



HAL
open science

Amélioration des techniques de reconnaissance automatique de mines marines par analyse de l'écho à partir d'images sonar haute résolution

Ayda Elbergui

► **To cite this version:**

Ayda Elbergui. Amélioration des techniques de reconnaissance automatique de mines marines par analyse de l'écho à partir d'images sonar haute résolution. Autre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2013. Français. NNT : 2013BRES0042 . tel-01124245

HAL Id: tel-01124245

<https://theses.hal.science/tel-01124245v1>

Submitted on 6 Mar 2015

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.



université de bretagne
occidentale



THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

*Mention : ISTI / Acoustique sous-marine et traitement du signal
École Doctorale (EDSM)*

présentée par

Ayda ELBERGUI

Préparée au laboratoire Lab-STICC UMR
CNRS 6285, ENSTA Bretagne, Brest

Amélioration des techniques de reconnaissance automatique de mines marines par l'analyse de l'écho à partir d'images sonar haute résolution

Thèse soutenue le 10 Décembre 2013

devant le jury composé de :

Philippe BLONDEL

Dr, Maître de conférence, Université de Bath / *Rapporteur*

Kamel HAMROUNI

Professeur des Universités, ENIT / *Rapporteur*

Christophe COLLET

Professeur des Universités, Université de Strasbourg / *Examineur*

Gilles BUREL

Professeur des Universités, Université de Brest / *Examineur*

Basel SOLAIMAN

Professeur des Universités, ENST Bretagne / *Directeur de thèse*

Isabelle QUIDU

Maître de conférence, ENSTA Bretagne / *Encadrant*

Benoit ZERR

Dr, Enseignant-Chercheur, ENSTA Bretagne / *Encadrant*



Ecole Doctorale des Sciences de la Mer (EDSM)
THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE
OCCIDENTALE

Présentée par

Ayda ELBERGUI

Pour obtenir le titre de Docteur de l'Université de Bretagne Occidentale

**Amélioration des techniques de
reconnaissance automatique de mines
marines par l'analyse de l'écho à partir
d'images sonar haute résolution**

Soutenue le 10 Décembre 2013 devant le Jury composé de :

Philippe BLONDEL Université de Bath, Bath, Royaume-Uni

Kamel HAMROUNI ENIT, Tunis, Tunisie

Christophe COLLET Université de Strasbourg

Gilles BUREL Université de Brest

Basel SOLAIMAN ENST Bretagne

Benoit ZERR ENSTA Bretagne

Isabelle QUIDU ENSTA Bretagne

Travaux préparés au laboratoire STIC/OSM (Ocean Sensing and Mapping),
ENSTA Bretagne (ex:ENSEITA), Brest

Résumé

La classification des cibles sous-marines est principalement basée sur l'analyse de l'ombre acoustique. La nouvelle génération des sonars d'imagerie fournit une description plus précise de la rétrodiffusion de l'onde acoustique par les cibles. Par conséquent, la combinaison de l'analyse de l'ombre et de l'écho est une voie prometteuse pour améliorer la classification automatique des cibles. Quelques systèmes performants de classification automatique des cibles s'appuient sur un modèle pour faire l'apprentissage au lieu d'utiliser uniquement des réponses expérimentales ou simulées de cibles pour entraîner le classificateur. Avec une approche basée modèle, un bon niveau de performance en classification peut être obtenu si la modélisation de la réponse acoustique de la cible est suffisamment précise.

La mise en oeuvre de la méthode de classification a nécessité de modéliser avec précision la réponse acoustique des cibles. Le résultat de cette modélisation est un simulateur d'images sonar (SIS). Comme les sonars d'imagerie fonctionnent à haute et très haute fréquence le modèle est basé sur le lancer de rayons acoustiques. Plusieurs phénomènes sont pris en compte pour augmenter le réalisme de la réponse acoustique (les effets des trajets multiples, l'interaction avec le fond marin, la diffraction, etc.).

