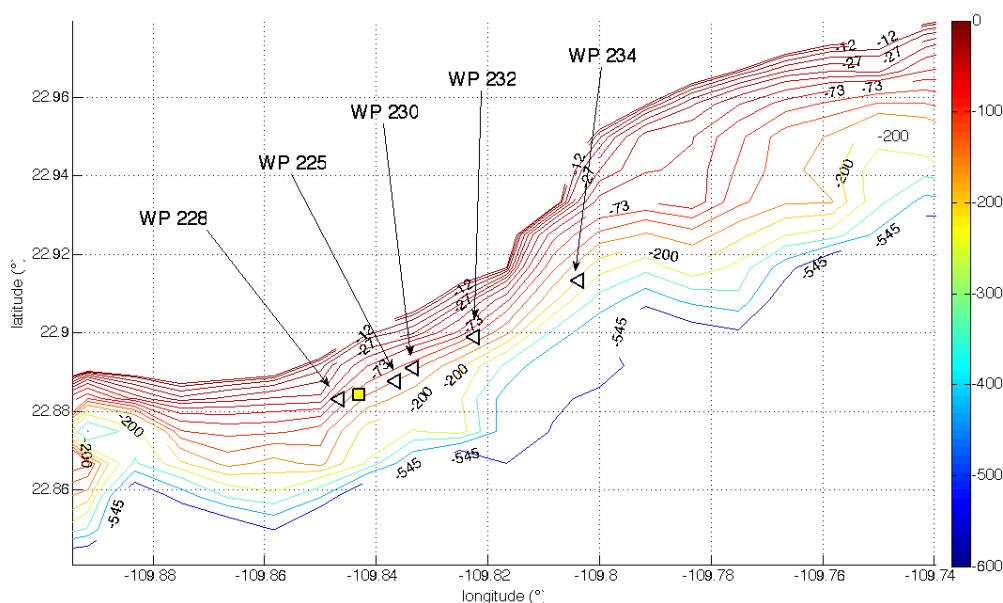


FIGURE 5.19 – Zone de Cabo San Lucas zoomée autour du point Punta Ballena. L'hydrophone de Punta Ballena est indiqué par le carré jaune, mouillé à 5 m du fond aux coordonnées [22.88413 N ; -109.84315W]. Les points géolocalisés auxquels des rampes de fréquence ont été émises (bathymétrie : *The GEBCO 2014 Grid*, www.gebco.net)

5.4.2 Première analyse à partir de rampes de *playback* propagée dans l'environnement de la zone Cabo - campagne CABO 2015

5.4.2.1 Quelle propagation multipaquets ?

Comme on peut l'observer sur l'image de gauche de la figure 5.20, les signaux propagés dans la zone de Punta Ballena ne présentent pas de propagation multitrajets apparente sur leur représentation temps-fréquence. Comme la source et l'hydrophone sont tous deux placés près d'une interface, les trajets sont en effet encore plus regroupés que dans l'étude précédente.

Nous avons donc analysé, à partir de simulations, si une propagation multitrajets était observable dans cette zone (Punta Ballena) ainsi que le comportement de l'algorithme de localisation sur des signaux synthétiques équivalents aux *playbacks* émises lors de la campagne CABO 2015.

Pour cela, nous avons simulé l'environnement de propagation acoustique de Punta Ballena via l'outil BELLHOP[®] comme présenté dans la section 5.2.3. Nous avons ensuite créé une rampe de fréquence entre 100 Hz et 1 kHz, de durée 8 s avec un code personnel MATLAB. Ce signal synthétique a ensuite été propagé via BELLHOP à partir d'une source simulée à 1.33 km de distance et 5 m de profondeur

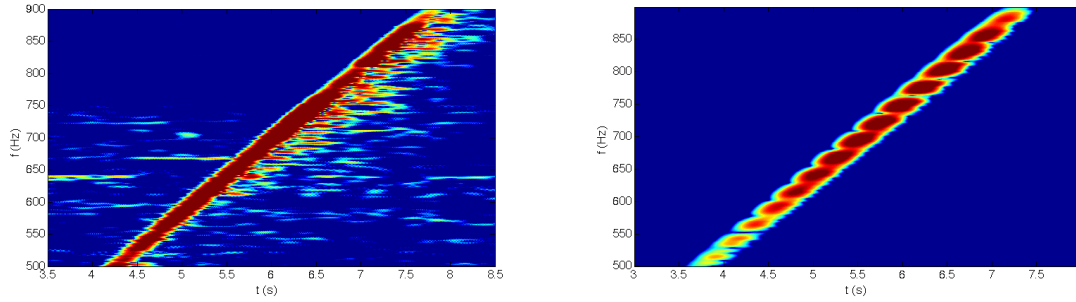


FIGURE 5.20 – A gauche : signal extrait des enregistrements de CABO 2015, correspondant à l’émission d’une rampe de fréquence entre 100 Hz et 1000 Hz de 8 s de durée par une source positionnée au point WP 230. A droite : Signal synthétique simulé par MATLAB et propagé par BELLHOP dans l’environnement simulé de Punta Ballena, reçu sur l’hydrophone de Punta Ballena. Le signal est une rampe équivalente à celle de l’image de gauche, émise par une source à 1.33 km de l’hydrophone et 5 m de profondeur (soit près du point WP 230 de la campagne CABO 2015).

(soit au niveau du point d’émission *playback* WP 230). Dans la simulation, l’hydrophone est placé à 5 m du fond comme c’est le cas dans la campagne CABO 2015. Un signal réel de *playback* émis par la source pendant la campagne CABO 2015 au point WP 230 (cf. figure 5.8) et reçu par l’hydrophone de Punta Ballena est représenté dans la figure 5.20 (image de gauche). L’image de droite présente le résultat de notre simulation de propagation d’une même rampe de fréquence propagée à partir d’une source simulée proche du point WP 230. La propagation multitrajets n’est pas visible ni en synthétique ni sur le signal réel.

Pour séparer le plus possible les paquets, nous appliquons à ce signal les opérateurs de séparation haute résolution de la méthode IGA-VMM-HR (voir chapitre 4). On obtient ainsi la RI dégradée (multipaquets et non multitrajets) présentée dans la figure 5.21 (courbe noire) qui montre bien la présence de paquets d’arrivée. La RI théorique y est superposée (pics rouges). Chaque paquet d’arrivée cache bien plusieurs trajets individuels. Le résultat du warping sur le signal est représenté en figure 5.22 aux instants d’arrivée des 4 premiers paquets observés. Les paquets, non visibles sur la représentation temps-fréquence du signal, sont bien séparés grâce au warping. Il est à noter que la RI est relativement courte avec une durée de 0.4 sec et des trajets regroupés en seulement 6 paquets. Pour la localisation, les niveaux des trajets (et ceux des paquets) ne sont pas pris en compte si bien que la simulation des RI peut être faite avec un fond non réaliste. Dans notre simulation de collection de RI théoriques, nous avons utilisé un fond constitué d’une couche de sédiment semi-infinie de vitesse de compression 1646 m/s et de densité 1.772 kg/m^3 . Ce fond a été choisi après des échanges avec l’équipe du Scripps et représente bien la zone d’étude. Il est alors intéressant d’observer les amplitudes des paquets. Seuls 3 paquets semblent détectables en présence de bruit ; les autres sont faibles. Ce nombre restreint de paquets limite l’information fournie à l’algorithme de localisation qui ne dispose déjà pas de trajets individuels.

5.4.2.2 Localisation de la source sur les simulations de *playbacks*

Impact de la symétrie de l’environnement bathymétrique sur la localisation - Nous poursuivons l’étude préliminaire des *playbacks*. La source simulée est localisée avec les outils développés pour la méthode IGA-VMM-BF (section 5.3). La recherche de la source est effectuée par comparaison de la RI dégradée avec une collection de RI théoriques simulées, pour commencer sur la grille basse résolution suivante :

- profils tous les 10 degrés, extraits de la bathymétrie GEBCO, centré sur l’hydrophone.
- distance de 200 m à 6 km avec un pas adaptatif à 5%.

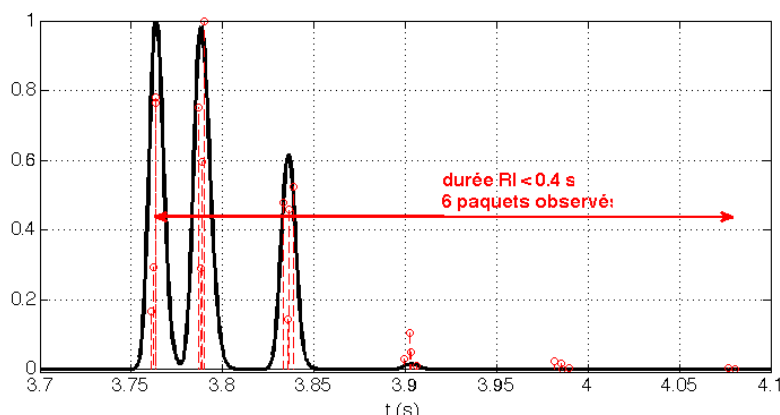


FIGURE 5.21 – RI dégradée (en noir) permettant de distinguer des paquets de trajets du signal reçu présenté en figure 5.20. En rouge sont tracés les trajets théoriques pour la source à 1.33 km et 5 m de profondeur simulés par BELLHOP. Il y a propagation multipaquets et chaque paquet d’arrivée cache bien plusieurs trajets individuels

— profondeurs de 2 à 30 m.

Cela crée 69660 RI théoriques. Le résultat de localisation est fourni dans la figure 5.23. Rappelons qu’un unique capteur est utilisé. Chaque point longitude/latitude est coloré en fonction du coût de la meilleure RI selon les profondeurs évaluées. La source est simulée à 1.33 km de l’hydrophone et à 5 m du fond et matérialisé par un triangle blanc. L’unique hydrophone utilisé pour la localisation est indiqué par le carré jaune. Plus le coût est faible, plus la RI théorique est proche de l’observation et la couleur du point est rouge. Lorsqu’une RI théorique est trop courte ou ne permet pas d’associer au moins un trajet à chaque paquet observé, alors celle-ci est exclue des solutions possibles. Cela explique les zones non colorées dans la figure. La symétrie de l’estimation est bien visible avec les deux zones bleues symétriques par rapport à l’axe de symétrie indiqué en pointillés noirs et cette symétrie correspond bien à une symétrie de la bathymétrie autour de l’hydrophone.

Dans le cas de cette zone, il y a, à la distance considérée ici, une forte symétrie de la bathymétrie. Ainsi, les profils d’un côté et de l’autre de l’axe de symétrie identifié fournissent à l’algorithme des informations similaires et l’algorithme perd l’information de direction. Néanmoins, les meilleures estimées se trouvent à droite de l’axe, ce qui correspond à la vraie position. Nous limiterons donc les recherches dans ce secteur dans la suite de l’analyse sur une grille plus fine.

Localisation à partir des paquets d’arrivée - La grille haute résolution est la suivante :

- profils tous les 1 degré, extraits de la bathymétrie GEBCO, centrés sur l’hydrophone de Punta Ballena. et dans le secteur de 20° à 60°. Les profils de 20° et 60° sont tracés en noir sur la figure 5.25.
- distances de 500 m à 5 km avec un pas adaptatif à 5%.
- profondeurs de 2 à 30 m avec un pas de 2 m.

Nous appliquons, sur cette grille plus fine, l’algorithme de localisation pour le signal synthétique simulé à 1.33 km de distance avec 6 paquets observés.

La collection de RI théoriques comporte 57195 RI. Chaque RI théorique est notée par un coût $C_{r,z,p}$ lors de sa comparaison avec la RI dégradée (cf. équation 5.2). La figure 5.24 présente dans le cône de recherche (i.e. entre les profils indiqués par des pointillés noirs et jusqu’à 5 km) le coût des positions évaluées. Chaque point représente le coût de la meilleure RI, en profondeur, à cette coordonnée longitude / latitude. La position simulée est indiquée par le triangle blanc. Plus le coût est faible, plus la RI théorique est proche de l’observation (couleur rouge). Lorsqu’une RI théorique est trop courte ou ne permet pas d’associer au moins un trajet à chaque paquet observé, alors celle-ci est exclue des solutions

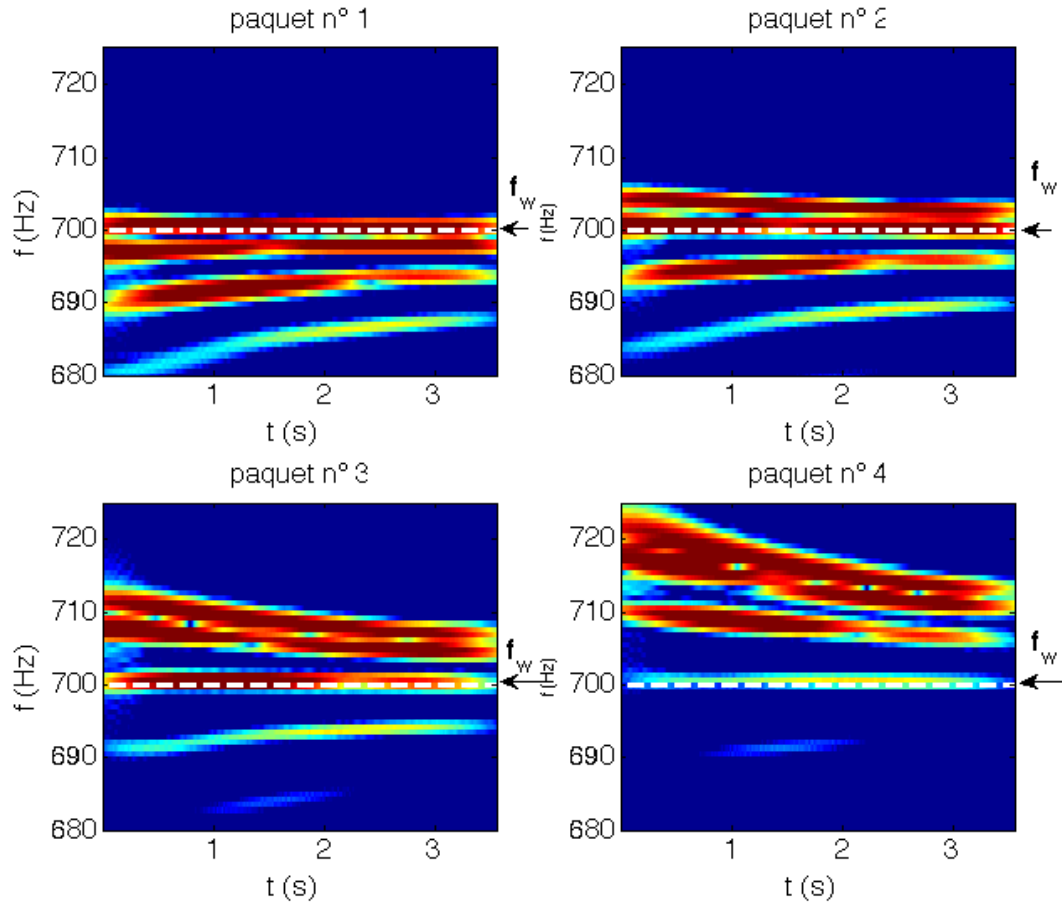


FIGURE 5.22 – Résultat du warping sur le signal représenté en figure 5.20 aux instants d’arrivée des 4 premiers paquets observés (cf. RI en figure 5.21). Les paquets, non visibles sur la représentation temps-fréquence du signal (figure 5.20), sont bien séparés grâce au warping et transformés en fréquence pure par l’opérateur de déformation temporelle lorsque la fenêtre glissante sur laquelle est appliquée la déformation passe au temps d’arrivée du paquet

possibles. Cela explique les zones non colorées dans la figure. On note la ligne de dégénérescence de l’algorithme de localisation selon les profils consécutifs peu variables. La distance estimée augmente alors avec la pente de la bathymétrie.

Comme vu dans la section précédente, la localisation à partir de paquets de trajets d’arrivée non-identifiés n’est pas aussi performante que la localisation à partir de trajets d’arrivée individuels. Néanmoins, on obtient, avec une RI dégradée, une estimation intéressante de la position la plus probable d’une source.

Etudions un peu les deux groupes de solutions identifiés et encadrés dans la figure 5.25 : le groupe A autour de 1330 m de distance, le groupe B autour de 2 km. Sur la figure 5.25, une RI théorique du groupe B est représentée en rouge, une RI théorique du groupe A en bleu. La RI B est plus longue que la RI A avec un paquet supplémentaire. L’encadré rouge est un zoom sur les deux premiers trajets et montre que les combinaisons de trajets individuels dans les paquets diffèrent entre le type A et le type B avec 2 trajets individuels dans le premier paquet pour les RI de type B, contre 4 trajets individuels dans le premier paquet pour les RI de type A. Le nombre de trajets individuels composant les paquets

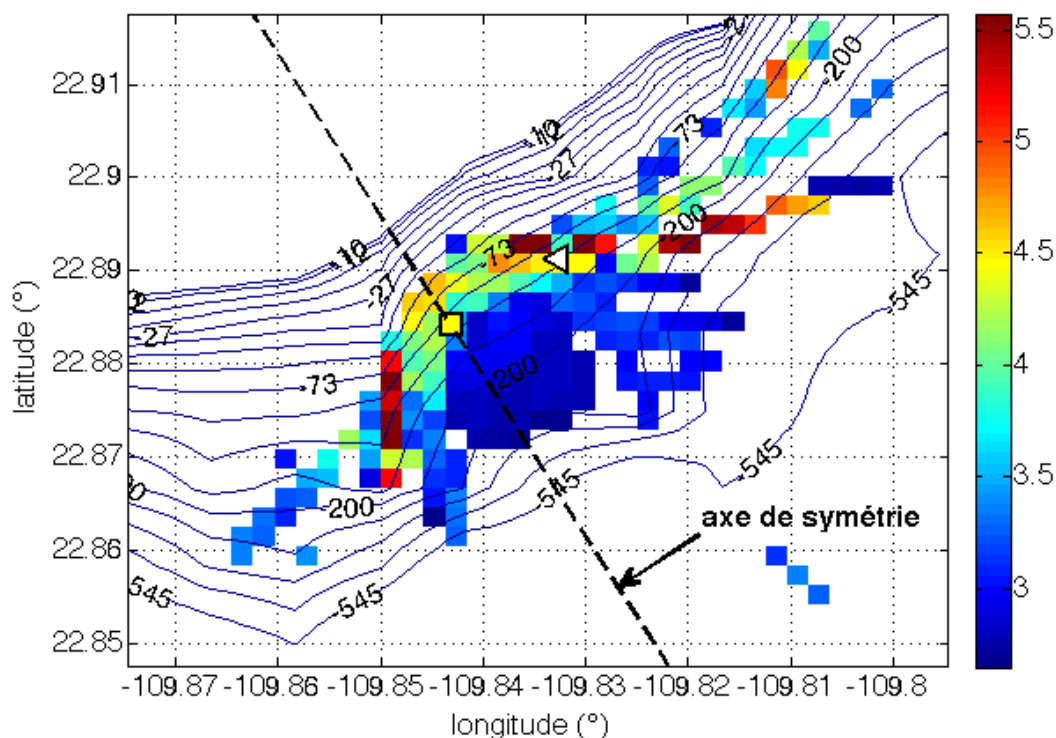


FIGURE 5.23 – Cartographie du coût estimé pour les RI théoriques pour une source évaluée en chaque point de la grille. Chaque point longitude/latitude représente le coût de la meilleure RI selon les profondeurs évaluées. La source est simulée à 1.33 km de l'hydrophone et à 5 m du fond (triangle blanc). L'unique hydrophone utilisé pour la localisation est indiqué par le carré jaune. Plus le coût est faible, plus la RI théorique est proche de l'observation et la couleur du point est rouge. Lorsqu'une RI théorique est trop courte ou ne permet pas d'associer au moins un trajet à chaque paquet observé, alors celle-ci est exclue des solutions possibles. Cela explique les zones non colorées dans la figure. La symétrie de l'estimation est bien visible avec les deux zones rouges symétriques par rapport à l'axe de symétrie tracé en pointillés noirs. Cet axe est un axe de symétrie de la bathymétrie. Les profils de part et d'autres de cet axe apporte des informations équivalentes à l'algorithme de localisation.

observés diffère entre les deux types.

On applique maintenant l'algorithme de localisation à des signaux simulés pour correspondre aux *playbacks* aux environs du point WP 225 (environ 850 m de l'hydrophone) et du point WP 232 (environ 2.7 km de l'hydrophone) avec respectivement 6 et 5 paquets d'arrivées observés. Les résultats sont présentés de la même manière que pour le point simulé près du point WP 230 avec une cartographie des coûts en longitude versus latitude, en ne conservant que la meilleure RI en profondeur pour la représentation en 2D. La figure 5.26 présente les cartographies de résultats pour ces deux points. La localisation de la source plus proche (image du haut) est plus précise et sans minima secondaire. La localisation de la source plus éloignée (image du bas) est plus difficile avec une zone plus étalée. La ligne de dégénérescence selon des profils consécutifs est visible comme pour les autres points.

Ces simulations confirment les points soulevés sur l'étude théorique (section 5.3.3) :

- une dégénérescence le long de profils consécutifs peu variés ;
- la difficulté liée aux paquets et aux nombres de combinaisons possibles de N trajets dans M paquets.

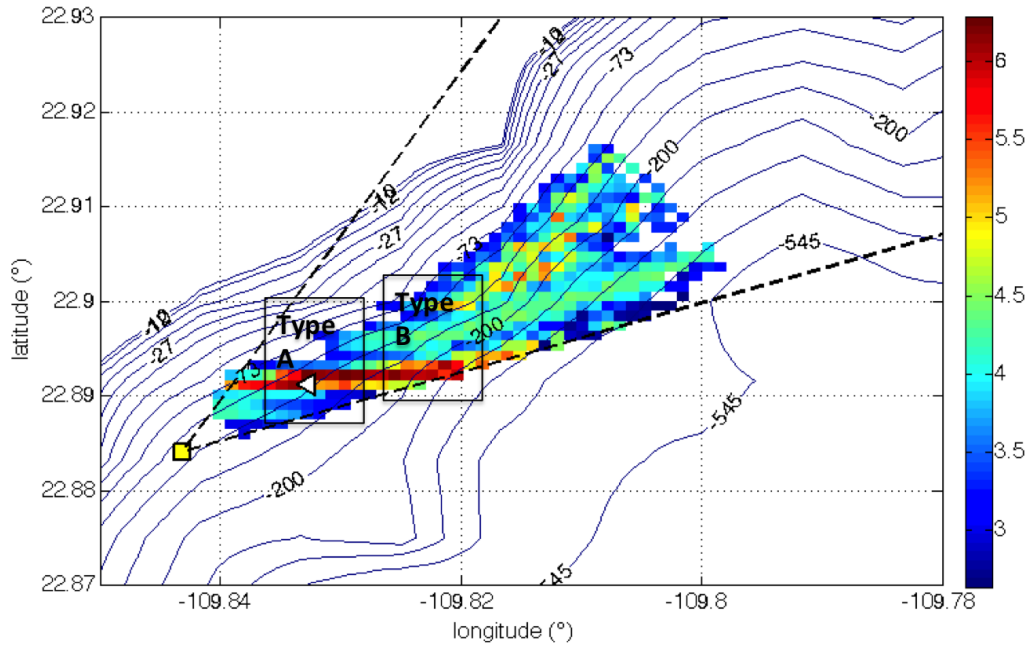


FIGURE 5.24 – Dans le cône de recherche (i.e. entre les profils indiqués par des pointillés noirs et jusqu'à 5 km) est représenté le c ut associé aux positions évaluées pour la localisation d'une source simulée à 1.33 km de l'hydrophone (soit près du point WP 230). Chaque point représente le c ut de la meilleure RI, en profondeur, à cette coordonnée longitude / latitude. La position simulée est indiquée par le triangle blanc. On remarque la ligne de dégénérescence selon les profils et une augmentation de la distance avec la pente. Deux zones sont encadrées : cadre "type A" qui correspond à une bonne estimation de la position et cadre "type B" qui encadre les positions plus éloignées de la vérité.

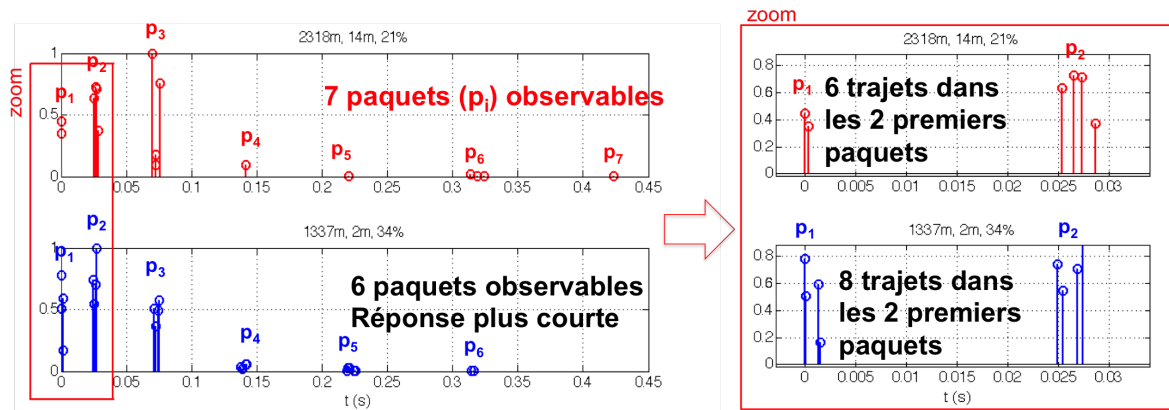


FIGURE 5.25 – RI de type 1 en bleu, proche de la vraie localisation de la source simulée. RI de type B en rouge, mauvaise estimation de l'algorithme. Ces RI montrent que différentes combinaisons de N trajets individuels dans M paquets mènent à une même RI dégradée observée.

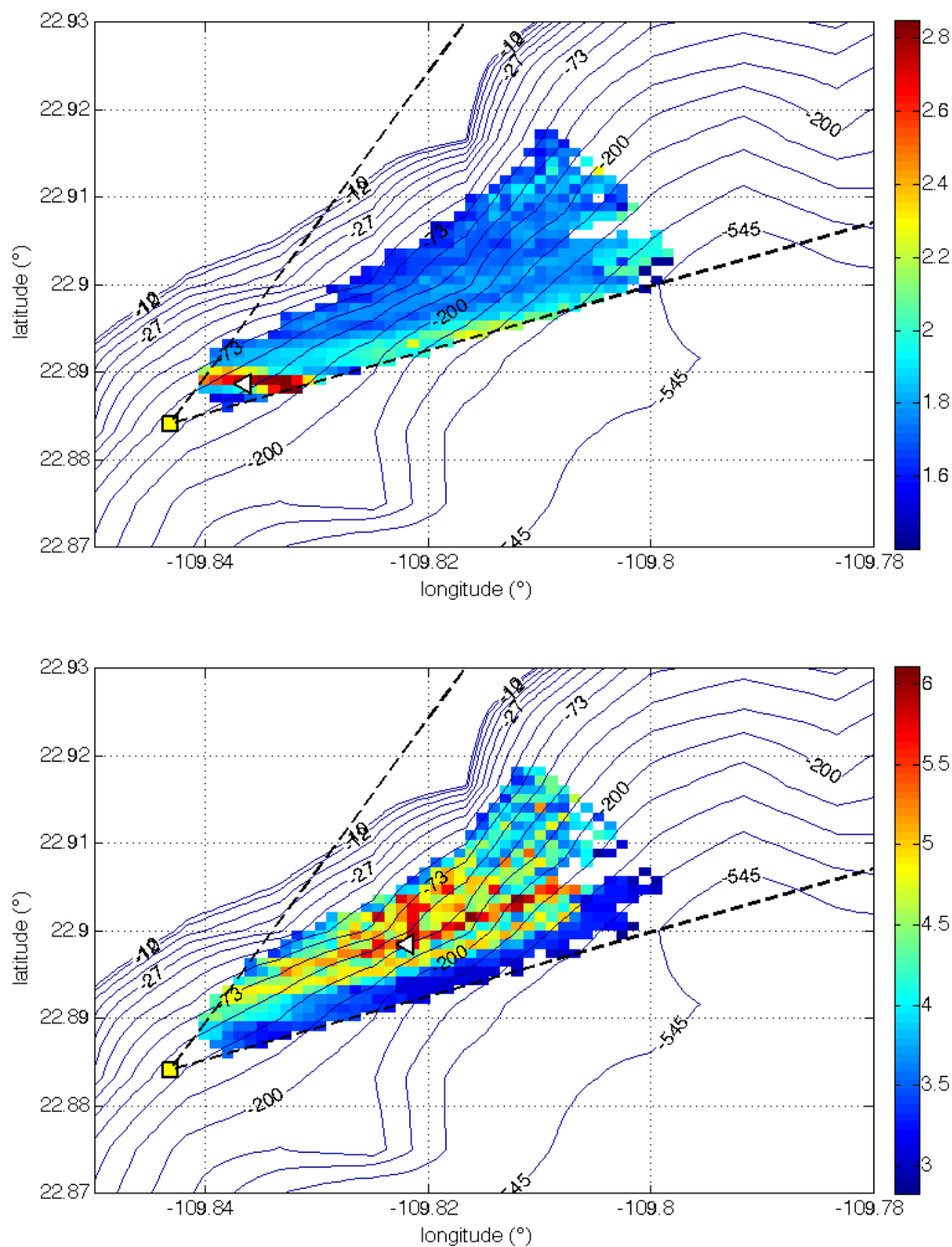


FIGURE 5.26 – Dans le cône de recherche (i.e. entre les profils indiqués par des pointillés noirs et jusqu'à 5 km) le coût associé aux positions évaluées est représenté en haut pour une source simulée vers le point WP225 (environ 850 m de l'hydrophone) et en bas pour une source simulée vers le point WP232 (environ 2.7 km de l'hydrophone). Chaque point représente le coût de la meilleure RI, en profondeur, à cette coordonnée longitude / latitude. La position simulée est indiquée par le triangle blanc. On remarque la ligne de dégénérescence selon les profils et une augmentation de la distance avec la pente

Le comportement de l'algorithme se confirme donc sur ce jeu de données simulées basées sur les *playbacks* de la campagne CABO 2015. Avec un unique capteur et grâce à la bathymétrie, l'algorithme permet d'estimer la position de la source en 3D à partir d'une RI dégradée ne permettant pas d'accéder aux trajets individuels. On n'obtient évidemment pas une précision de localisation équivalente à celle que l'on pourrait atteindre en connaissant les trajets individuels d'arrivée. Cependant, nous parvenons à réduire à une région en 3D, à l'aide d'un unique capteur, la position possible d'une source à partir de la RI dégradée.

La bathymétrie est un atout pour la localisation en 3D, à condition que les profils évalués soient différents les uns des autres. Dans le cas de profils consécutifs ressemblant, l'algorithme de localisation présente une trajectoire de dégénérescence d'un profil à l'autre, à l'instar des trajectoires constatées dans le cas des pentes linéaires. Cette trajectoire perturbe la localisation mais elle permet également d'exclure des positions aberrantes estimées par l'algorithme. Dans le cas d'une bathymétrie symétrique, comme c'est le cas dans la zone de Punta Ballena, il sera plus difficile pour l'algorithme d'estimer la direction bien que, dans le cas présenté dans cette section, l'algorithme permet tout de même de privilégier un des deux côtés.

Avec M paquets observés, on ne peut pas connaître a priori le nombre N de trajets présents ni comment ces N trajets se répartissent dans les M paquets observés. Différentes combinaisons $\binom{N}{M}$ (donc différentes positions) peuvent engendrer la même RI dégradée observée. De plus, on peut trouver N et $\hat{N}$ trajets tels que les combinaisons $\binom{N}{M} = \binom{\hat{N}}{M}$ induisent la même RI dégradée observée. Cependant, l'algorithme de localisation permet d'exclure les RI théoriques trop courtes ainsi que les RI théoriques qui ne permettent pas d'associer au moins un trajet à chaque paquet.

5.4.3 Application aux données de *playbacks* de baleine de la campagne CABO 2015 - émissions contrôlées

On veut maintenant appliquer l'algorithme de localisation sur les données de *playlist* de la campagne CABO 2015 sur lesquelles l'étude précédente a été basée. Les données de *playbacks* présentent plusieurs difficultés :

- comme illustré en simulation dans le paragraphe précédent, le capteur est près du fond (à 5 m du fond) ce qui réduit déjà le nombre de paquets observables ;
- la source est mise à l'eau manuellement. Sa profondeur n'est donc pas connue mais estimée à 5 m par l'équipe du Scripps. Sa proximité à la surface va également diminuer le nombre de paquets observables ;
- les RI sont courtes. Le fait que la source et le récepteur soient tous les deux proches d'une interface réduit le nombre de paquets observables ;
- les données sont bruitées et, à 5 km, les signaux présentent un rapport signal à bruit trop faible pour être traités. Il y aura donc peu de paquets observables. Les données synthétiques de la section précédente ont été simulées sans bruit. Ce n'est pas le cas des données de *playlist* de Cabo 2015. Si on se reporte à la RI dégradée obtenue à partir d'une source simulée à 1.33 km du récepteur (proche du point WP 230) présentée dans la figure 5.21, les seuls les 3 premiers paquets sembleraient détectables en présence de bruit, pas les suivants. Cela dépend, bien entendu, des propriétés géoacoustiques du fond dans la zone ;
- on ne connaît pas les propriétés du fond dans la zone. Dans nos simulations, nous avons utilisé un fond sableux (célérité de compression de 1646 m/s et densité de 1.772 kg/m³), fond proche de la vérité terrain.

Comme en simulation, nous allons travailler dans un premier temps sur le point de playback WP 230 (1.33 km).

La figure 5.27 présente à gauche une des émissions de *playlist* réalisées au point WP 230 (1.33 km de l'hydrophone). La figure est un zoom sur la portion entre 500 et 900 Hz. La source émet une rampe toutes les 10 secondes. La signature temps-fréquence utilisée est tracée en blanc sur le RTF du signal reçu. La RI est calculée selon la méthode IGA-VMM-HR (voir chapitre 4) et tracée en dB dans l'image centrale de la figure 5.27 et en linéaire à droite. Les trois premiers paquets d'arrivée supposés sont fléchés en rouge. Au-delà, il semble difficile de distinguer des paquets d'arrivée du bruit.

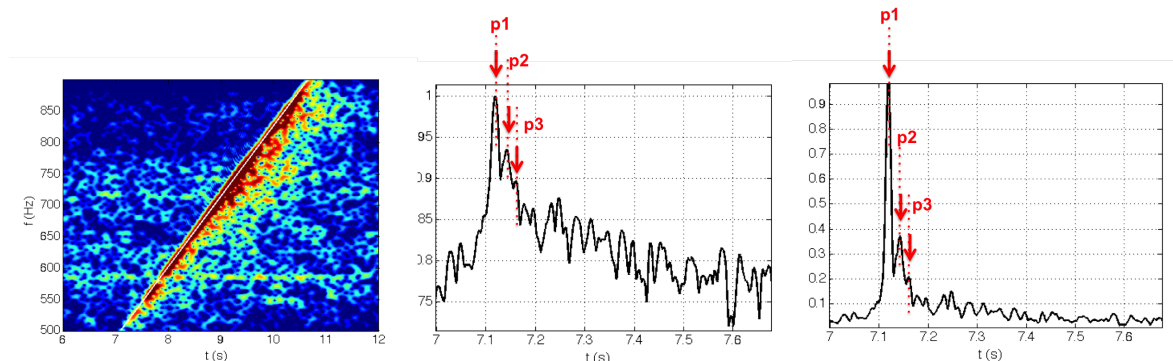


FIGURE 5.27 – Calcul de la réponse impulsionnelle dégradée selon la méthode IGA-VMM-HR (image centrale en dB, image de droite en linéaire). La rampe a été émise au point WP 230 soit vers 1.33 km de l’hydrophone. La signature temps-fréquence utilisée pour construire l’opérateur de déformation temporelle est tracée en blanc sur la représentation temps-fréquence du signal traité (image de gauche). Les 3 premiers paquets d’arrivée supposés sont fléchés en rouges

On dispose donc de peu de paquets, 3 au mieux. Nous allons donc chercher les positions probables de la source à partir des deux premiers paquets d’arrivée sur la grille haute résolution utilisée lors des simulations. Pour palier les doutes sur le 3^{ème} paquet, nous ouvrons un peu l’algorithme de localisation pour qu’il conserve les RI de la longueur correspondant aux 3 paquets sans forcer l’association d’un trajet au 3^{ème} paquet. Les résultats sur 7 émissions au point WP 230 sont présentés dans la figure 5.28. La couleur indique la similarité entre la RI dégradée observée et la meilleure RI théorique selon la profondeur pour le point considéré. Le rouge indique la meilleure position. Pour la majorité des émissions, la zone du point WP 230 est bien la zone identifiée comme la plus probable. On observe également des zones de minima secondaires notamment sur le résultat (ligne 2, colonne 2), vers le point WP 232 situé à 2.7 km du capteur. Néanmoins, la localisation bien que non précise au mètre, offre une bonne estimation de la zone de la source.

Ces émissions ont été produites à quelques secondes d’intervalle, à proximité les unes des autres. On trace la carte moyenne des erreurs en figure 5.29 qui présente bien une convergence de la solution vers le point réel d’émission WP230. L’écart au point réel peut être expliqué par la modélisation de l’environnement dont la bathymétrie n’est qu’approchée avec la GEBCO. La profondeur de l’hydrophone n’est de plus pas connue avec précision et celui-ci est placé à 5 m du fond dans la bathymétrie GEBCO.

On réalise le même travail pour le point WP225. La carte du coût moyen sur plusieurs émissions est représentée dans la figure 5.30 en haut en échelle de couleurs continue et en bas en classes de résultats (vert pour les coûts jusqu’à 2 fois le minimum, jaune jusqu’à 5 fois, orange jusqu’à 10 fois, rouge au-delà). En exploitant seulement 2 paquets on observe une convergence de l’algorithme de localisation vers le point WP 225 avec néanmoins des zones de minima secondaires prononcées (encadrées en rose sur la figure du haut). La localisation des *playbacks* du point WP232 n’a pas été possible.

Les simulations décrites dans le paragraphe précédent étaient réalisées en situation relativement confortable, sans bruit avec 6 paquets accessibles malgré un capteur près du fond et une source proche de la surface. La localisation était bonne avec une dégradation qui apparaissait avec l’augmentation de la distance. Les conditions réelles des mesures de *playback* ne sont pas aussi favorables à la localisation de la source. Le bruit ne permet pas d’observer autant de paquets que lors des simulations pour des RI déjà courtes dans l’environnement de Punta Ballena. De plus, la position de l’hydrophone est incertaine ainsi que celle de la source.