La première phase du classificateur utilise une approche basée sur un modèle. L'information utile dans la signature acoustique de la cible est nommée "A-scan". Dans la pratique, l'A-scan de la cible détectée est comparé à un ensemble d'A-scans générés par SIS dans les mêmes conditions opérationnelles. Ces gabarits (A-scans) sont créés en modélisant des objets manufacturés de formes simples et complexes (mines ou non mines). Cette phase intègre un module de filtrage adapté pour permettre un résultat de classification plus souple capable de fournir un degré d'appartenance en fonction du maximum de corrélation obtenu. Avec cette approche, l'ensemble d'apprentissage peut être enrichi afin d'améliorer la classification lorsque les classes sont fortement corrélées. Si la différence entre les coefficients de corrélation de l'ensemble de classes les plus probables n'est pas suffisante, le résultat est considéré ambigu. Une deuxième phase est proposée afin de distinguer ces classes en ajoutant de nouveaux descripteurs et/ou en ajoutant davantage d'A-scans dans la base d'apprentissage et ce dans de nouvelles configurations proches des configurations ambiguës. Ce processus de classification est principalement évalué sur des données simulées et sur un jeu limité des données réelles.

L'utilisation de l'A-scan a permis d'atteindre des bonnes performances de classification en mono-vue et a amélioré le résultat de classification pour certaines ambiguïtés récurrentes avec des méthodes basées uniquement sur l'analyse d'ombre.

Mots clé : Classification de cibles sous-marines, écho acoustique, A-scan, images sonar latéral, simulation d'images sonar, filtrage adapté, lancer de rayons, Sonel Mapping.

Abstract

Underwater target classification is mainly based on the analysis of the acoustic shadows. The new generation of imaging sonar provides a more accurate description of the acoustic wave scattered by the targets. Therefore, combining the analysis of shadows and echoes is a promising way to improve automated target classification. Some reliable schemes for automated target classification rely on model based learning instead of only using experimental samples of target acoustic response to train the classifier. With this approach, a good performance level in classification can be obtained if the modeling of the target acoustic response is accurate enough.

The implementation of the classification method first consists in precisely modeling the acoustic response of the targets. The result of the modeling process is a simulator called SIS (Sonar Image Simulator). As imaging sonars operate at high or very high frequency the core of the model is based on acoustical ray-tracing. Several phenomena have been considered to increase the realism of the acoustic response (multi-path propagation, interaction with the surrounding seabed, edge diffraction, etc.).

The first step of the classifier consists of a model-based approach. The classification method uses the highlight information of the acoustic signature of the target called "A-scan". This method consists in comparing the A-scan of the detected target with a set of simulated A-scans generated by SIS in the same operational conditions. To train the classifier, a Template base (A-scans) is created by modeling manmade objects of simple and complex shapes (Mine Like Objects or not). It is based on matched filtering in order to allow more flexible result by introducing a degree of match related to the maximum of correlation coefficient. With this approach the training set can be extended increasingly to improve classification when classes are strongly correlated. If the difference between the correlation coefficients of the most likely classes is not sufficient the result is considered ambiguous. A second stage is proposed in order to discriminate these classes by adding new features and/or extending the initial training data set by including more A-scans in new configurations derived from the ambiguous ones. This classification process is mainly assessed on simulated sidescan sonar data but also on a limited data set of real data.

The use of A-scans have achieved good classification performances in a mono-view configuration and can improve the result of classification for some remaining confusions using methods only based on shadow analysis.

Keywords : Underwater target classification, acoustic highlight, A-scan, sidescan sonar images, sonar image simulation, matched filter, ray tracing, Sonel Mapping.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les personnes qui m'ont encadré au quotidien, mes deux encadrants Mademoiselle Isabelle Quidu, Maître de conférence et Monsieur Benoit Zerr, Enseignant-Chercheur et responsable de l'équipe OSM à l'ENSTA Bretagne, pour leurs conseils et leurs recommandations tout en me laissant travailler librement.