A la plus courte distance (WP 225), l’absorption par le fond s’ajoute au bruit, ne laissant que 2 paquets exploitables. En effet, lorsque la source est proche, les angles de rasances sont plus importants et l’absorption par le fond l’est également. Au point intermédiaire à 1.33 km (point WP 230), 2 à 3 paquets sont accessibles et la localisation est plus précise avec tout de même les trajectoires de dégénérescences de l’algorithme de localisation dues à l’utilisation de temps d’arrivée

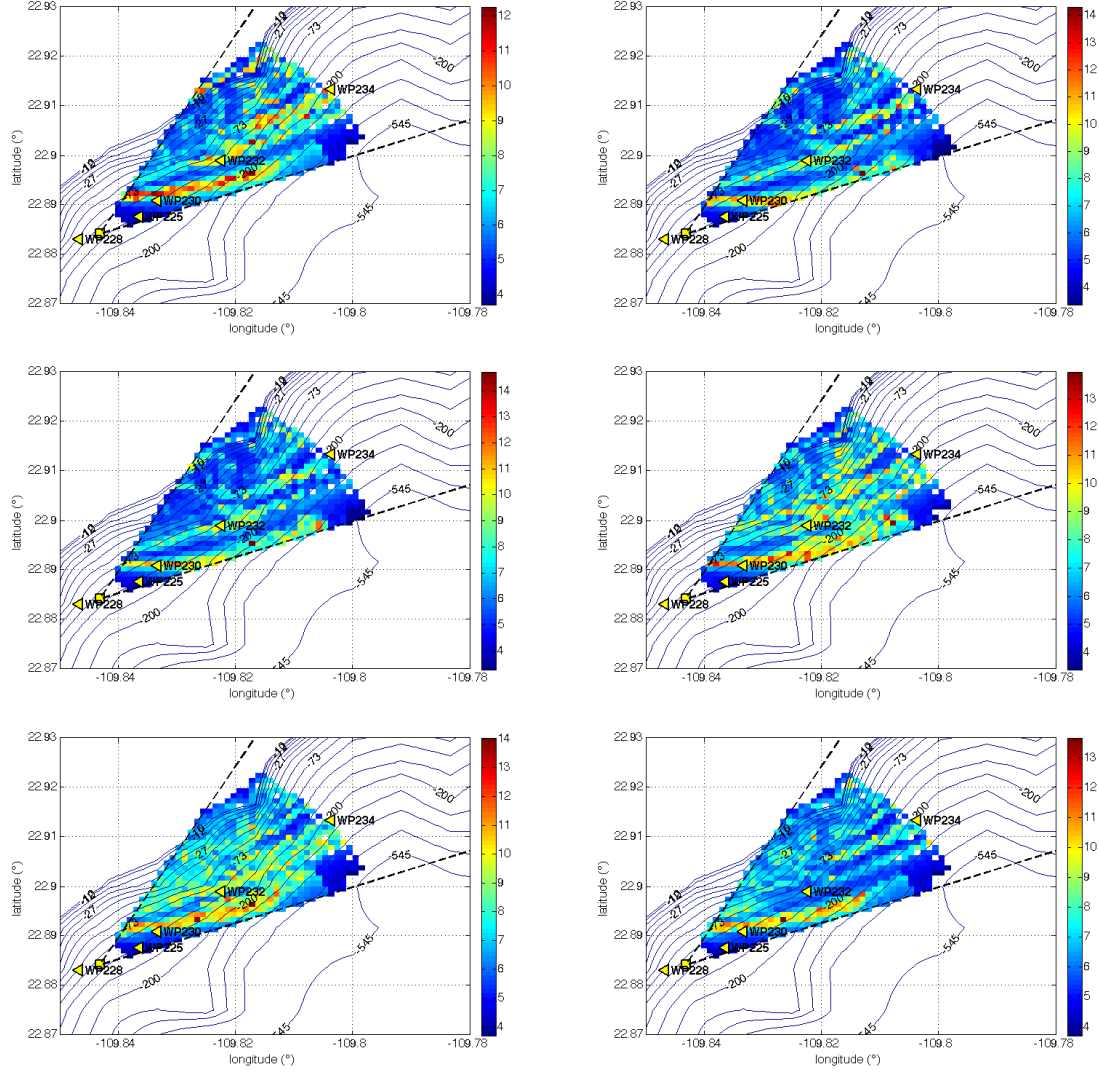


FIGURE 5.28 – Résultats de localisation de la source pour 6 émissions successives réalisées au niveau du point WP 230 noté sur les figures à côté du triangle jaune indiquant sa position. On reconnaît la trajectoire de dégradation de l'algorithme de localisation selon des profils contigus. Pour la majorité des émissions, la zone du point WP 230 est la zone identifiée. La couleur indique la similarité entre la RI dégradée observée et la meilleure RI théorique selon la profondeur pour le point considéré. Le rouge indique la meilleure position.

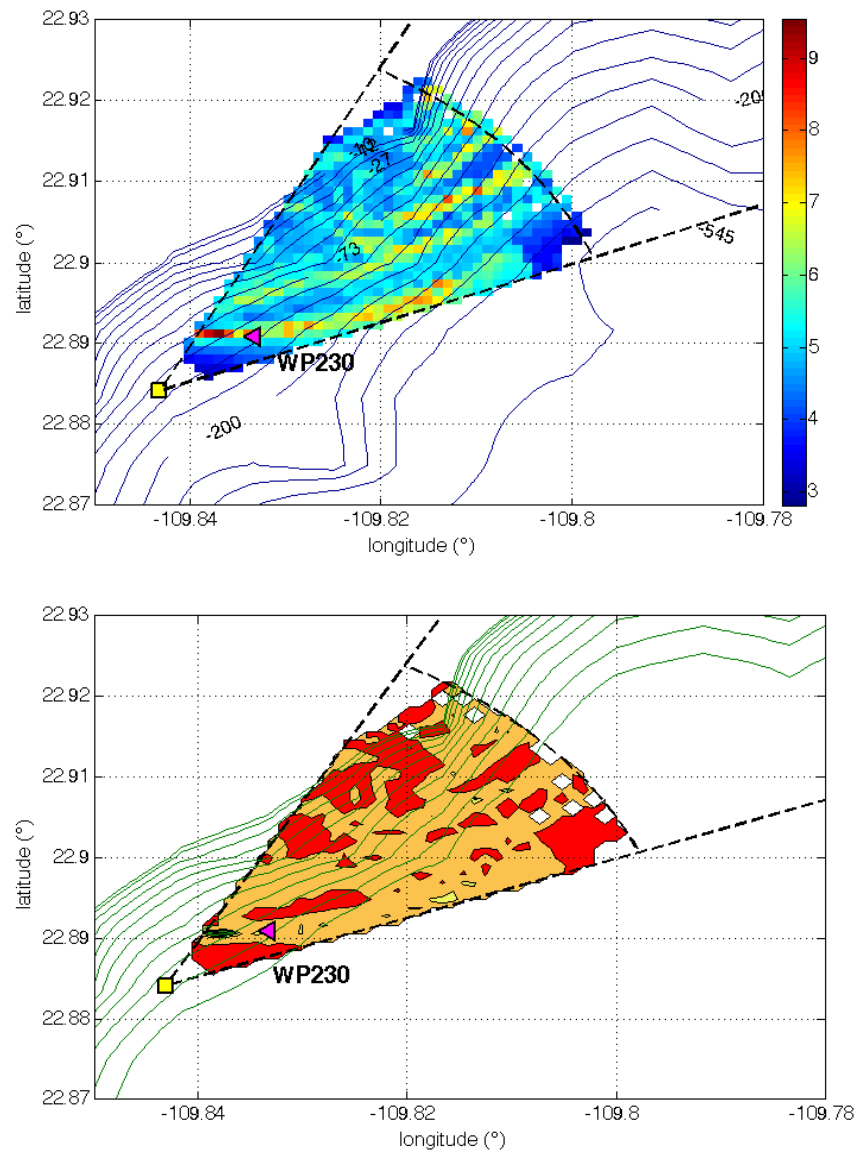


FIGURE 5.29 – Somme des cartes d'erreur RI simulée / RI observée présentées en figure 5.28. La localisation converge vers le point WP 230 indiqué par un triangle rose. Le biais peut être attribué aux approximations sur la bathymétrie et la profondeur du récepteur. En haut : résultat en échelle de couleur. En bas : résultats en contours en vert pour des coûts jusqu'à 2 fois le minimum, en jaune jusqu'à 5 fois, en orange jusqu'à 10 fois puis en rouge au-delà. Les pointillés indiquent la zone de recherche

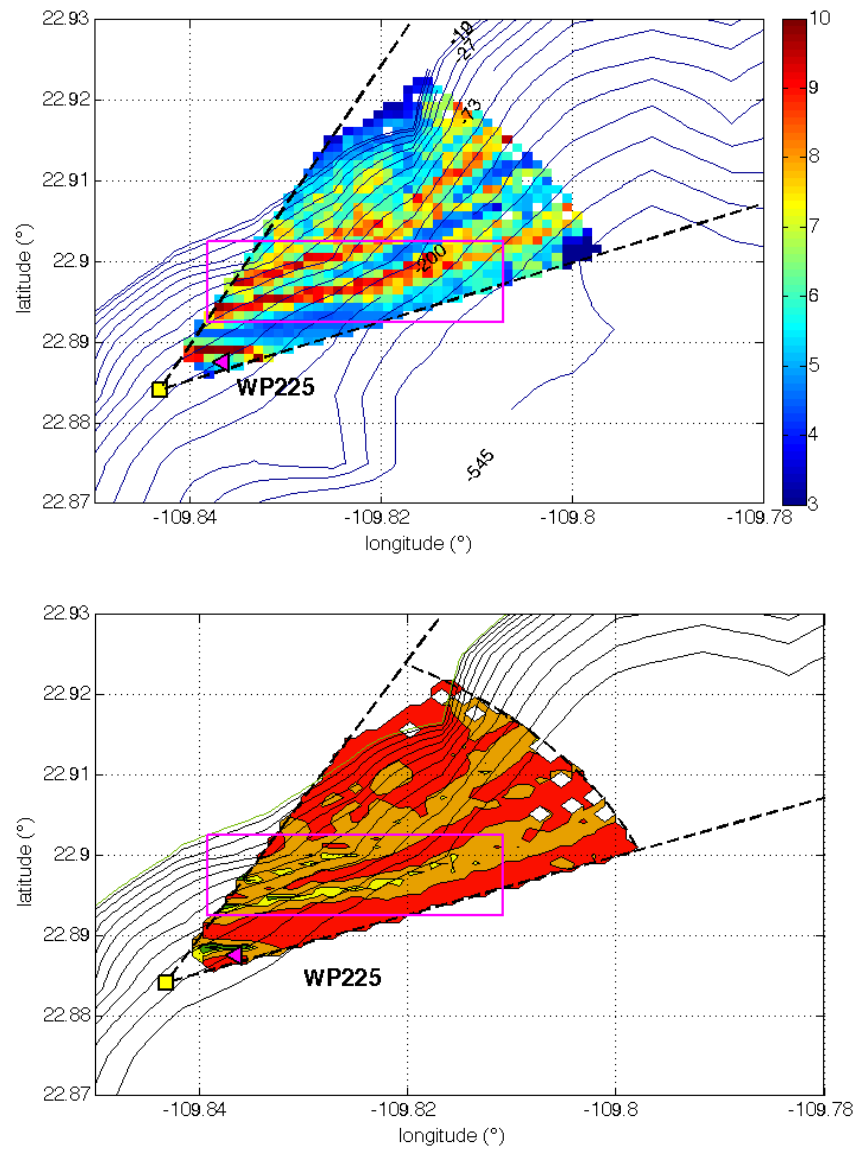


FIGURE 5.30 – Somme des cartes d’erreur RI simulée / RI observée sur 4 émissions successives au point WP 225 (distance d’environ 850 m) : en haut en échelle de couleurs continues et en bas en classes de résultats (vert pour les coûts jusqu’à 2 fois le minimum, jaune jusqu’à 5 fois, orange jusqu’à 10 fois, rouge au-delà). La localisation converge vers le point WP 225 (triangle rose). Avec seulement 2 paquets exploités, des régimes de minima secondaires peuvent être cependant observés (zone encadrée en rose sur les images)

de groupes de trajets et non de temps d'arrivée de trajets individuels. Le point le plus distant n'a pas été localisé avec l'algorithme.

Malgré une configuration de mesures peu avantageuse, le comportement de l'algorithme se confirme également sur ce jeu d'émissions contrôlées. Avec un unique capteur et grâce à la bathymétrie, l'algorithme permet d'estimer la position de la source en 3D à partir d'une RI dégradée ne permettant pas d'accéder aux trajets individuels. On n'obtient évidemment pas une précision de localisation équivalente à celle que l'on pourrait atteindre en connaissant les trajets individuels d'arrivée. Cependant, nous parvenons à réduire à une région en 3D, à l'aide d'un unique capteur, la position possible d'une source à partir de la RI dégradée.

5.5 Application aux données réelles de la zone Cabo (Punta Gorda)

Une séquence nous intéresse particulièrement dans les enregistrements d'émissions de baleine à bosse. Elle est présentée en figure 5.31. Il s'agit d'une succession d'unités de chant d'un unique individu (cf. communication personnelle avec K. Seger). L'unité de chant sur laquelle nous allons travailler est encadrée en rouge sur la figure. On peut voir qu'elle est répétée 3 fois avec un intervalle d'environ 6 secondes dans la séquence.

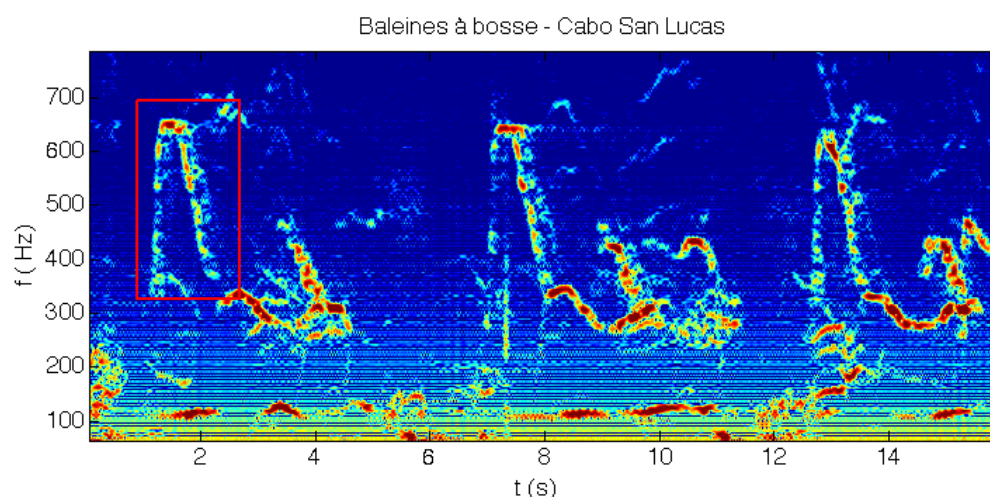


FIGURE 5.31 – Séquence présentant la répétition d'un *song unit* d'un chanteur isolé dans la zone de Punta Gorda (K. SEGER, communication personnelle). Le motif est la modulation de fréquence encadrée en rouge que l'on retrouve 3 fois dans chaque extrait *CABO 2013* - *Courtesy of : Scripps Institution of Oceanography & Universidad Autónoma de Baja California Sur*

Le signal d'intérêt est une rampe de fréquence descendante de 700 Hz à 300 Hz environ, sur une seconde (pente de 400 Hz/s) qui présente une propagation multitrajets.

Nous appliquons aux trois rampes de fréquence successives l'algorithme de localisation sur RI dégradée. Pour cela, chaque rampe est déformée sur une fenêtre glissante permettant l'estimation de la RI dégradée. Les réponses impulsionnelles obtenues sont tracées en figure 5.32. Les RI sont différentes mais présentent des durées comparables.

Chaque RI dégradée est comparée à une collection de RI haute résolution simulées sur la grille basse résolution suivante :

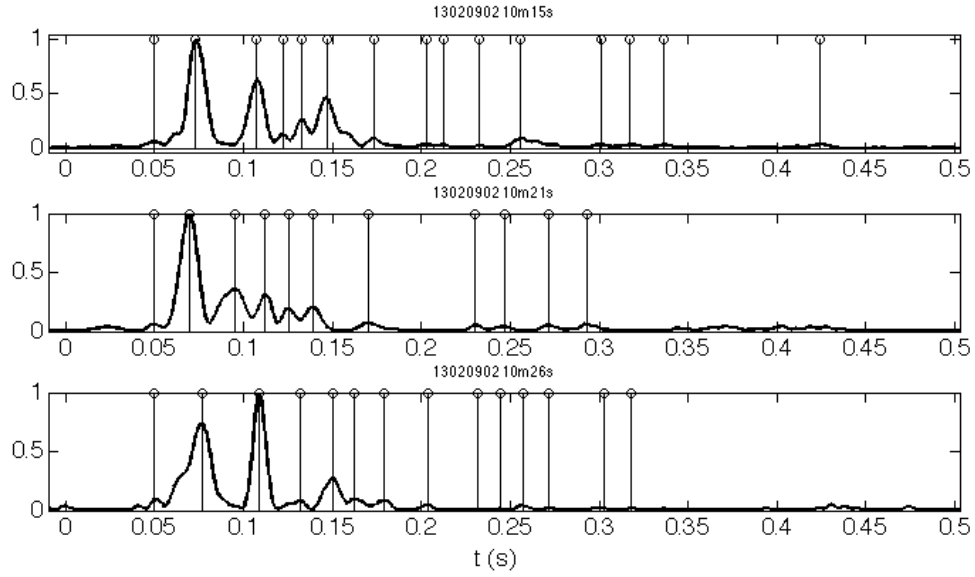


FIGURE 5.32 – Réponses impulsionnelles dégradées des 3 rampes de fréquence. Les RI sont différentes mais ont des durées comparables.

- profils tous les 10 degrés, de 0 à 360°, centrés sur l'hydrophone de Punta Gorda et extraits de la bathymétrie GEBCO. Les profils sont tracés en pointillés roses dans la figure 5.33.
- distances de 500 m à 12 km avec un pas adaptatif à 5%.
- 20 niveaux de profondeurs de 2 m jusqu'au fond.

L'idée est de faire une première estimation du secteur de localisation possible de la source. La figure 5.33 présente l'estimation de la localisation à basse résolution pour les 3 signaux. L'échelle de couleur s'étale du bleu au rouge, le rouge correspond à la meilleure correspondance entre RI simulée et RI observée. Les zones non colorées sont les zones exclues par l'algorithme de localisation (ex : RI trop courtes). L'emprise de recherche est indiquée par le cercle rose à 12 km. La bathymétrie est indiquée en isobathes. Pour chaque position évaluée (r, z, p) , on estime son coût. Pour représenter en 2 dimensions le résultat, nous n'affichons que la meilleure RI en profondeur en chaque point (r, p) .

On identifie clairement un secteur de localisation possible de la source au Nord de l'hydrophone. La région Sud est totalement exclue par l'algorithme de localisation. De plus, les figures sont cohérentes les unes avec les autres, ce qui est rassurant pour des signaux émis par une même source à quelques secondes d'intervalle.

Nous allons maintenant restreindre la région de recherche au secteur compris entre le profil de 50° et le profil de 170° mais augmenter la résolution de la grille de recherche comme suit :

- profils tous les degrés, de 50 à 170°, extraits de la bathymétrie GEBCO et centrés sur l'hydrophone de Punta Gorda. Les profils sont tracés en pointillés noirs dans la figure 5.33.
- distances de 2 km à 12 km avec un pas adaptatif à 2.5% (soit 300 m à 12 km).
- profondeurs de 2 m à 80 m avec un pas de 2 m.

La figure 5.34 présente les résultats de l'application de l'algorithme de localisation sur la grille haute résolution d'emprise restreinte pour la première émission. En haut, le résultat est présenté comme dans les figures précédentes (en échelle de couleur du meilleur en rouge, au moins bon en bleu). Dans l'image du bas, nous avons tracé des classes de coûts pour les coûts inférieurs à 1.5 fois le minimum (vert), 2 fois le minimum (jaune), 3 fois le minimum (orange), rouge au-delà (le tout homogène à la seconde) pour mieux visualiser le résultat de la localisation. La figure 5.35 présente les mêmes cartes pour les deux autres émissions de la séquence (à gauche en échelle de couleur standard, à droite en

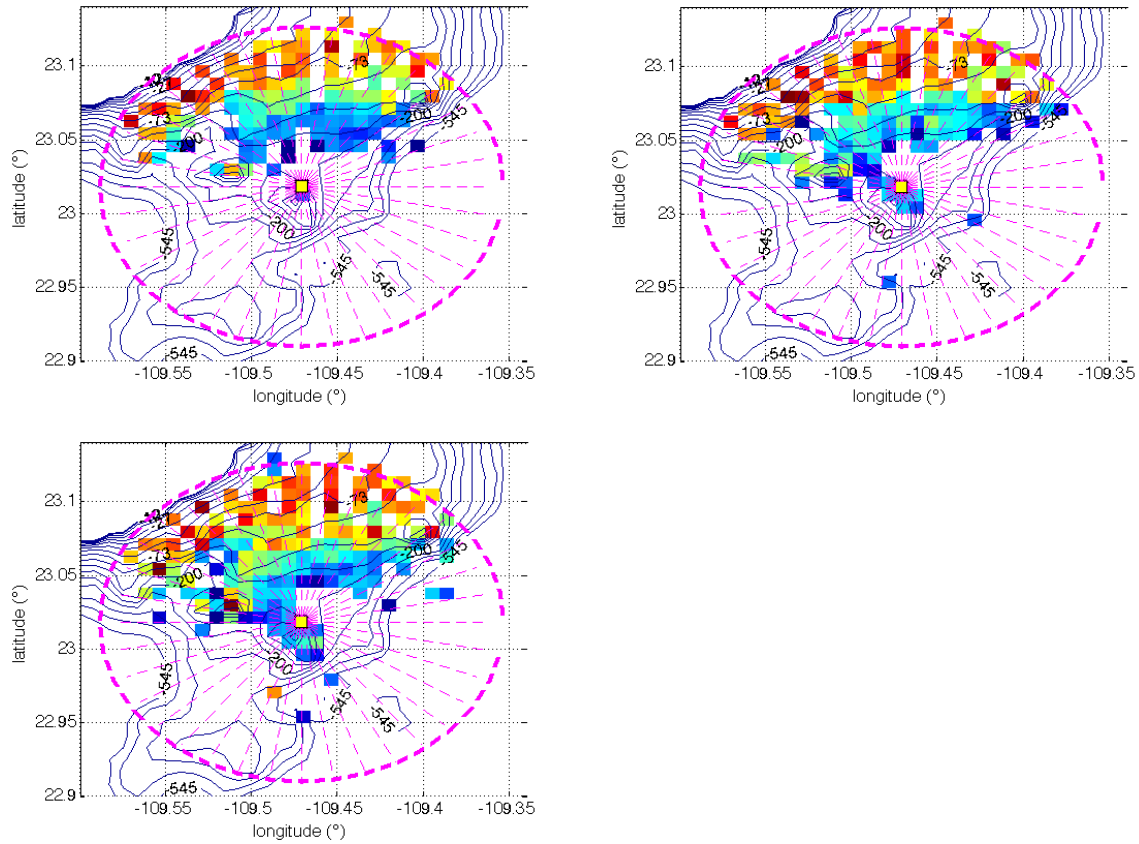


FIGURE 5.33 – Résultats à basse résolution de la localisation des 6 signaux sélectionnés. L'échelle de couleur s'étale du bleu au rouge, le rouge correspond à la meilleure correspondance entre RI simulée et RI observée. Les zones non colorées sont les zones exclues par l'algorithme de localisation (ex : RI trop courtes). L'emprise de recherche est indiquée par le cercle rose à 12 km. La bathymétrie est indiquée en isobathes. Les profils sont tracés en pointillés roses.

classes de coûts). La première ligne correspond à la deuxième émission, la ligne du bas correspond à la dernière émission de la séquence étudiée (figure 5.31).

On observe plusieurs points intéressants. Sur la carte des coûts (image du haut de la figure 5.34 et colonne de gauche dans la figure 5.35), l'impact de la bathymétrie est bien visible avec des zones exclues de la localisation (zones non colorées) qui suivent des isobathes. Les trois signaux successifs présentent les mêmes zones exclues à la localisation, pour des RI dégradées différentes. De même, dans la vision en classes de coûts (image du bas de la figure 5.34 et colonne de droite dans la figure 5.35), la zone rouge est équivalente pour les 3 vocalises. Enfin, pour les 3 signaux, les zones les plus proches du minimum (zone verte correspondant à des coûts jusqu'à 1.5 fois le minimum), sont localisées majoritairement dans une zone commune qui est cotée dans la figure 5.34. Cette zone est relativement étendue (3 km x 2.7 km environ) mais il faut bien rappeler que l'on travaille avec des réponses impulsionnelles dégradées ne permettant pas l'accès aux trajets individuels.

Nous ne disposons pas de la position réelle de la source donc il n'est pas possible de dire si la localisation est correcte ou non. Néanmoins, la cohérence entre les trois signaux successifs est encourageante. La localisation n'est pas précise à la distance de la source mais une zone la plus probable de localisation de la source est identifiable. La source se situe près de la côte ce qui est cohérent avec l'étude de [Jiménez-López \(2006\)](#).

Sans prétendre valider l'estimation de la position de la source, nous avons réalisé une simulation à

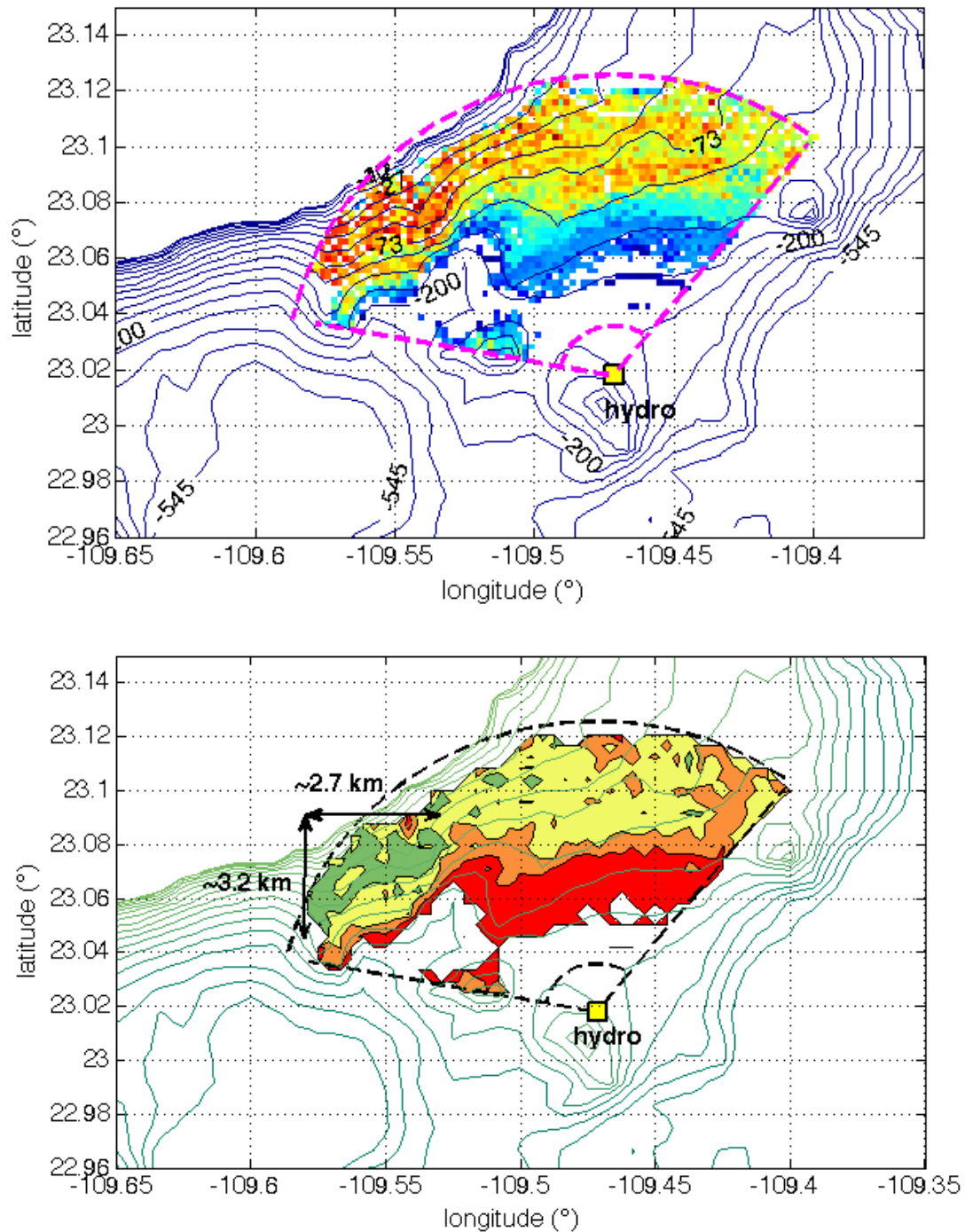


FIGURE 5.34 – Résultats de l'application de l'algorithme de localisation sur la grille haute résolution d'em-
prise restreinte pour la première émission. En haut, le résultat est présenté comme dans les figures précédentes
(en échelle de couleur du meilleur en rouge, au moins bon en bleu). Dans l'image du bas, nous avons tracé des
contours pour les coûts inférieurs à 1.5 fois le minimum (vert), 2 fois le minimum (jaune), 3 fois le minimum
(orange), rouge au-delà (le tout homogène à la seconde).

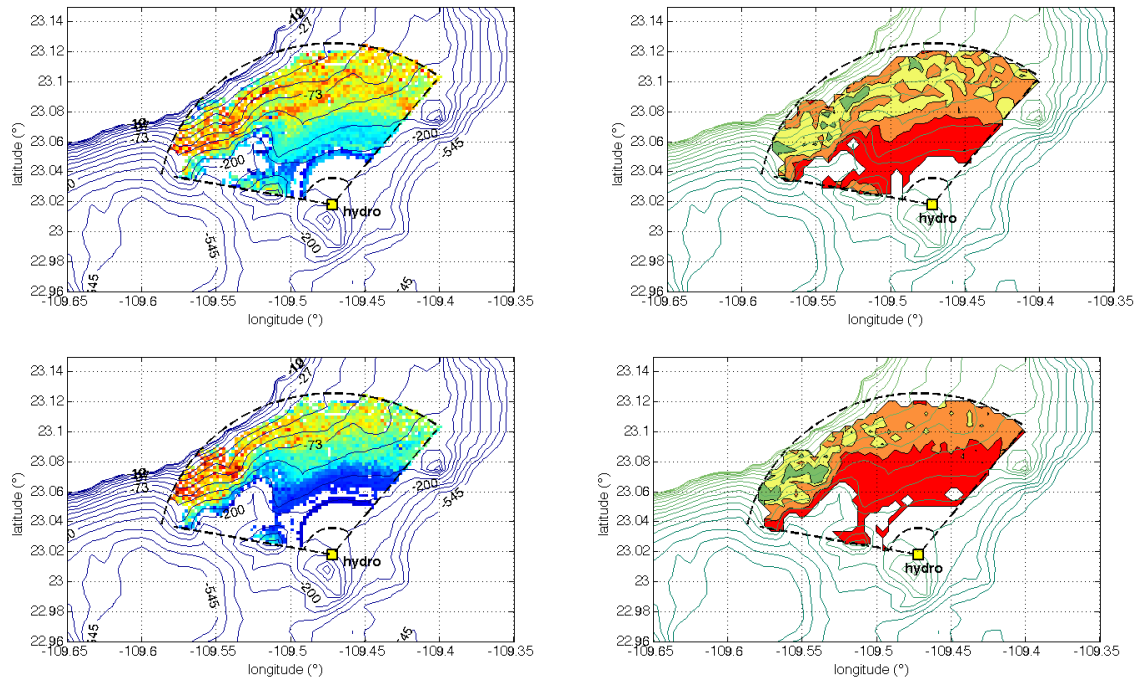


FIGURE 5.35 – Résultats de l’application de l’algorithme de localisation sur la grille haute résolution d’emprise restreinte pour les 2 autres émissions : à gauche en échelle de couleur standard, à droite en classes de coûts. La première ligne est le signal central de la séquence, la ligne du bas correspond à la dernière rampe de la séquence étudiée. Les classes de coûts correspondent à des coûts inférieurs à 1.5 fois le minimum en vert, à 2 fois le minimum en jaune, à 3 fois le minimum en orange, au-delà en rouge (le tout homogène à la seconde).

partir d’une source positionnée à 10 km de distance et 30 m de profondeur sur le profil de 130°. La carte des coûts et la carte des classes de coûts sont présentées en figure 5.36 sur la première ligne. La position simulée est matérialisée par un triangle blanc. Ces cartes de simulation sont toutes les deux proches des cartes obtenues sur les signaux réels. La deuxième ligne représente les résultats de l’algorithme de localisation pour une source également à 10 km mais sur le profil de 30°. Les cartes sont bien différentes des cartes des données réelles. On observe d’ailleurs la dégénérescence selon des profils consécutifs assez similaires telle qu’observée dans les études sur les émissions contrôlées. À l’inverse, la bathymétrie autour du profil de 130° est plus variée ce qui explique le regroupement des optima.

5.6 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons décrit un algorithme de localisation dans le cas d’une réponse impulsionnelle dégradée, c’est-à-dire ne permettant pas d’identifier les trajets individuels. Nous rencontrons cette situation dans l’analyse des émissions de baleines à bosse enregistrées par un hydrophone très proche du fond, ainsi que sur des émissions contrôlées dites de *playbacks* enregistrées également par un capteur très près du fond et pour une source proche de la surface.

Dans ces situations, comme il n’est pas possible de distinguer les trois premiers arrivés, et cela même après application des outils de séparation haute résolution, il n’est alors pas possible de localiser la source avec les méthodes BR et HR décrites dans les premiers chapitres de ce manuscrit. Ces méthodes s’appuient en effet sur la propagation multitrajets résolues.

Nous avons donc développé un algorithme de localisation de la source basé sur l’exploitation de la RI dégradée obtenue après application des opérateurs de warping glissant pour séparer le plus possible les

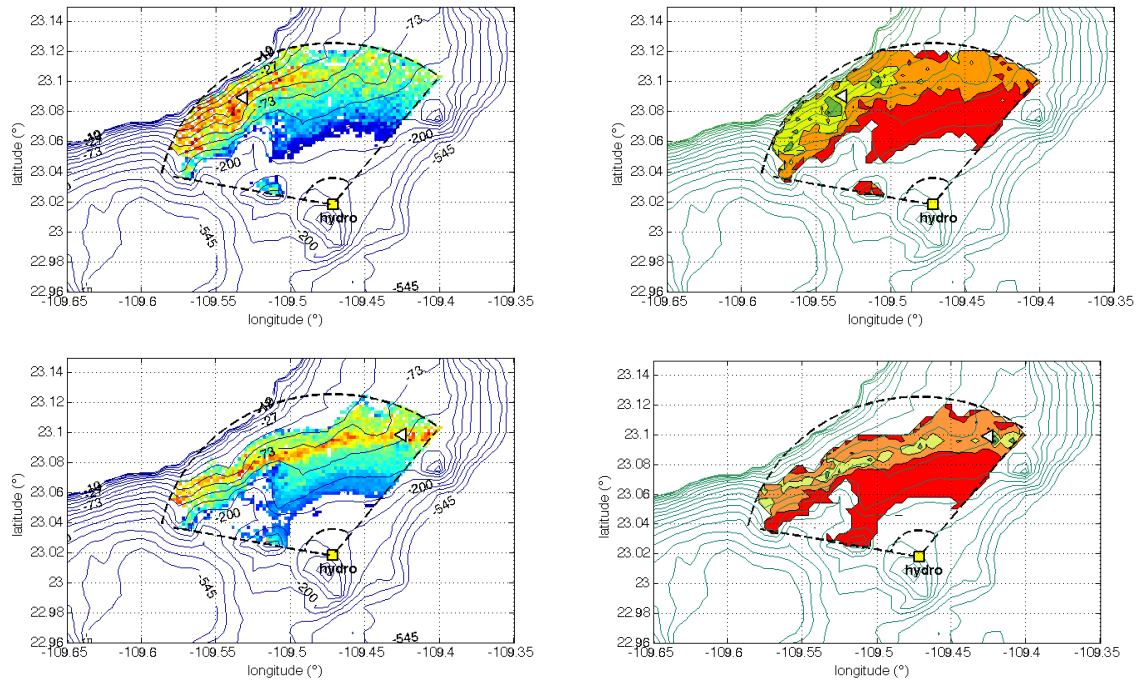


FIGURE 5.36 – Résultats de l’application de l’algorithme de localisation sur des données simulées, en haut : sur une simulation correspondant aux données réelles (distance de 10 km, profil de 130°); en bas : sur une source simulée à la même distance mais sur le profil de 30°

trajets (section 5.3). Dans les chapitres précédents, le milieu pouvait être considéré comme isocélère sur fond plat ce qui permettait la localisation de la source à partir des temps d’arrivée des trajets et des relations analytiques entre les différences de temps d’arrivée et la géométrie source/récepteur. Dans ce chapitre, la bathymétrie de la zone ne peut pas être considérée comme plate. La localisation de la source se base donc sur une méthode de type *matched impulse response* avec néanmoins la difficulté de comparer des RI théoriques (trajets individuels non regroupés en paquets) avec une RI dégradée (paquets de trajets individuels non identifiés).

Le tableau 5.2 résume les travaux effectués sur la localisation de sources à partir d’un unique récepteur et en présence de multitrajets non résolus.

(#1) Les tests sur données synthétiques en environnement synthétique constitué de pentes droites de 0% à 10% nous ont permis de comprendre les points durs de l’algorithme de localisation, notamment la non unicité de la combinaison de N trajets dans M paquets, l’impact de la longueur de la RI observée et l’impact de la pente sur la distance estimée de la source pour des différences de temps d’arrivée de paquets similaires.

(#2) Une première étude a été réalisée sur données simulées représentatives de *playbacks* de baleine à bosse. Cette étude visait à comprendre la configuration des mesures et à analyser la propagation multitrajets dans la zone de Punta Ballena, zone présentant une bathymétrie symétrique et peu variée d’un profil à l’autre. Les résultats présentent les mêmes profils de dégénérescence selon les profils contigus que ceux observés dans le cas #1, avec un éloignement de la source lorsque la pente augmente.