Je remercie également Monsieur Basel Solaiman, Professeur des Universités à l'ENST Bretagne, qui est mon directeur de thèse et qui a su aussi m'encourager à chaque étape. J'adresse mes remerciements chaleureuses à tous les membres de Jury d'avoir accepté de donner de leurs temps pour rapporter ou examiner ce travail : Monsieur Philippe Blondel, Maître de conférences à l'Université de Bath, Monsieur Kamel Hamrouni, Professeur des Universités à l'ENIT, Monsieur Christophe Collet, Professeur des Universités à l'Université de Strasbourg et Monsieur Gilles Burel, Professeur des Universités à l'Université de Brest.

Merci à vous, Monsieur Michel LeGris, Enseignant-Chercheur à l'ENSTA Bretagne et notre expert acousticien de l'équipe OSM ainsi que Monsieur Gilles LeChenadec, Enseignant-Chercheur à l'ENSTA Bretagne, pour son aide dans la partie analyse de données.

Je tiens aussi à remercier la société iXBlue et le GESMA, une division du ministère français de la Défense (DGA) pour la fourniture de données réelles.

Je n'oublie pas Imen et Ahmed, Ingénieurs de recherche à l'ENSTA Bretagne, pour les discussions constructives que nous avons eu ainsi que le temps que vous m'avez accordé durant la préparation du manuscrit.

Finalement, je remercie mes collègues de bureau M115 : Amin, Coralie, Ridha et Seif pour l'ambiance conviviale et à tous je souhaite une bonne continuation "Vous êtes les suivants".

Un Grand Merci à mon cher époux pour son aide précieux et son soutien inconditionnel tout au long de mon parcours mais surtout sa patience pendant des longues périodes durant lesquelles il a su être le papa et la maman pour notre trésor Assya.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iv
Remerciements	vi
Table des matières	viii
Liste des figures	xiv
Liste des tableaux	xviii
Abréviations	xx
Symboles	xxii
1 Introduction générale	1
1.1 Motivation	3
1.2 Contributions	3
1.3 Organisation du manuscrit	4
2 Généralités et traitements sur les images sonar	7
2.1 Introduction	7
2.2 Notions utiles du sonar	8
2.2.1 Architecture du sonar	8
2.2.2 Principe de fonctionnement du sonar latéral	9
2.2.3 Antenne et directivité	9
2.2.4 Attributs de l'environnement	11
2.2.4.1 Paramètres physiques de l'eau de mer	11
2.2.4.2 Phénomène de réverbération	12
2.2.4.3 Bruit ambiant	12
2.2.5 Equation du sonar	12
2.2.6 Perte par propagation	13
2.2.6.1 Perte par absorption	13
2.2.6.2 Perte par divergence géométrique (par diffusion)	13

2.3	Imagerie par sonar latéral	15
2.3.1	Formation des images sonar	15
2.3.2	Spécificités des images sonar	15
2.3.3	Résolution du sonar latéral	17
2.3.3.1	Pouvoir de résolution en distance	18
2.3.3.2	Pouvoir de résolution en gisement	19
2.3.3.3	Résolution spatiale	20
2.3.3.4	Echantillonnage	21
2.3.3.5	Dimension du pixel	21
2.3.4	Sources d'imperfections (dégradations)	22
2.3.4.1	Le bruit multiplicatif (<i>speckle</i>)	22
2.3.4.2	Réverbération	22
2.3.4.3	Bruits	23
2.3.4.4	Trajets multiples	23
2.3.5	Distribution statistique des pixels (images sonar)	24
2.3.6	Signaux et traitements des données brutes	24
2.3.6.1	Fréquences et contraintes	24
2.3.6.2	Emission	25
2.3.6.3	Réception et traitements	27
2.4	Formation de la réponse acoustique d'une cible	29
2.4.1	Réponse acoustique (théorique) d'une cible rigide immergée dans un fluide	29
2.4.2	A-scan	31
2.5	Conclusion	33
3	Modélisation des images sonar	35
3.1	Introduction	35
3.2	Techniques de modélisation en acoustique sous-marine	36
3.2.1	Intérêt de la modélisation	36
3.2.2	L'équation d'onde	36
3.2.3	La célérité	37
3.2.4	Effet de la célérité sur la propagation d'onde	39
3.2.5	Modèles de la propagation	43
3.2.5.1	Méthode des rayons	44
3.2.5.2	Méthodes ondulatoires	44
3.2.6	Modèles de la rétrodiffusion	44
3.2.6.1	Description du phénomène de rétrodiffusion	45
3.2.6.2	Les différents types de rétrodiffusion dans un environnement océanique	48
3.2.6.3	Les modèles physiques de diffusion acoustique	50
3.2.6.4	La rétrodiffusion à partir d'un fond marin	52
3.2.6.5	Conclusion sur les modèles de rétrodiffusion du fond	54
3.2.6.6	La rétrodiffusion à partir d'un objet	55
3.2.6.7	Conclusion sur les modèles de rétrodiffusion d'un objet	57
3.3	Etat de l'art des simulateurs d'images sonar	58
3.3.1	Domaine fréquentiel	58
3.3.2	Domaine temporel	60