(#3) Nous avons ensuite appliqué l’algorithme sur un jeu de *playbacks* (émissions contrôlées) dans la région de Punta Ballena. Ce jeu de données nous a permis de valider le comportement précédemment observé sur des données réelles. Néanmoins, ce jeu de données est particulièrement difficile à traiter car la source et l’hydrophone sont tous les deux proches d’une interface ce qui restreint fortement le nombre de paquets observables. Le RSB réduit également le nombre de paquets observables. Enfin, la bathymétrie autour de l’hydrophone est symétrique et peu variée. Il en résulte des réponses impul-

TABLE 5.2 – Statistiques issues du traitement de cent sifflements de dauphins communs enregistrés durant la campagne ERATO 2009

	400-600 Hz 0.2 s	Pentes droites de 0 à 10% Hydro à 5 m du fond	paquets	le long des profils
§5.3.3 #2	Synthétique 100-1000 Hz	Réel simulé GEBCO 30"	≥ 6 paquets	Loc difficile Dégénérescence le long des profils
§5.4.2	8 s Simulation : Playbacks pour le #3	Hydro à 5 m du fond		
#3 §5.4.3	Réel : Playbacks 100-1000 Hz 8 s	Réel (Punta Ballena) Bathy symétrique en pente Hydro à 5 m du fond	≤ 3 paquets	Confirmation de la simulation #2 Loc difficile RI très courtes
#4 §5.5	Réel : Baleines à bosse 300-700 Hz 1 s	Réel (Punta Gorda) Bathy variée Hydro à 5 m du fond	≥ 10 paquets	Source lointaine Loc dans une ² à zone de 4 km ² à plus de 10 km

sionnelles courtes qui se réduisent à 2 paquets observables, ce qui est très peu pour la localisation. La bathymétrie se rapproche du cas synthétique analysé en début de chapitre. On parvient néanmoins à localiser la source avec le traitement d'une succession d'émission autour des points situés à 1.3 km et 850 m.

(#4) Les données réelles de baleines à bosse (section 5.5) ont été enregistrées autour d'un autre hydrophone, situé dans une zone de bathymétrie plus variée. Une séquence de trois émissions successives attribuées à un même individu a été analysée. La propagation multitrajets est bien visible sur les signaux de cette séquence. La difficulté de ces données vient de l'éloignement de la source que nous estimons à plus de 10 km de l'hydrophone, pour une profondeur de source inférieure à 40 m. La localisation n'est par conséquent pas précise mais permet néanmoins d'identifier la zone la plus probable de localisation de la source sur un disque de 12 km de rayon autour de l'hydrophone.

Dans tous les cas traités, l'apport de la bathymétrie permet, à partir d'un unique capteur, de localiser une source en 3D dans un secteur.

[Tiemann et al. \(2006\)](#) ont montré la plus-value apportée par la prise en compte de la bathymétrie pour la détection de cachalots dans les 3 dimensions à partir d'un unique hydrophone dans le cas de RI permettant de distinguer et d'identifier chaque trajet individuel. La RI induite par d'une source située à une position (r, z) donnée varie en effet d'un profil bathymétrique à l'autre, à condition que ces profils diffèrent les uns des autres. Ainsi, avec un unique capteur, qui n'est censé voir qu'en deux dimensions (distance, profondeur), il est possible d'estimer la direction de la source grâce à l'impact de la bathymétrie sur la RI.

Contrairement à [Tiemann et al. \(2006\)](#) qui disposent de trajets individuels résolus, nous n'avons pas accès aux trajets individuels. Et pourtant, malgré cette réponse impulsienne dégradée, nous avons montré sur des signaux simulés, en environnement représentatif de la zone CABO, que les sources étaient bien positionnées par l'algorithme, en distance et profondeur, et que l'algorithme permettait également d'estimer un secteur de directions les plus probables pour la source comprenant la direction réelle, tout cela avec un unique capteur.

SYNTHESE

Ces travaux ont été présentés à l'occasion de la conférence ASA 2016 à Salt Lake City ([Barazzutti et al., 2016b](#)).

Ce sont les seuls travaux existant actuellement sur la localisation d'une source à partir d'une propagation en multitrajets non résolus (multipaquets).

Hypothèse - On reste dans le cadre de l'approximation de la propagation en rayons. L'environnement présente une bathymétrie variable. La propagation multitrajets n'est pas résolue même après l'application des opérateurs de déformation temporelle.

Outils - L'obtention de la RI se fait à partir de la méthode IGA-VMM-HR, soit avec l'application d'outils de séparation haute résolution basés sur des opérateurs de warping créés à façon pour chaque signal à partir du premier arrivé. Cependant, la RI obtenue ne permet pas d'accéder aux trajets individuels mais seulement à des paquets de trajets non identifiés. L'algorithme de localisation développé est basé sur un *matched impulse response* comparant la RI haute résolution (groupes de trajets non identifiés) avec une collection de RI théoriques (constituées de trajets individuels identifiés non regroupés en paquets).

Résultats principaux - La bathymétrie permet, avec un unique hydrophone et à partir de la RI dégradée, d'estimer un secteur de directions possibles de la source. Bien que les trajets individuels ne soient ni accessibles ni identifiables, l'algorithme développé permet d'estimer la région de localisation la plus probable de la source. L'algorithme a été évalué sur données synthétiques puis sur émissions contrôlées ainsi que sur signaux réels.

Limites et Perspectives - L'estimation du coefficient de réflexion et l'étape d'inversion n'ont pas été abordés dans le cadre des travaux de cette thèse.

Conclusion et perspectives

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont permis le développement et l'évaluation d'une méthode d'inversion géoacoustique passive basée sur l'utilisation de modulations de fréquence émises par des mammifères marins et enregistrées sur un unique hydrophone. Cette méthode non invasive contribue ainsi aux efforts de préservation de l'environnement. Elle assure également le respect des contraintes de discrétion et de coût. Cette méthode passive mono-capteur exploite la propagation multitrajets observée dans le domaine de validité de l'approximation de la propagation acoustique en rayons. Considérons une émission individuelle. En contexte passif, le signal émis étant inconnu, c'est la signature temps-fréquence du premier trajet arrivé qui sert de référence pour le signal émis. La réponse impulsionnelle du canal entre la source et l'unique récepteur est évaluée à partir de cette signature et fournit les observables nécessaires à l'algorithme : les temps d'arrivée des trajets individuels, qui permettent la localisation de la source, et les amplitudes d'arrivée des trajets, qui permettent l'estimation d'un coefficient de réflexion local. En effet, le trajet direct entre la source et le récepteur (premier arrivé) n'est pas impacté par le fond. Après correction des pertes de transmission, il sert donc de référence à laquelle est comparée l'amplitude du réfléchi fond (également corrigée des pertes de transmission), vecteur d'information sur le fond pour la rasant avec lequel il pénètre le fond. Le traitement d'une collection d'émissions individuelles permet de décrire une courbe du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasant. Ce nouveau schéma d'inversion géoacoustique passive a été évalué dans différentes configurations sources / récepteurs, sur différentes bandes de fréquences, sur données synthétiques, sur émissions contrôlées et également sur des données réelles, dans des environnements différents (bathymétrie, célérité). Les performances et les limites de la méthode ont été étudiées théoriquement puis confrontées aux performances observées sur les différents jeux de données traités.

Le cœur de la méthode étant la propagation multitrajets, un ensemble d'outils a donc été développé pour adapter l'algorithme d'inversion selon le niveau de résolution de la propagation multitrajets. Ainsi, dans le cas d'une propagation multitrajets résolue dans le plan temps-fréquence du signal reçu, des outils basés sur l'analyse du spectrogramme permettent d'extraire les temps et les amplitudes d'arrivée nécessaires à l'algorithme pour la localisation de la source et l'estimation du coefficient de réflexion local. La localisation de la source, dans un environnement petits fonds de bathymétrie plate et de colonne d'eau isocélère, est réalisée à partir des relations analytiques et géométriques existant entre les temps d'arrivée, les longueurs des trajets (considérés comme rectilignes) et la position de la source. La méthode, dotée de ces outils, a été nommée IGA-VMM-BR (inversion géoacoustique à partir de vocalises de mammifères marins - basse résolution). Elle a été évaluée avec succès sur données simulées et en environnement réel sur des émissions contrôlées. Les performances estimées théoriquement ont été confirmées par ces évaluations. La portée de cette méthode est néanmoins limitée par les outils mis en œuvre qui ne permettent pas une résolution suffisante des trajets au-delà de quelques centaines de mètres. La portée limitée est directement liée aux angles de rasant accessibles et donc à la richesse de description du fond.

Pour étendre cette portée et ainsi étendre le domaine des angles de rasants accessibles, des outils de séparation haute résolution des trajets ont été développés. Il s'agit d'opérateur de déformation temporelle (*warping*) construits à façon, pour chaque émission traitée, à partir de la signature temps-fréquence du signal reçu sur l'hydrophone. Cette signature permet de construire la loi de déformation temporelle qui transforme les échos successifs en fréquence pure. En appliquant la déformation temporelle sur une fenêtre glissante le long du signal reçu, on estime la réponse impulsionnelle du canal avec une séparation haute résolution des trajets, permise par le réglage du spectrogramme dans l'espace des temps déformés. La source est localisée, comme dans la méthode BR, à partir des différences de temps d'arrivée. La portée de la méthode est ainsi doublée, la durée d'écoute utile est triplée et avec

l'extension de portée, les angles de rasance plus faibles peuvent être atteints. Ainsi les angles critiques des fonds plus absorbants peuvent être couverts. La méthode étendue grâce aux outils de déformation temporelle est nommée IGA-VMM-HR (inversion géoacoustique à partir de vocalises de mammifères marins - haute résolution). Cette méthode a été évaluée avec succès sur données simulées et sur les émissions contrôlées sur lesquelles la méthode basse résolution avait été testée précédemment.

On rappelle que la source d'opportunité ciblée pour notre méthode d'inversion géoacoustique passive est la vocalise (modulation de fréquence) de dauphin commun pour laquelle nous disposons d'un jeu de données enregistrées dans le Golfe de Gascogne. L'analyse que nous avons conduite sur une centaine de modulations de fréquence de ce jeu de données a permis de démontrer la directivité de ces sources. La prise en compte de la directivité dans un schéma d'inversion avec un unique capteur peut être envisagée lorsque le diagramme de directivité de la source est connu. Dans notre cas, ce diagramme n'est pas connu et l'approximation classique par le modèle du piston circulaire non bafflé ne se montre pas satisfaisante. Nous avons donc changé de fréquence avec des modulations de fréquence de baleine à bosse enregistrées dans la zone de Cabo San Lucas. Ces signaux, plus basses fréquences, sont supposés être peu directifs. L'application de la méthode IGA-VMM-HR jusqu'à l'estimation du coefficient de réflexion s'est révélée impossible car même après application des outils de séparation haute résolution des trajets, les trajets individuels restent non séparés. Nous disposons donc d'une réponse impulsionnelle, appelée dégradée, qui ne donne accès qu'à des temps d'arrivée de groupes de trajets individuels et non à des temps d'arrivée de trajets individuels. Les trajets constituant chacun des groupes d'arrivée ne sont pas identifiés. A cela s'ajoute une bathymétrie accidentée et un profil de célérité non constant qui ne permettent pas l'approximation en trajets rectilignes. La méthode de localisation a donc été revue. Proche d'un *matched impulse response*, la réponse impulsionnelle dégradée (groupes de trajets) est comparée à une collection de RI (trajets individuels) simulées dans l'espace [distance, profondeur, azimuth] par un logiciel de simulation de propagation acoustique en rayons. L'apport de la bathymétrie permet, à partir d'un unique capteur limité en théorie à la 2D, d'estimer la position de la source en 3 dimensions. La faisabilité de la localisation par cette méthode a été étudiée sur des cas synthétiques ainsi que sur des données simulées. L'application sur des émissions contrôlées montre que la méthode permet d'estimer une région de localisation de la source dans les trois dimensions [distance, profondeur, azimuth], à partir d'un unique capteur, sans pour autant atteindre le niveau de localisation offert par une RI haute résolution. La méthode a enfin été appliquée à une série d'émissions réelles d'une baleine à bosse (même individu pour la série d'émissions) et présente des résultats de localisation cohérents d'une émission à l'autre. Des simulations a posteriori confortent ces résultats. L'inversion géoacoustique à partir de ces données n'a pas été abordée dans le cadre des travaux de cette thèse.

Ce qui nous mène aux perspectives de ces travaux !

Dans le cas des émissions de baleines à bosse, contrairement à une propagation multitrajets résolue, nous ne disposons pas du trajet direct de référence non impacté par le fond. Les paquets d'arrivées sont tous constitués d'un ensemble de trajets individuels qui seront identifiables qu'une fois la source localisée. Parmi les trajets individuels constituant un paquet se trouvent N trajets et chaque trajet i présente n_i réflexions fond. On peut considérer qu'au sein d'un paquet les longueurs de trajets sont égales. On peut de plus considérer, qu'on dispose, grâce au logiciel de simulation de propagation, du nombre de réflexions et des angles de réflexions sur le fond (ou par simplification, on considère une unique valeur d'angle de rasance pour chaque paquet). Après correction des pertes de transmission globales des paquets, l'amplitude d'un paquet d'arrivée peut être résumée à l'amplitude du signal émis multipliée par la somme du nombre de réflexions fond de chaque trajet le constituant. Un paquet nous donne donc une valeur $f(R)$ pour des angles de rasance θ_i avec $f(R) = \sum_i R^{n_i}(\theta_i)$ ($i=0..\infty$).

Une des difficultés soulevées en début de manuscrit est la directivité des sources. Les émissions de baleines à bosse sont moins directives mais pas omnidirectionnelles pour autant. Lorsque le diagramme de directivité est disponible, nous avons montré que l'exploitation de la différence entre le spectre du premier réfléchi surface et celle du trajet direct (tous deux non impactés par le fond) permettait l'estimation de l'attitude de la source (angle entre l'axe principale d'émission et l'horizontale). Une fois cet angle estimé, la perte de directivité du trajet fond peut être déduite. La première intuition est de corriger chaque trajet des pertes de directivité estimées à partir du modèle de directivité. Nous avons néanmoins souligné en fin de chapitre 2 que cette méthode de correction pouvait mener à une sur-corrrection des pertes de directivité et donc fausser l'estimation du coefficient de réflexion. Une piste a été proposée mais le sujet reste encore à approfondir. Des essais en cuve avec une source directive

pourraient être une première étape très utile pour ces travaux.

A plus longs termes, l'emploi opérationnel de la méthode devra être évalué. La contribution de la méthode passive développée pour le REA discret est évidente puisqu'elle contribue à la description de l'environnement. Néanmoins, son adéquation aux exigences (résolution, précision, fréquence, tempo...) des systèmes d'armes ou encore son intégration dans le cadre de la fusion de données multicapteurs restent à étudier. L'estimation des propriétés du fond marin est réalisée pour la bande de fréquences des signaux d'opportunité exploitées. L'information obtenue correspond donc à un milieu équivalent "vu" à ces fréquences. La portabilité à d'autres fréquences notamment pour les besoins de la lutte sous la mer pourra être un axe d'étude.

Conférences et publications

Conférences et communications

Auteurs	C. GERVAISE, A. BARAZZUTTI, F. DADOUCHI, C. IOANA, Y. STEPHAN
Titre de la présentation	A new scheme to estimate the nature of superficial sediment with dolphin whistles
Conférence	Underwater Acoustic Measurements
Date et lieu	Juin 2011 - Kos, Grèce
Auteurs	A. BARAZZUTTI, JP. SESSAREGO, C. GERVAISE, Y. STEPHAN
Titre du poster	Des sifflements de dauphins et un hydrophone pour étudier les fonds marins - premiers résultats
Conférence	Journée des doctorants - ED 353 Sciences pour l'ingénieur
Date et lieu	Avril 2011 - Marseille, France
Auteurs	A. BARAZZUTTI, C. GERVAISE, JP. SESSAREGO, L. DI IORIO, Y. STEPHAN
Titre du poster	Estimer l'attitude d'un dauphin à partir d'un seul capteur - premiers résultats
Conférence	Sérénade
Date et lieu	Avril 2012 - Grenoble, France
Auteurs	A. BARAZZUTTI, C. GERVAISE, JP. SESSAREGO, L. DI IORIO, Y. STEPHAN
Titre de la présentation	Source directivity : one necessary step to estimate the nature of superficial sediment with dolphin whistles
Conférence	European Conference of Underwater Acoustics
Date et lieu	Juillet 2012 - Edimbourg, Ecosse
Auteurs	A. BARAZZUTTI, C. GERVAISE, JP. SESSAREGO, Y. STEPHAN
Titre de la présentation	Field application of a passive geoacoustic inversion in shallow waters using marine mammals-like signals and a single hydrophone
Conférence	1st Underwater Acoustics Conference
Date et lieu	June 2013 - Corfu, Grèce
Auteurs	A. BARAZZUTTI, C. GERVAISE, J.I. MARS
Titre de la présentation	Marine mammal's directivity in geoacoustic inversion scheme
Conférence	Underwater Acoustics Conference
Date et lieu	June 2014 - Rhodes, Grèce
Auteurs	A. BARAZZUTTI, C. GERVAISE, J.I. MARS
Titre de la présentation	La directivité des sources dans un schéma d'inversion géoacoustique
Conférence	Sérénade
Date et lieu	Novembre 2014 - Grenoble, France

Auteurs	A. BARAZZUTTI, C. GERVAISE, K.D. SEGER, A.THODE, J. URBÁN R., P. MARTÍNEZ-LOUSTALOT, M. E. JIMÉNEZ-LÓPEZ, D. LÓPEZ-ARZATE, J.I. MARS
Titre de la présentation	Marine mammals range and depth estimation using non-separated multipath propagation
Date et lieu	Mai 2016 - Salt Lake City, France

Articles de revue

Auteurs	A. BARAZZUTTI , C. GERVAISE, J. I. MARS
Titre de l'article	Utilisation de warping temporel pour étendre le domaine de fonctionnement d'un procédé d'inversion géoacoustique passive
Titre de la revue	Revue de Traitement du Signal
Année de parution	2016
Volume	1, pages 153-72
ISSN ou ISBN (DOI)	DOI :10.3166/TS.33.53-72 ©2016 Lavoisier
Statut de la publication	Publié

Auteurs	A. BARAZZUTTI , C. GERVAISE, Y. STEPHAN, F. DADOUCHI, J.P. SESSAREGO
Titre de l'article	Inversion géoacoustique passive en milieux petits fonds à partir de signaux représentatifs des émissions de cétacés
Titre de la revue	Revue de Traitement du Signal
Année de parution	2013
Volume	30 (3-4-5), pages 169-194
ISSN ou ISBN (DOI)	DOI :10.3166/TS.30.169-194 ©2013 Lavoisier
Statut de la publication	Publié

Auteurs	C. GERVAISE, A. BARAZZUTTI, S. BUSSON, Y. SIMARD, N. ROY
Titre de l'article	Automatic detection of bioacoustics impulses based on kurtosis under weak signal to noise ratio
Titre de la revue	Applied Acoustics
Année de parution	2010
Volume	71, pages 1020-1026
ISSN ou ISBN (DOI)	DOI :10.1016/j.apacoust.2010.05.009 2010 Elsevier
Statut de la publication	Publié

Définitions utiles et calculs

A.1 Le guide d'onde de Pékéris

Nous utilisons beaucoup ce modèle simplifié de guide d'onde dans les travaux tout d'abord parce que c'est un modèle simple avec seulement 3 paramètres à estimer pour le sédiment, mais également parce qu'aux hautes fréquences, la profondeur de pénétration des ondes dans le sol est faible. C'est de plus un modèle suffisant pour caractériser l'environnement en terme de "vérité senseur" c'est à dire pour caractériser l'environnement comme ce qu'une application acoustique donnée pourrait "voir".

Le guide d'onde de Pekeris est un modèle simplifié de configuration petit-fond pour la propagation acoustique ([Pekeris, 1948](#)). Il est constitué d'une colonne d'eau délimitée par une surface horizontale plane parfaitement réfléchissante (surface) et par un fond fluide horizontal plan semi-infini.

La surface introduit donc un déphasage de π et possède ainsi un coefficient de réflexion de -1. La colonne d'eau est considérée isocélère et est caractérisée par une célérité du son constante c , sa densité ρ et l'atténuation α . Le fond est décrit comme uniforme avec une vitesse de compression c_p , une densité ρ_p et une atténuation α_p . Le coefficient de réflexion dépend de ces paramètres.

A.2 Coefficient de réflexion dans le cas d'interfaces multiples

Dans cette annexe sont détaillés les calculs des coefficients de réflexion pour le cas de deux fluides, puis pour le cas de trois fluides (généralisable à plus de couches).

A.2.1 Réflexion à l'interface entre 2 fluides

L'interface entre deux fluides est typiquement le cas du canal de Pékéris. L'onde plane incidente p_i , lorsqu'elle rencontre cette interface, se décompose en une onde transmise et une onde réfléchie. Les pressions transmises et réfléchies sont telles que :

$$p_i(r, z) = 1. \exp(-jk_1 \cos(\theta_1)r + jk_1 \sin(\theta_1)z) \quad (\text{A.1})$$

$$p_r(r, z) = R_{12}. \exp(-jk_1 \cos(\theta_1)r - jk_1 \sin(\theta_1)z) \quad (\text{A.2})$$

$$p_t(r, z) = T_{12}. \exp(-jk_2 \cos(\theta_1)r + jk_2 \sin(\theta_2)z) \quad (\text{A.3})$$

Les indices r , t , et i signifient respectivement réfléchi, transmis et incident. $k_j = \omega/c_j$ est le nombre d'onde du milieu j et θ_j l'angle de réflexion ou de transmission tel qu'indiqué en figure A.1. L'angle de réflexion à l'interface est donné par la loi de Snell-Descartes :

$$\theta_2 = \arcsin((c_2/c_1) \sin \theta_1) \text{ pour } (c_2/c_1) \sin \theta_1 < 1 \quad (\text{A.4})$$

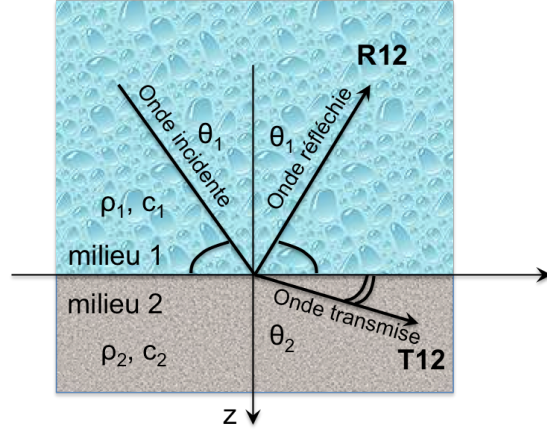


FIGURE A.1 – Interface entre deux milieux (Loi de Snell-Descartes)

si $c_2 > c_1$, il existe un angle limite en-dessous duquel il y a réflexion totale ($|R| = 1$).

A la frontière entre les deux fluides (interface), la condition de continuité de pression à l'instant t impose $p_i(t, r, z=0) + p_r(t, r, z=0) = p_t(t, r, z=0)$ et la condition de continuité de vitesse verticale impose $\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1(t, r, z)}{\partial z_{z=0}} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2(t, r, z)}{\partial z_{z=0}}$ (pour tout r). Ces conditions permettent d'écrire en $z=0$:

$$\exp(-jk_1 \cos(\theta_1)r) \cdot (1 + R_{12}) = T_{12} \cdot \exp(-jk_2 \cos(\theta_1)r) \quad (\text{A.5})$$

$$1/\rho_1 \cdot j \cdot k_1 \sin(\theta_1) \exp(-jk_1 \cos(\theta_1)r) \cdot (1 - R_{12}) = 1/\rho_2 \cdot j \cdot T_{12} \cdot k_2 \sin(\theta_2) \exp(-jk_2 \cos(\theta_1)r) \quad (\text{A.6})$$

$\forall r$, soit pour $r=0$:

$$1 + R_{12} = T_{12} \quad (\text{A.7})$$

$$1 - R_{12} = T_{12} \frac{\rho_1 c_1 / \sin(\theta_1)}{\rho_2 c_2 / \sin(\theta_2)} \quad (\text{A.8})$$

ainsi le coefficient de réflexion R à l'interface entre les 2 fluides vaut :

$$R_{12} = \frac{\rho_2 c_2 / \sin(\theta_2) - \rho_1 c_1 / \sin(\theta_1)}{\rho_2 c_2 / \sin(\theta_2) + \rho_1 c_1 / \sin(\theta_1)} \quad (\text{A.9})$$

A.2.2 Réflexion dans un milieu composé de 3 couches fluides

Lorsqu'un milieu est composé de plusieurs couches, on assiste à des réflexions multiples au sein des strates et l'onde totale réfléchie au niveau du milieu 1 est la somme de toutes les contributions de ses réflexions et transmission multiples (voir figure A.2) avec le déphasage subi lors de la propagation dans le milieu 2 ($k_2 h_2 \sin(\theta_2)$). On conserve les mêmes conditions aux limites à chaque interface que dans le cas précédent à une interface. Ainsi :

$$R = R_{12} + T_{12} R_{23} \exp(-2jk_2 h_2 \sin(\theta_2)) T_{21} \quad (\text{A.10})$$

$$+ T_{12} R_{23} R_{21} R_{23} \exp(-4jk_2 h_2 \sin(\theta_2)) T_{21} \quad (\text{A.11})$$

$$+ T_{12} R_{23} R_{21} R_{23} R_{21} R_{23} \exp(-6jk_2 h_2 \sin(\theta_2)) T_{21} \quad (\text{A.12})$$

$$+ \dots \quad (\text{A.13})$$

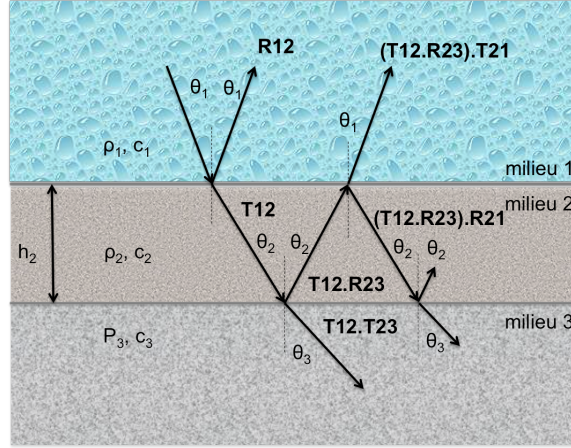


FIGURE A.2 – Réflexions et transmission dans un milieu à 3 fluides (Loi de Snell-Descartes)

soit :

$$R = R_{12} + T_{12}R_{23} \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2))T_{21} \quad (\text{A.14})$$

$$+ T_{12}R_{23}^2 R_{21} \exp(-4jk_2h_2 \sin(\theta_2))T_{21} \quad (\text{A.15})$$

$$+ T_{12}R_{23}^3 R_{21}^2 \exp(-6jk_2h_2 \sin(\theta_2))T_{21} \quad (\text{A.16})$$

$$+ \dots \quad (\text{A.17})$$

On obtient une série géométrique de raison inférieure à 1 et on utilise la relation $R_{12} = -R_{21}$.

$$R = R_{12} + T_{12}T_{21}R_{23} \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2)) \sum_{n=1}^{\infty} R_{21}^n R_{23}^n \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2)) \quad (\text{A.18})$$

$$R = R_{12} + T_{12}T_{21}R_{23} \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2)) \frac{1}{1 - R_{21}R_{23} \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2))} \quad (\text{A.19})$$

$$R = R_{12} + (1 - R_{12}^2)R_{23} \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2)) \frac{1}{1 + R_{12}R_{23} \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2))} \quad (\text{A.20})$$

D'où le coefficient de réflexion R :

$$R = \frac{R_{12} + R_{23} \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2))}{1 + R_{12}R_{23} \exp(-2jk_2h_2 \sin(\theta_2))} \quad (\text{A.21})$$

D'autres méthodes pour calculer le coefficient de réflexion global pour N strates (voir notamment le chapitre 2 de [Pinson, 2011](#), avec le calcul par impédance et le calcul du coefficient de réflexion pour une onde sphérique).

A.3 L'algorithme génétique

On présente ici de manière très simplifiée le principe de l'algorithme génétique (on fait l'impasse sur les probabilités de représentation, les types de croisements et de mutations, etc.). L'algorithme

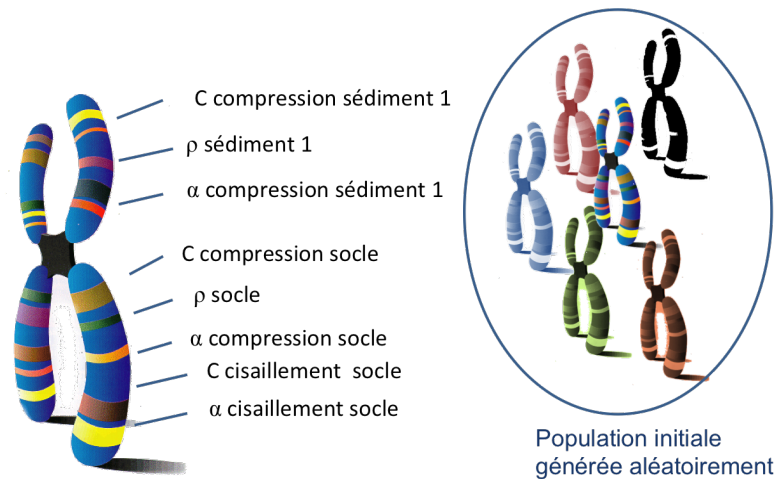


FIGURE A.3 – Individu pour l’algorithme génétique sur l’exemple de l’inversion géoacoustique (à gauche). Population de départ (à droite)

génétique est une méthode d’optimisation globale qui s’inspire de la sélection naturelle (théorie de l’évolution de Darwin). On retrouve aussi l’idée dans les élevages animaliers. L’idée est de partir d’un ensemble d’individus appartenant au groupe des candidats puis de les mettre en compétition sur plusieurs générations pour ne garder que les meilleurs.

On a donc un groupe de candidats qui est un ensemble de chromosomes (ou d’individus) identifiés de manière unique par un ensemble de gènes (i.e. vecteur de paramètres, voir figure A.3). Ces candidats ont été tirés aléatoirement dans le groupe de chromosomes dont les gènes sont dans l’espace des possibles (ex : pour une vitesse de compression du fond, on ne prend pas de valeur négative). On part donc avec une population de N chromosomes, tous potentiels vainqueurs. Sur la figure A.3 on voit (à gauche) l’exemple d’un chromosome (d’un individu) pour l’inversion géoacoustique d’un fond composé d’un sédiment sur un socle dur. Les gènes sont les paramètres que l’on cherche à estimer (célérité, densité, etc.). La population (à droite) est donc un ensemble de fonds candidats.

Tous les chromosomes de la population sont ensuite notés puis classés du meilleur ou moins bon en fonction de leur adéquation au problème (ex : la vache la plus musclée). Les M meilleurs seront clonés dans la génération suivante au sein d’une nouvelle population. Dans notre exemple de l’inversion géoacoustique, le coefficient de réflexion propre à chaque fond de la population est calculé. Les meilleurs fonds sont ceux qui vont fournir un coefficient de réflexion prédit le plus proche de celui observé. On sait en effet relier les paramètres du fond au coefficient de réflexion (voir paragraphe A.2). Pour enrichir la recherche et garder une population de taille constante, à chaque génération on garde donc les M meilleurs de la génération précédente mais on ajoute également $(N-M)$ nouveaux individus, soit sélectionnés au hasard dans le panel initial de candidats, soit réalisés par croisement avec deux des meilleurs individus, soit encore réalisés en mutant un ou plusieurs gènes d’un des meilleurs individus de la population précédente.

On répète ce cycle sur P générations, nombre fixé dès le départ ou en fonction d’un critère (quand on juge qu’on a trouvé l’individu qu’il nous faut).

Libre à chaque signaliste d’adapter les mutations, les croisements et autres paramètres à son problème.

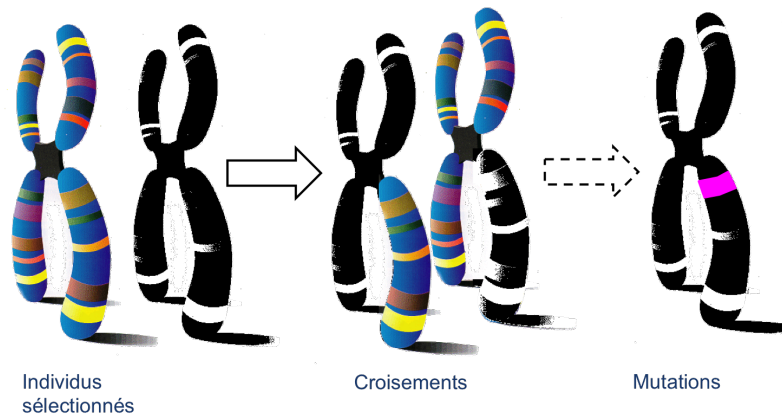


FIGURE A.4 – Quelques nouveaux individus sont introduits à chaque génération (un peu de diversité!) avec des croisements, des mutations



FIGURE A.5 – Le meilleur des meilleurs

Fiches d'identité

Voici une présentation rapide des animaux, oiseaux et autres mentionnés dans ce manuscrit. Il ne s'agit pas de détailler chaque source mais plutôt de permettre de mettre un "visage" sur un nom ou plutôt un corps sur un son ;-)