3.4	Motivations	61
3.5	Choix de la technique de modélisation	62
3.5.1	Approche	62
3.5.1.1	Optique géométrique et optique physique	63
3.5.1.2	Modèle simplifié de Freedman	63
3.5.1.3	Principe de Huygens	65
3.5.2	Hypothèses et Approximations	66
3.5.3	Le lancer de rayons optiques	67
3.5.4	Différences entre images optiques et images sonar	68
3.6	Description du modèle	69
3.6.1	Modèle de la propagation	69
3.6.1.1	Lancer de rayons acoustiques	69
3.6.1.2	Propagation multi-trajets	69
3.6.1.3	Méthode du “Photon mapping” dans l’optique (H.W.Jensen)	71
3.6.1.4	Méthode du “Sonel Mapping” dans l’acoustique des salles	72
3.6.1.5	“Roulette Russe” adaptée	73
3.6.1.6	Méthode du “Sonel Mapping” dans l’acoustique sous marine	73
3.6.1.7	Bilan de la technique des trajets multiples en SIS	77
3.6.2	Modèle de rétrodiffusion des cibles	78
3.6.3	Modèle de rétrodiffusion du fond (réverbération)	79
3.7	Implémentation de la méthode de lancer de rayons simple	80
3.7.1	Géométrie de la scène	80
3.7.2	Images Simulées	81
3.8	Effets de la célérité sur l’écho simulé d’une cible cylindrique	82
3.9	Comparaison des images simulées avec et sans prise en compte des trajets multiples	86
3.10	Conclusion	89
4	Classification des mines sous marines	91
4.1	Introduction	91
4.2	État de l’art des systèmes de classification des mines sous-marines	92
4.2.1	Classification Mine/Non Mine	93
4.2.2	Identification des cibles	94
4.2.2.1	Classificateurs basés sur l’ombre acoustique	94
4.2.2.2	Classificateurs qui utilisent l’écho acoustique	95
4.2.3	Classificateurs basés modèle	97
4.2.4	Appariement de gabarits	98
4.2.4.1	Principe	98
4.2.4.2	Apprentissage	98
4.2.4.3	Mesure de similarité	99
4.2.4.4	Différentes approches d’appariement	99
4.2.4.5	Choix de l’approche : motivations	101
4.3	Sélection des attributs	102
4.3.1	Motivation	103
4.3.2	Méthodes de sélection d’attributs	103
4.4	Méthode proposée pour la classification des mines sous-marines	104
4.4.1	Appariement d’A-scans	104