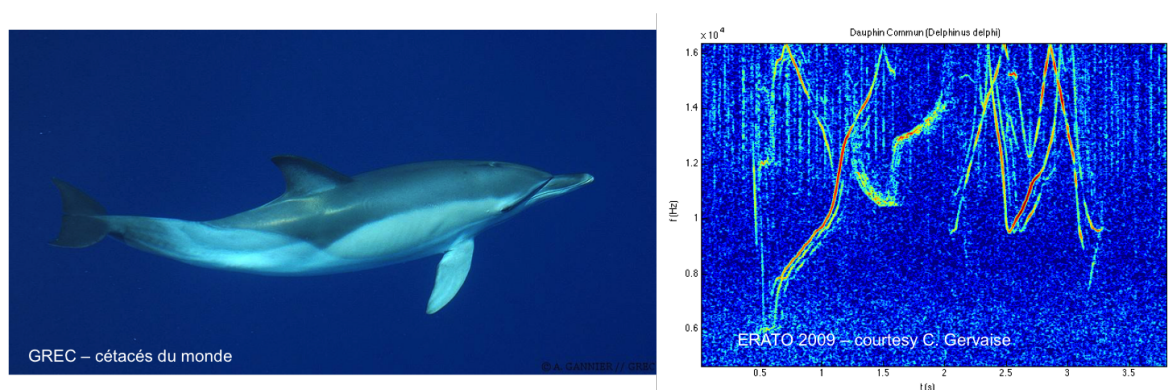


FIGURE B.1 – Dauphin Commun

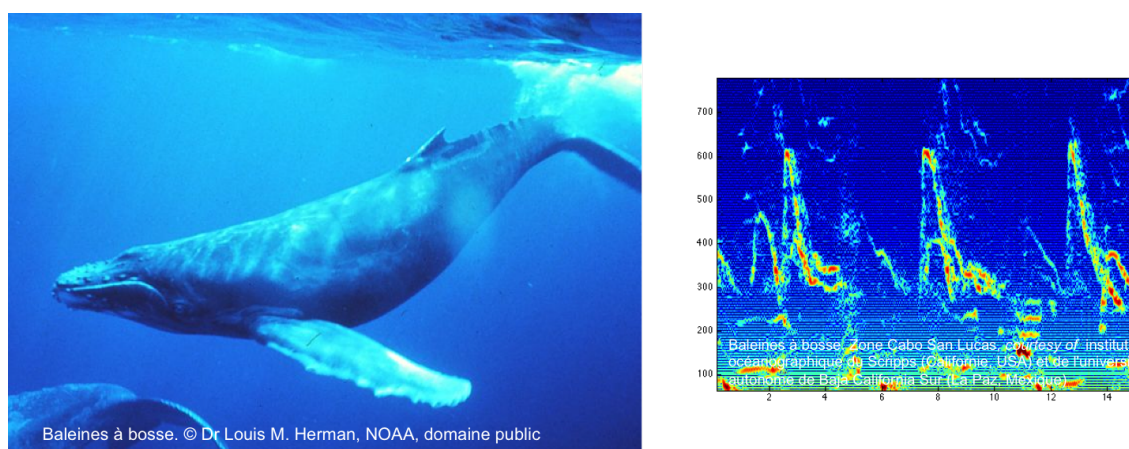


FIGURE B.2 – Baleine à bosse

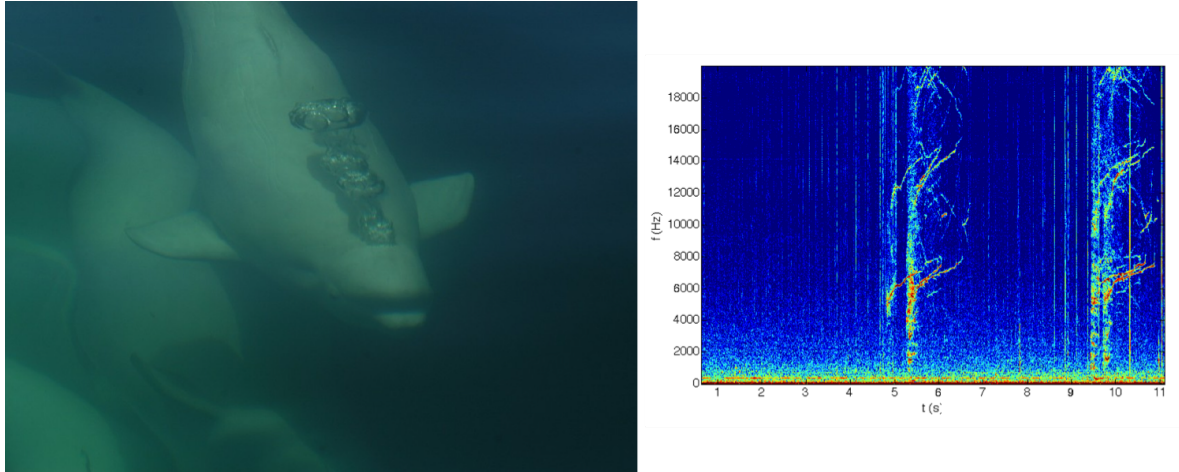


FIGURE B.3 – Béluga

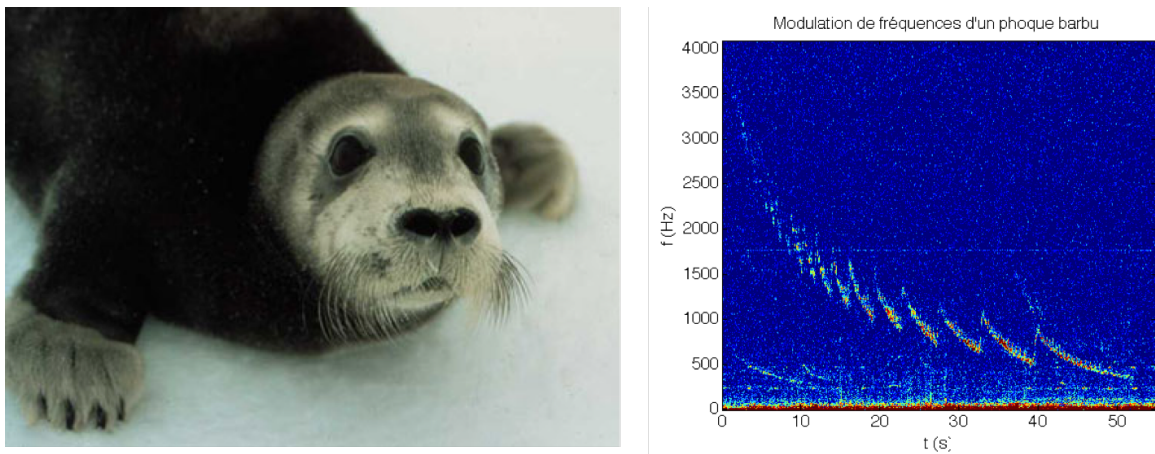


FIGURE B.4 – Phoque barbu

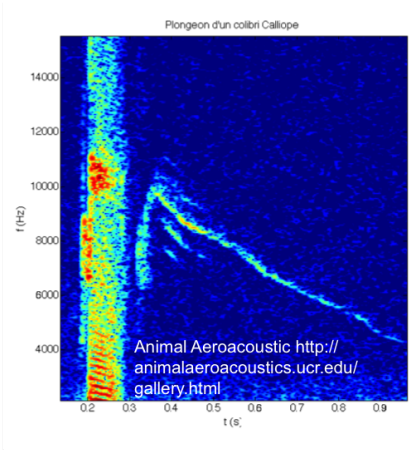


FIGURE B.5 – Colibri Calliope

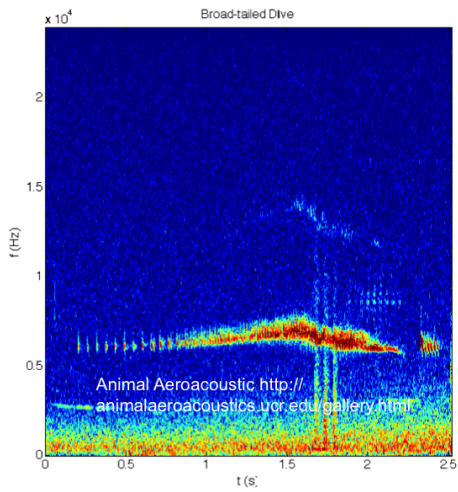


FIGURE B.6 – Colibri à queue large

Références

- Abadi, S. H., A. M. Thode, S. B. Blackwell, and D. R. Dowling (2014), Ranging bowhead whale calls in a shallow-water dispersive waveguide, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1), 130–144, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4881924>. 33
- Abhayapala, P. T. D., et al. (1999), Modal analysis and synthesis of broadband nearfield beamforming arrays, Ph.D. thesis, The Australian National University. 58
- Abrahamsson, L., et al. (2011), Improved active sonar tactical support by through-the-sensor rea, *Proc. 4th UAM (Underwater Acoustic Measurements)*, pp. 51–56. 46
- Au, W. (1993), *The sonar of dolphins*, Springer-Verlag. 51, 54, 55, 61, 66
- Au, W. W., D. S. Houser, J. J. Finneran, W.-J. Lee, L. A. Talmadge, and P. W. Moore (2010), The acoustic field on the forehead of echolocating atlantic bottlenose dolphins (*tursiops truncatus*) a), *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(3), 1426–1434. vii, 55, 56
- Au, W. W. L., and K. Banks (1998), The acoustics of the snapping shrimp *synalpheus parneomeris* in kaneohe bay, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(1), 41–47, <http://dx.doi.org/10.1121/1.423234>. 26
- Au, W. W. L., J. L. Pawloski, P. E. Nachtigall, M. Blonz, and R. C. Gisner (1995), Echolocation signals and transmission beam pattern of a false killer whale (*pseudorca crassidens*), *Acoustical Society of America Journal*, 98, 51–59, 10.1121/1.413643. 54, 55
- Au, W. W. L., B. Branstetter, P. W. Moore, and J. J. Finneran (2012), The biosonar field around an atlantic bottlenose dolphin (*tursiops truncatus*), *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 569–576, 10.1121/1.3662077. 55, 66
- Aubauer, R., M. O. Lammers, and W. W. L. Au (2000), One-hydrophone method of estimating distance and depth of phonating dolphins in shallow water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(5), 2744–2749, 10.1121/1.428660. vi, 44, 45, 75, 85, 100, 111, 118
- Audoly, C., C. Rousset, and T. Leissing (2014), Aquo project—modelling of ships as noise source for use in an underwater noise footprint assessment tool, in *Inter-noise and Noise-con Congress and Conference Proceedings*, vol. 249, pp. 862–871, Institute of Noise Control Engineering. 24
- Baggeroer, A. B. (2011), Performance bounds on geoacoustic inversions, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(4), 2391–2391, 10.1121/1.3654579. 16
- Baggeroer, A. B., W. A. Kuperman, and P. N. Mikhalevsky (1993), An overview of matched field methods in ocean acoustics, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(4), 401–424, 10.1109/48.262292. 15

- Barazzutti, A., C. Gervaise, Y. Stephan, F. Dadouchi, and J.-P. Sessarego (2013), Inversion géoacoustique passive en milieux petits fonds à partir de signaux représentatifs des émissions de cétacés, *Traitement du Signal*, 3-4-5, 169–194. 93
- Barazzutti, A., C. Gervaise, and J. Mars (2014), Marine mammal’s directivity in geoacoustic inversion scheme, in *2nd international conference and exhibition on Underwater Acoustic (UA2014)*, 236, pp. 1557–1562. 69
- Barazzutti, A., C. Gervaise, and J. Mars (2016a), Utilisation de warping temporel pour étendre le domaine de fonctionnement d’un procédé d’inversion géoacoustique passive, *Traitement du Signal*, 1, 53–72. 107
- Barazzutti, A., C. Gervaise, K. D. Seger, A. Thode, J. Urbán, P. Martínez-Loustalot, M. E. Jiménez-López, D. López-Arzate, et al. (2016b), Marine mammal range and depth estimation using non-separated multipath propagation, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(4), 2224–2224. 146
- Battle, D. J., P. Gerstoft, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, and M. Siderius (2003), Geoacoustic inversion of tow-ship noise via near-field-matched-field processing, *IEEE Journal of oceanic engineering*, 28(3), 454–467. 24
- Benoit-Bird, K. J., and W. W. Au (2009), Phonation behavior of cooperatively foraging spinner dolphins, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(1), 539–546. 55
- Bonnel, J. (2010), Analyse de la dispersion acoustique UBF (0-150 hz) pour la surveillance et la caractérisation du milieu marin, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG. v, 12
- Bonnel, J., and N. R. Chapman (2011), Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(2), 101–107, <http://dx.doi.org/10.1121/1.3611395>. 31
- Bonnel, J., and A. Thode (2013), Using warping processing to range bowhead whale sounds from a single receiver, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(5), 3526–3526, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4806344>. 31, 97
- Bonnel, J., B. Nicolas, J. I. Mars, and S. C. Walker (2010), Estimation of modal group velocities with a single receiver for geoacoustic inversion in shallow water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(2), 719–727, 10.1121/1.3459855. 26, 32
- Bonnel, J., C. Gervaise, B. Nicolas, and J. Mars (2011a), Passive geoacoustic inversion in a dispersive waveguide, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(4), 2391–2391, 10.1121/1.3654580. 31, 33
- Bonnel, J., C. Gervaise, P. Roux, B. Nicolas, and J. I. Mars (2011b), Modal depth function estimation using time-frequency analysis, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(1), 61–71, <http://dx.doi.org/10.1121/1.3592230>. 31

- Bonnel, J., C. Gervaise, B. Nicolas, and J. I. Mars (2012), Single-receiver geoacoustic inversion using modal reversal, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 119–128, 10.1121/1.3664083. 31
- Bonnel, J., S. E. Dosso, and N. R. Chapman (2013a), Bayesian geoacoustic inversion of single hydrophone light bulb data using warping dispersion analysis, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 120–130. 15, 31
- Bonnel, J., G. Le Touze, B. Nicolas, and J. I. Mars (2013b), Physics-based time-frequency representations for underwater acoustics : Power class utilization with waveguide-invariant approximation, *IEEE Signal Processing Magazine*, 30(6), 120–129. 31
- Bonnel, J., A. M. Thode, S. B. Blackwell, K. Kim, and A. Michael Macrander (2014), Range estimation of bowhead whale (*balaena mysticetus*) calls in the arctic using a single hydrophone, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1), 145–155, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4883358>. 31, 33, 34, 97
- Branstetter, B. K., P. W. Moore, J. J. Finneran, M. N. Tormey, and H. Aihara (2012), Directional properties of bottlenose dolphin (*tursiops truncatus*) clicks, burst-pulse, and whistle sounds, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2), 1613–1621, 10.1121/1.3676694. vii, 51, 55, 59, 60
- Bucker, H. P. (1976), Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound sources in shallow water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 59(2), 368–373, 10.1121/1.380872. 15
- Buckingham, M. J., and S. A. S. Jones (1987), A new shallow-ocean technique for determining the critical angle of the seabed from the vertical directionality of the ambient noise in the water column, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81(4), 938–946, 10.1121/1.394573. 22, 46
- Buckingham, M. J., E. M. Giddens, F. Simonet, and T. R. Hahn (2002), Propeller noise from a light aircraft for low-frequency measurements of the speed of sound in a marine sediment, *Journal of Computational Acoustics*, 10(4), 445–464. 26
- Carbone, N. M., G. B. Deane, and M. J. Buckingham (1998), Estimating the compressional and shear wave speeds of a shallow water seabed from the vertical coherence of ambient noise in the water column, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(2), 801–813, <http://dx.doi.org/10.1121/1.421201>. 22
- Chailloux, C., B. Kinda, J. Bonnel, C. Gervaise, Y. Stephan, J. Mars, and J.-P. Hermand (2011), Modelling of ambient noise created by a shipping lane to prepare passive inversion : application to ushant, in *Proceedings of the 4th Underwater Acoustics Measurements Conference (UAM 2011)*. 26
- Chapman, N. (1991), Estimation of geoacoustic properties by inversion of acoustic field data, in *Shear waves in marine sediments*, pp. 511–520, Springer. 15

- Chapman, N. R., and K. S. Ozard (1995), *Matched Field Inversion for Geoacoustic Properties of Young Oceanic Crust*, pp. 165–170, Springer Netherlands, Dordrecht, 10.1007/978-94-015-8476-0_27. 15
- Clark, C. J., and E. Mistick (2016), Animal aeroacoustics : Fluttering feathers and humming hummingbird wings, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(4), 2116–2116, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4950296>. 26
- Colleye, O., and E. Parmentier (2012), Overview on the diversity of sounds produced by clownfishes (pomacentridae) : Importance of acoustic signals in their peculiar way of life, *PLoS ONE*, 7(11), 1–11, 10.1371/journal.pone.0049179. 26
- Cros, L., C. Ioana, and A. Quinquis (2005), Synthesis from underwater data : application to the oceanic discrete tomography, in *Europe Oceans 2005*, vol. 1, pp. 507–510 Vol. 1, 10.1109/OCEANSE.2005.1511766. 18
- Cros, L., C. Gervaise, I. Quidu, L. Jaulin, and Y. Stephan (2006), A new concept of ocean acoustic tomography, in *Caractérisation du Milieu Marin (CMM'06)*. 18
- Dadouchi, F., C. Gervaise, C. Ioana, J. Huillery, and J. I. Mars (2013), Automated segmentation of linear time-frequency representations of marine-mammal sounds, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(3), 2546–2555, 10.1121/1.4816579. vi, 43, 98
- Dantzker, M. S., G. B. Deane, and J. W. Bradbury (1999), Directional acoustic radiation in the strut display of male sage grouse *centrocercus urophasianus*, *Journal of experimental biology*, 202(21), 2893–2909. 51, 54, 55
- Deane, G. B. (2012), Surface tension effects in breaking wave noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(2), 700–708, 10.1121/1.4730887. 23
- Deane, G. B., and M. D. Stokes (2010), Model calculations of the underwater noise of breaking waves and comparison with experiment, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(6), 3394–3410, <http://dx.doi.org/10.1121/1.3419774>. 23
- Demoulin, X., L. Pelissero, Y. Stephan, S. Jesus, M. Porter, and E. Coelho (2000), Estimating equivalent bottom geoacoustical parameters from broadband inversion, in *European Conference of Underwater Acoustics (ECUA 2000)*, vol. 1, pp. 191–196, Lyon, France. 6, 46
- Dettmer, J., S. E. Dosso, and C. W. Holland (2008), Joint time/frequency-domain inversion of reflection data for seabed geoacoustic profiles and uncertainties, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3), 1306–1317, <http://dx.doi.org/10.1121/1.2832619>. 46, 90
- Dosso, S. E., M. L. Jeremy, J. M. Ozard, and N. R. Chapman (1993), Estimation of ocean-bottom properties by matched-field inversion of acoustic field data, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(3), 232–239, 10.1109/JOE.1993.236361. 15
- D'Spain, G. L., W. A. Kuperman, C. W. Clark, and D. K. Mellinger (1995), Simultaneous source ranging and bottom geoacoustic inversion using shallow water, broadband dispersion of fin whale calls, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(5), 3353, 10.1121/1.412717. 31, 32, 33

- Fried, S. E., W. A. Kuperman, K. G. Sabra, and P. Roux (2008), Extracting the local green's function on a horizontal array from ambient ocean noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(4), EL183–EL188, 10.1121/1.2960937. 22
- Gaucher, D. (2005), Etude des potentialités de la tomographie acoustique océanique passive, Ph.D. thesis, UBO, thèse de doctorat dirigée par Jourdain Geneviève, Electronique Brest 2005. 18
- Gaucher, D., and Gervaise (2003), Feasibility of passive oceanic acoustic tomography : a cramer rao bounds approach, in *Oceans 2003. Proceedings*, vol. 5, pp. 2767–2773 Vol.5, 10.1109/OCEANS.2003.178345. 16
- Gaucher, D., C. Gervaise, and G. Jourdain (2004), Feasibility of passive ocean acoustic tomography in shallow water context : optimal design of experiments, in *Proceedings of the Seventh European Conference on Underwater Acoustics, Delft (Netherlands)*, Citeseer. 16
- Gerstoft, P., W. S. Hodgkiss, M. Siderius, C.-F. Huang, and C. H. Harrison (2008), Passive fathometer processing, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3), 1297–1305, 10.1121/1.2831930. 22
- Gervaise, C., S. Vallez, C. Ioana, Y. Stephan, and Y. Simard (2007), Passive acoustic tomography : new concepts and applications using marine mammals : a review, *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 87(01), 5–10, doi:10.1017/S0025315407054872. 18, 41, 42
- Gervaise, C., L. Di Iorio, B. Kinda, Y. Stéphan, and N. Josso (2010), Monitoring acoustique passif des campagnes d'océanographie acoustique en presence de mammifères marins : exemple de la campagne erato-09, *Annales hydrographiques*, 7(776). 48
- Gervaise, C., A. Barazzutti, F. Dadouchi, C. Ioana, and Y. Stephan (2011), A new scheme to estimate the nature of superficial sediment with dolphin whistles, in *Proceedings of the 4th Underwater Acoustics Measurements Conference (UAM 2011)*, Greece, Kos, Greece. 34
- Gervaise, C., B. G. Kinda, J. Bonnel, Y. Stephan, and S. Vallez (2012), Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3), 1999–2010, 10.1121/1.3672688. 26, 46
- Hamilton, E. L. (1978), Sound velocity-density relations in sea-floor sediments and rocks, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2), 366–377. 103
- Harrison, C. H. (2004), Sub-bottom profiling using ocean ambient noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(4), 1505–1515, <http://dx.doi.org/10.1121/1.1645854>. 22
- Harrison, C. H., and D. G. Simons (2002), Geoacoustic inversion of ambient noise : A simple method, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(4), 1377–1389, 10.1121/1.1506365. 22, 45, 46
- Hartley, D. J., and R. A. Suthers (1989), The sound emission pattern of the echolocating bat, *ptesicus fuscus*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(3), 1348–1351, <http://dx.doi.org/10.1121/1.397466>. 26, 54, 55

- Heaney, K. D. (2004), Rapid geoacoustic characterization using a surface ship of opportunity, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(1), 88–99, 10.1109/JOE.2003.823286. 26
- Henson, N. G., D. E. Hannay, P. Scrimger, and S. E. Dosso (1995), *Efficient Acoustic Field Computation for Estimating Geoacoustic Bottom Parameters Using Matched-Field Inversion*, pp. 33–38, Springer Netherlands, Dordrecht, 10.1007/978-94-015-8476-0_6. 15
- Hermant, J. (1999), Broad-band geoacoustic inversion in shallow water from waveguide impulse response measurements on a single hydrophone : Theory and experimental results, *IEEE Journal of oceanic engineering*, 24(1). 15, 24
- Hermant, J. P., and P. Gerstoft (1996), Inversion of broad-band multitone acoustic data from the yellow shark summer experiments, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21(4), 324–346, 10.1109/48.544044. 15
- Hildebrand, J. (2009), Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean., *Marine Ecology Progress Series*, 395(5), –, 10.3354/meps08353. 21
- Houck, C., J. Joines, and M. Kay (ACM Transactions on Mathematical Software 1996), A genetic algorithm for function optimization : A matlab implementation. 86
- Ioana, C., and A. Quinquis (2004), On the use of time-frequency warping operators for analysis of marine-mammals signals, *IEEE Journal of oceanic engineering*, II, 605–608. 18, 96, 97, 98
- Ioana, C., C. Gervaise, Y. Stephan, and J. Mars (2010a), Analysis of underwater mammal vocalisations using time-frequency-phase tracker, *Applied Acoustics*, 71, 1070–1080. 42
- Ioana, C., A. Jarrot, C. Gervaise, Y. Stéphan, and A. Quinquis (2010b), Localization in underwater dispersive channels using the time-frequency-phase continuity of signals, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(8), 4093–4107. 42
- Jarrot, A., C. Ioana, and A. Quinquis (2006), An extension of the class of unitary time-warping projectors to discrete-time sequences, *IEEE Journal of oceanic engineering*, III, 412–415. 96, 97, 106
- Jensen, F. B., W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt (1994), Computational ocean acoustics, aip series in modern acoustics and signal processing, *American Institute of Physics, New York*. 80
- Jesus, S. M., C. Soares, E. Coelho, and P. Picco (2006), An experimental demonstration of blind ocean acoustic tomography), *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(3), 1420–1431, <http://dx.doi.org/10.1121/1.2165070>. 18, 24
- Jiménez-López, M. E. (2006), Uso de hábitat de madres con cría y machos cantores de ballena jorobada (megaptera noveaengliae) en la región de los cabos, baja california sur durante el invierno 2004, Ph.D. thesis, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México. xi, 112, 113, 141

- John L. Spiesberger, K. M. F. (1990), Passive localization of calling animals and sensing of their acoustic environment using acoustic tomography, *The American Naturalist*, 135(1), 107–153. 18
- Josso, F., Nicolas, C. Ioana, I. Mars, Jerome, C. Gervaise, and Y. Stephan (2009), On the consideration of motion effects in the computation of impulse response for underwater acoustics inversion, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(4), 1739–1751. 38, 41, 42
- Josso, N. (2010), Caractérisation des milieux sous-marins en utilisant des sources mobiles d’opportunité, Ph.D. thesis, Ecole Doctorale EEATS (Electronique Electrotechnique Automatique Télécommunications Signal). 38, 39, 42, 51, 91, 97
- Juhel, B., et al. (2011), Rumble-2 project : Rapid environment assessment of sea bottom parameters using an operational active low-frequency sonar, in *Proceedings of the Maritime Security, Systems and Technology conference MAST Europe 2011, June 27-29, Marseille, France*. 46
- Kinda, B. G., and J. Bonnel (2015), Passive acoustic observations of tide height in the iroise sea using ambient noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3), EL299–EL304, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4929740>. 22
- Knudsen, V. O., R. Alford, and J. Emling (1948), Underwater ambient noise, *J. Mar. Res.*, 7, 410–429. 21
- Lammers, M., and W. Au (2003), Directionality in the whistles of hawaiian spinner dolphins (*stenella longirostris*) : A signal feature to cue direction of movement ?, *Marine Mammal Science*, 19(2), 249–264. 51
- Lampert, T., and S. O’Keefe (2010), A survey of spectrogram track detection algorithms, *Applied Acoustics*, 71(2), 87–100. 42
- LCL Gue, C. (2016), Impact de la géographie sur les opérations de 1944 en normandie, Centre d’études stratégiques de l’Armée de Terre. 5
- Le Bot, O. (2014), Detection, localization, characterization of underwater acoustic transients., Ph.D. thesis, Université Grenoble Alpes. 31
- Le Bot, O., C. Gervaise, J. Bonnel, and J. Mars (2013), Désentrelacement de clics par analyse du rythme, *Traitement du signal*, 30(3-4-5), 196–218. 34
- Le Bot, O., Y. Simard, N. Roy, J. I. Mars, and C. Gervaise (2016), Whistle source levels of free-ranging beluga whales in saguenay-st. lawrence marine park, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1), 89–93. 31
- Le Gac, J.-C. (2003), Deux approches de l’inversion geoacoustique : inversion par signaux large bande et approche variationnelle, Ph.D. thesis, Toulon. 6
- Le Gall, Y., and J. Bonnel (2013), Passive estimation of the waveguide invariant per pair of modes, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(2), 230–236, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4813846>. 11

- Le Livre Blanc, D. (2008), sécurité nationale, *Courtry-France*, éd Odile Jacob. 7
- Le Touzé, G., B. Nicolas, J. I. Mars, and J.-L. Lacoume (2009), Matched representations and filters for guided waves, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57(5), 1783–1795. 32
- Lee, W.-J., B. Falk, C. Chiu, A. Krishnan, and C. F. Moss (2016), Asymmetric multi-frequency biosonar beam pattern of tongue-clicking bat, *rousettus aegyptiacus*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(4), 2115–2115, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4950292>. 55
- Loye, D. P., and W. F. Arndt (1948), A sheet of air bubbles as an acoustic screen for underwater noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 20(2), 143–145. 9
- Lurton, X. (1998), *Acoustique sous-marine : présentation et applications*, Editions Quae. 13
- Lurton, X., and J.-C. Le Gac (2004), The calimero project : Scientific objectives and first at-sea results, in *1st Seatech Week*, Brest, France. 83
- Madsen, P. T., M. Wahlberg, J. Tougaard, K. Lucke, and P. L. Tyack (2006), Wind turbine underwater noise and marine mammals : implications of current knowledge and data needs, *Marine Ecology Progress Series*. 9
- Maiga, A. M. (2008), Model multi bubbles for cavitation. Equation d' evolution for the pressure, Theses, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I. 23
- Marcos, S., et al. (1998), Les méthodes à haute résolution, *Hermes*. 42
- Marinis, E. d., O. Gasparini, P. Picco, S. Jesus, A. Crise, and S. Salon (2002), Passive ocean acoustic tomography : theory and experiment, in *European Conference of Underwater Acoustics (ECUA 2002)*, pp. 497–502, Gdansk University of Technology. 18
- Martins, N., S. Jesus, C. Gervaise, and A. Quinquis (2002), A time-frequency approach to blind deconvolution in multipath underwater channels, in *Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. II–1225–II–1228, 10.1109/ICASSP.2002.5744022. 41
- Mecklenbräuker, C. F., and A. Gershman (2001), Broadband maximum likelihood estimation of shallow ocean parameters using shipping noise. 24
- Mellinger, D. K. (2016), Overview of the behavioral effects of noise on animals, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(4), 2089–2089. 17
- Mellinger, D. K., K. M. Stafford, S. E. Moore, R. P. Dziak, and H. Matsumoto (2007), An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans, *Oceanography*, 20(4), 36–45. 28
- Moore, P. W., L. A. Dankiewicz, and D. S. Houser (2008), Beamwidth control and angular target detection in an echolocating bottlenose dolphin (*tursiops truncatus*), *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 3324–3332. 55

- Munk, W., and C. Wunsch (1979), Ocean acoustic tomography : a scheme for large scale monitoring, *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 26(2), 123 – 161, 10.1016/0198-0149(79)90073-6. 15
- Munk, W., P. Worcester, and C. Wunsch (1995), Ocean acoustic tomography, *Ocean Acoustic Tomography, by Walter Munk and Peter Worcester and Carl Wunsch*, pp. 447. ISBN 0521470951. Cambridge, UK : Cambridge University Press, June 1995., p. 447. 15
- Nicolas, B., J. Mars, and J.-L. Lacoume (2003), Geoacoustical parameters estimation with impulsive and boat-noise sources, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28(3), 494–501. 24, 33
- Nosal, E.-M., and L. N. Frazer (2007), Sperm whale three-dimensional track, swim orientation, beam pattern, and click levels observed on bottom-mounted hydrophones, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(4), 1969–1978, 10.1121/1.2775423. 31
- Opzeeland, I. V., E. Burkhardt, L. Kindermann, and O. Boebel (2012), Seeking an acoustic niche for anthropogenic sound in the ocean, in *European conference on underwater Acoustics*. 10, 17
- Oudompheng, B. (2015), Array processing for the localization and the contribution of acoustic sources of a passing-by ship using a short antenna, Theses, Université Grenoble Alpes. v, 23, 24
- Park, C., W. Seong, and P. Gerstoft (2005), Geoacoustic inversion in time domain using ship of opportunity noise recorded on a horizontal towed array, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(4), 1933–1941. 24
- Pekeris, C. L. (1948), Theory of propagation of explosive sound in shallow water, *Geological Society of America Memoirs*, 27, 1–116. 153
- Perrier, M. (2008), Stereo - compte-rendu d'essais en mer, *Tech. rep.*, THALES SAFARE - SEMANTIC - SHOM. 83
- Petersen, J. K., and T. Malm (2006), Offshore windmill farms : threats to or possibilities for the marine environment, *AMBIO : A Journal of the Human Environment*, 35(2), 75–80. 9
- Pinson, S. (2011), Caractérisation des fonds marins par la méthode des sources images, Ph.D. thesis, Université de Bretagne occidentale-Brest. 155
- Plantevin, P., J. Le Gac, E. Auger, G. Theuillon, and Y. Stephan (2009), A joint seismo-geoacoustic inversion in shallow water using a subsurface towed sound source, *Journal of Marine Systems*, 78, S321–S332. 46
- Porter, M., S. Jesus, Y. Stephan, X. Demoulin, and E. Coelho (1997), Exploiting reliable features of the ocean channel response, in *Proceedings of Shallow Waters Acoustic Conference*, Acoustical Society of America. 15

- Porter, M. B., Y. Stephan, X. Démoulin, S. Jesus, and E. Coelho (1999), Using the echo pattern to range a sound source, in *First International Symposium on Physics in Signal and Image Processing*, pp. 1–8. 15
- Potty, G. R., J. H. Miller, J. F. Lynch, and K. B. Smith (2000), Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(3), 973–986, <http://dx.doi.org/10.1121/1.1286221>. 15
- Potty, G. R., J. H. Miller, P. S. Wilson, J. F. Lynch, and A. Newhall (2008), Geoacoustic inversion using combusive sound source signals, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(3), EL146–EL150, <http://dx.doi.org/10.1121/1.2960974>. 31
- Purves, P., and G. E. Pilleri (1983), *Echolocation in whales and dolphins*. vii, 56
- Quijano, J. E., S. E. Dosso, J. Dettmer, L. M. Zurk, M. Siderius, and C. H. Harrison (2012), Bayesian geoacoustic inversion using wind-driven ambient noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 2658–2667, <http://dx.doi.org/10.1121/1.3688482>. 22
- Quijano, J. E., S. E. Dosso, J. Dettmer, L. M. Zurk, and M. Siderius (2013), Trans-dimensional geoacoustic inversion of wind-driven ambient noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(1), EL47–EL53, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4771975>. 22
- Robert E. Knowlton, J. M. M. (1963), Sound production in the snapping shrimps *alpheus* (crangon) and *synalpheus*, *Biological Bulletin*, 125(2), 311–331. 26
- Roubi, A., B. S., B. M.A., B. Danielou, and G. Jouet (2009), Analyse sédimentologique des prélèvements in situ de la campagne calimero 3, rapport final du contrat de recherche 08/cr/0001, *Tech. rep.*, SHOM-IFREMER. 83
- Roux, P., K. G. Sabra, W. A. Kuperman, and A. Roux (2005), Ambient noise cross correlation in free space : Theoretical approach, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(1), 79–84, <http://dx.doi.org/10.1121/1.1830673>. 22
- Roy, N., Y. Simard, and C. Gervaise (2010), 3d tracking of foraging belugas from their clicks : Experiment from a coastal hydrophone array, *Applied Acoustics*, 71, 1050–1056. 31
- Salvaterra, C., and J. Boutonnier (2013), Calcul du bruit ambiant de trafic maritime statistique, in *Journée de rencontre des utilisateurs du Pôle de Calcul Intensif pour la Mer, France*. 21
- Sanjana, M. C., G. Latha, and M. M. Mahanty (2013), Seabed characteristics from ambient noise at three shallow water sites in northern indian ocean, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(4), 366–372, [10.1121/1.4818936](http://dx.doi.org/10.1121/1.4818936). 22
- Schmidt, R. (1986), Multiple emitter location and signal parameter estimation, *IEEE Antennas Propagation*, 34(3), 276–280. 42
- Seger, K. D., A. M. Thode, J. Urbán R., P. Martínez-Loustalot, M. E. Jiménez-López, and D. López-Arzate (2016), Humpback whale-generated ambient noise levels provide insight into singers’ spatial densities, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(4), 2172–2172, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4950446>. 31, 113

- Shimozawa, T., N. Suga, P. Hendler, and S. Schuetze (1974), Directional sensitivity of echolocation system in bats producing frequency-modulated signals, *Journal of Experimental Biology*, 60(1), 53–69. 54
- Siderius, M., C. H. Harrison, and M. B. Porter (2006), A passive fathometer technique for imaging seabed layering using ambient noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(3), 1315–1323, 10.1121/1.2227371. 22
- Siderius, M., H. Song, P. Gerstoft, W. S. Hodgkiss, P. Hursky, and C. Harrison (2010), Adaptive passive fathometer processing, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(4), 2193–2200, 10.1121/1.3303985. 22
- Simard, Y., S. Roy, N. and Giard, M. Gervaise, C. and Conversano, and N. Menard (2010), Estimating whale density from their whistling activity : Example with st. lawrence beluga, *Applied Acoustics*, 71, 1081–1086. 31
- Southall, B. L., A. E. Bowles, W. T. Ellison, and J. J. Finneran (2007), Marine mammal noise exposure criteria : initial scientific recommendations (2007), *Aquatic Mammals*, 33, 1–121, and Gentry, Roger L. and Greene Jr., Charles R. and Kastak, David and Ketten, Darlene R. and Miller, James H. and Nachtigall, Paul E. and Richardson, W. John and Thomas, Jeanette A. and Tyack, Peter L. 17
- Spiesberger, J. L. (1999), Locating animals from their sounds and tomography of the atmosphere : Experimental demonstration, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(2), 837–846, <http://dx.doi.org/10.1121/1.427100>. 18
- Stotts, S. A., D. P. Knobles, R. A. Koch, D. E. Grant, K. C. Focke, and A. J. Cook (2004), Geoacoustic inversion in range-dependent ocean environments using a plane wave reflection coefficient approach, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(3), 1078–1102, <http://dx.doi.org/10.1121/1.1646405>. 46, 90
- Strother, G. K., and M. Mogus (1970), Acoustical beam patterns for bats : Some theoretical considerations, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 48(6B), 1430–1432, <http://dx.doi.org/10.1121/1.1912304>. 54
- Taroudakis, M. I., and G. Makrakis (2001), *Inverse Problems in Underwater Acoustics*, Springer Science & Business Media. 38
- Theuillon, G., Y. Stephan, and A. Pacault (2008), High-resolution geoacoustic characterization of the seafloor using a subbottom profiler in the gulf of lion, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(3), 240–254. 83
- Thode, A. M., G. L. D’Spain, and W. A. Kuperman (2000), Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(3), 1286–1300, 10.1121/1.428417. 31, 32, 33, 44
- Thode, A. M., P. Gerstoft, M. Guerra, M. Noad, D. Stokes, and D. Cato (2006), Matched-field processing of humpback whale song off eastern australia, *Acoustic sensing technique for shallow water environment*. 34

- Tiemann, C. O., A. M. Thode, J. Straley, V. O’Connell, and K. Folkert (2006), Three-dimensional localization of sperm whales using a single hydrophone, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4), 2355–2365, <http://dx.doi.org/10.1121/1.2335577>. 44, 119, 121, 145
- Tolstoy, A. (1993), *Matched field processing for underwater acoustics.*, xiv + 212 pp., Singapore : World Scientific. 15
- Tolstoy, A. (1996), Using matched-field processing to estimate shallow-water bottom properties from shot data taken in the mediterranean sea, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21(4), 471–479, 10.1109/48.544058. 15
- Traer, J., P. Gerstoft, and W. S. Hodgkiss (2011), Ocean bottom profiling with ambient noise : A model for the passive fathometer, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(4), 1825–1836, 10.1121/1.3552871. 22
- Vallez, S. (2009), inversion géoacoustique passive à partir des bruits rayonnés par les navires, Ph.D. thesis, Brest. 26, 46
- Vallez, S., C. Gervaise, A. Khenchaf, Y. Stephan, and M. André (2008), Inversion géoacoustique d’un canal très petits fonds à partir des navires en mouvement traitement incohérent. v, 25, 26, 46
- Warner, G. A., S. Dosso, D. Hannay, and J. Dettmer (2015), Environmental inversion using bowhead whale calls in the chukchi sea, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3), 1795–1795, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4933693>. 15
- Wenz, G. M. (1962), Acoustic ambient noise in the ocean : Spectra and sources, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), 1936–1956, 10.1121/1.1909155. v, 19, 20
- Wiggins, S. M., M. A. McDonald, L. M. Munger, S. E. Moore, and J. A. Hildebrand (2004), Waveguide propagation allows range estimates for north pacific right whales in the bering sea, *Canadian acoustics*, 32(2), 146–154. 31, 32, 33
- Wikipédia (2016), Tomographie — wikipédia, l’encyclopédie libre, [En ligne ; Page disponible le 3-août-2016]. 15
- Wilhelmsson, D., T. Malm, and M. C. Öhman (2006), The influence of offshore windpower on demersal fish, *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 63(5), 775–784. 9
- Wotton, J. M., R. L. Jenison, and D. J. Hartley (1997), The combination of echolocation emission and ear reception enhances directional spectral cues of the big brown bat, *eptesicus fuscus*, *Acoustical Society of America Journal*, 101, 1723–1733, 10.1121/1.418271. 26, 55
- Yardim, C., P. Gerstoft, and W. S. Hodgkiss (2010), Geoacoustic and source tracking using particle filtering : Experimental results, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(1), 75–87, 10.1121/1.3438475. 22

-
- Yardim, C., P. Gerstoft, and W. S. Hodgkiss (2012), Sequential geoacoustic inversion at the continental shelfbreak, *The Journal of the Acoustical Society of America*, *131*(2), 1722–1732, 10.1121/1.3666012. 22
- Zimmer, W. M. X. (2011), *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans*, Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans, Cambridge University Press. 28, 31, 43, 50, 51, 55
- Zimmer, W. M. X. (2013), Range estimation of cetaceans with compact volumetric arrays, *The Journal of the Acoustical Society of America*, *134*(3), 2610–2618, 10.1121/1.4817892. 31

Résumé — L'inversion géoacoustique permet d'estimer les propriétés du milieu marin à partir de ses effets sur la propagation acoustique. Les politiques de protection de l'environnement, mais également les besoins militaires liés à la discrétion, ont conduit la communauté à se pencher sur des alternatives discrètes et moins invasives que les méthodes actuelles actives. En contexte passif, l'environnement est étudié à partir de son impact sur la propagation de signaux émis par des sources d'opportunité déjà présentes dans le milieu. Les travaux présentés dans ce manuscrit sont consacrés au développement et à l'évaluation d'une méthode d'inversion géoacoustique passive à partir de modulations de fréquences de mammifères marins enregistrées sur un unique hydrophone. Cette méthode monocapteur exploite la propagation multitrajets de ces modulations de fréquences, propagées en environnement petits fonds pour en extraire l'information nécessaire à l'estimation du coefficient de réflexion du fond. Le traitement d'une collection de signaux permet de décrire une courbe du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance sur le fond. La méthode est dotée d'outils permettant l'extraction des observables nécessaires à l'inversion. Des outils de séparation haute résolution des trajets ont été développés pour les cas de propagation multitrajets non résolue. Avec un unique capteur, la localisation en 3D est rendue possible grâce à l'apport de la bathymétrie, même lorsque les trajets d'arrivée sont non séparables et non identifiants. La directivité des sources hautes fréquences, ciblées pour l'inversion, a été analysée et sa prise en compte dans le cas d'un diagramme de directivité connu est présentée.

Mots clés : Inversion géoacoustique passive, tomographie passive, mammifère marin, déformation temporelle, théorie des rayons, propagation acoustique, petits fonds, observation de l'environnement.

Abstract — The geoacoustic inversion aims at giving an estimate of the oceanographic properties impacting the acoustic propagation. Most of the current geoacoustic inversion methods are active methods. However, the environment protection policy as well as military necessity of discretion is leading the community into working on less invasive and more discrete inversion schemes. The main idea of passive geoacoustic inversion is to take advantage of opportunity sources by listening to the effect of the environmental properties on their propagation. This PhD work focuses on the development and the validation of a new passive geoacoustic inversion scheme relying on marine mammals frequency modulations recorded on a single hydrophone in shallow waters. This mono-receiver method uses the multipath propagation. The processing of a set of calls provide an estimate of the reflexion coefficient regarding the grazing angle. High resolution separation tools based on bespoke time warping operators have been developed to improve the range of the method in case of not reported multipaths. When the paths remains unresolved (thus unidentified), others tools have been implemented that allows to locate the source with groups of unidentified paths. This localisation can be reached in 3D using only one receiver in varied bathymetry. We analyse the directivity for the high-frequency signals we planed to use and demonstrate how to take into account the directivity as soon as the source directivity pattern is available.

Keywords : Passive geocoustic inversion, passive tomography, marine mammals, time warping, ray theory, acoustic propagation, shallow waters, environmental observation.

Direction Générale de l'Armement / Ingénierie des Projets / Direction Technique

60 boulevard du Général VALIN - 75509 PARIS Cedex 15

Laboratoire Grenoble Images Parole Signal Automatique

Domaine Universitaire - BP 46 - 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France.