4.4.2	Phase 1 de la classification : Filtrage adapté	107
4.4.3	Phase 2 de la classification : gestion des ambiguïtés	108
4.4.3.1	Ajout de nouveaux descripteurs	108
4.4.3.2	Enrichissement de la base d'apprentissage	112
4.5	Conclusion	114
5	Expérimentations et résultats	117
5.1	Introduction	117
5.2	Résultats de simulations	117
5.2.1	Paramètres de configuration	118
5.2.2	Modélisation des cibles	120
5.2.3	Modélisation des fonds	122
5.2.4	Prise en compte de l'orientation	123
5.3	Résultats de la classification	123
5.3.1	Résultats de la corrélation (phase 1 de l'algorithme) sur des images réelles	126
5.3.2	Résultats de la corrélation sur des images simulées (phase 1 de l'algorithme)	127
5.3.2.1	Configurations des données	127
5.3.2.2	Définitions des états possibles de l'algorithme	129
5.3.2.3	Résultats à courte distance	129
5.3.2.4	Apport de la deuxième phase à courte distance	132
5.3.2.5	Résultats à plus grande distance	134
5.3.2.6	Apport de la deuxième phase à grande distance	135
5.3.3	Performances du classificateur	137
5.3.3.1	Matrice de confusion 1 (pour ECH1)	138
5.3.3.2	Matrice de confusion 2 (pour ECH2)	138
5.3.3.3	Comparaison des résultats aux 2 distances : 20m et 43m	139
5.3.4	Apport de l'utilisation de l'A-scan pour l'identification	140
5.3.4.1	Ambiguïtés levées	140
5.3.4.2	Objets de formes complexes	141
5.3.5	Robustesse du classificateur en fonction du type de fond	142
5.4	Conclusion	145
6	Conclusion générale	146
6.1	Bilan	146
6.2	Perspectives	147
A	Annexe A	150
A.1	Modèles géométriques des mines simulées	150
A.2	Autres objets	151
B	Annexe B	153
B.1	Le B-scan	153
B.2	Combinaison du traitement sur A-scan et B-scan	153
B.2.1	Limites de la corrélation 1D : Cas de l'ambiguïté MC/MM	153

B.2.2 Apport de la fusion A-scan/B-scan	154
Bibliographie	157

Table des figures

2.1	Exemple de sonar latéral remorqué	9
2.2	Exemple de fonction de directivité d’un transducteur circulaire (<i>diamètre</i> $= 0.22\text{ m}$, $f_0 = 200\text{kHz}$)	11
2.3	Propagations sphérique et cylindrique	14
2.4	Géométrie d’acquisition par sonar latéral	16
2.5	Constitution du signal sur une voie sonar (IFREMER)	17
2.6	Distance oblique	17
2.7	Résolution en distance	18
2.8	Résolution en gisement	19
2.9	Cellule de résolution	20
2.10	Interactions entre un rayon sonore et un obstacle [KJM08]	24
2.11	Effet de la portée sur la luminance de l’image sonar	27
2.12	Elongation des formes de l’ombre portée des objets en fonction de la rasant 29	29
2.13	L’ensemble des échogrammes d’une sphère totalement insonifiée	31
2.14	Méthode d’obtention de l’A-scan par un sonar de bonne ($\delta\theta$) ou de mau- vaise ($\Delta\theta$) résolution latérale	32
2.15	A-scan d’une sphère de rayon $a = 0.5\text{m}$	32
3.1	Structure “type” d’un Profil de célérité : 3 couches sont généralement dis- tinguées (proche de la surface, thermocline et profonde)	39
3.2	Réfraction et réflexion de l’onde sonore dues au changement de célérité entre les milieux (1) et (2) ($c_1 < c_2$)	40
3.3	Trajets des rayons sonores dans un milieu à célérité variable (cas d’une source placée proche de la surface) [Lur98]	41
3.4	Trajet d’un rayon dans une couche de gradient de vitesse constant	41
3.5	Etude qualitative de la diffusion sur une surface (a) parfaitement lisse, (b) rugueuse et (c) très rugueuse	47
3.6	Réfraction sur une sphère rigide de rayon a [Leg11]	48
3.7	Illustration de deux échelles de rugosité	51
3.8	Mécanisme de formation de l’écho pour une sphère rigide [Fre62]	64
3.9	Principe de Huygens : l’onde se propage de a vers b [MC97]	65
3.10	Phénomène de multi-trajets	70
3.11	Illustration du “photon mapping” de ZACK WATERS	72
3.12	Réflexion spéculaire	74
3.13	Réflexion diffuse	75
3.14	Exemple d’une arête diffractante et d’un coin dans un modèle géométrique d’une mine Manta	76
3.15	Diagramme en bloc du modèle de propagation de SIS	77

3.16	Géométrie de la scène	81
3.17	modèle géométrique d'un récif artificiel "Type 1"	82
3.18	modèle géométrique d'un récif artificiel "Type 2"	82
3.19	Images sonar réelles (C) iXBlue (à gauche) et simulées (à droite) d'un récif artificiel de "type 2" à une distance de $20m$ et sur un fond sableux : (a) Image simulée dans l'orientation 11, (b) Image simulée dans l'orienta- tion 2, (c) Image simulée dans l'orientation 3 et (d) Image simulée dans l'orientation 4	84
3.20	Image simulée d'un cylindre (diamètre= 0.53 , longueur= 1.6 m) sur un fond sableux ($c=1480m.s^{-1}$)	85
3.21	Image simulée d'un cylindre (diamètre= 0.53 , longueur= 1.6 m) sur un fond sableux ($c=1520m.s^{-1}$)	85
3.22	Différence pixel à pixel de deux images simulées à deux célérités différentes pour un cylindre droit	85
3.23	Différence pixel à pixel après recalage de deux images simulées à deux célérités différentes pour un cylindre droit	85
3.24	Cylindre (droit) sans (à gauche) et avec (à droite) effet de multi-trajets . .	86
3.25	Cylindre (incliné) sans (à gauche) et avec (à droite) effet de multi-trajets .	87
3.26	Réponse acoustique d'une cible cylindrique : avec et sans effets de multi- trajets, respectivement, en pointillé et en ligne continue	88
3.27	Configuration géométrique de la scène	88
3.28	Sphère avec effets de multi-trajets	89
3.29	Sphère sans effets de multi-trajets	89
3.30	Les deux zones sur une surface sphérique (proche du sommet ou proche de l'équateur)	89
3.31	épave d'un remorqueur (C) GESMA&NURC	90
4.1	Architecture d'un système basé modèle	98
4.2	Extraction de la région d'intérêt (écho) dans une image sonar	105
4.3	Effet de la segmentation sur la qualité de l'A-scan. (a1) et (a2) sont, respectivement, l'image 2D non segmentée et l'A-scan calculé à partir de celle-ci. (b1) et (b2) sont, respectivement, le masque de segmentation de l'image (a1) et l'A-scan associé à la seule zone écho de cette image	106
4.4	Filtrage adapté : phase 1	108
4.5	Représentation schématique de quelques descripteurs morphométriques et d'autres calculés sur l'A-scan	111
4.6	Algorithme de la phase 2 : ajout de gabarits	113
4.7	Diagramme de classification à 2 phases (Cas de deux classes ambiguës) . .	114
5.1	Représentations schématiques : (a) du cercle d'orientations en vue de des- sus et (b) d'une mine cylindrique de rayon r et de longueur l dans l'orien- tation22 (mc-orientation22)	119
5.2	Images 2D et leurs A-scans simulés sur un fond sableux (altitude du sonar est $6m$ et la distance entre l'objet et le sonar est $20m$) pour : MS (a), MC (b), MM (c), MR (d), RA (e), ML (f), SI (g), SE (h), RI (i), EL (j), CU (k), TO (l)	122
5.3	Exemples de simulation de différents types de fonds et leurs représenta- tions 3D respectifs : Sable (a), Rides de sable (b), Vase (c), Argile (d), Roche(e)	123

5.4	Effets du type de fond sur les images 2D et A-scans simulés d'un cylindre (diamètre=0.53, longueur=1.6 m) à une distance égale à 42m : Sable (a), Rides de sable (b), Vase (c), Argile (d), Roche (e)	124
5.5	Effets de l'orientation de la cible par rapport au sens de déplacement de sonar sur les images 2D et A-scans simulés d'un cylindre (diamètre=0.53, longueur=1.6 m) à une distance de 45m : orientation22 (a), orientation2 (b), orientation33 (c), orientation3 (d), orientation44 (e), orientation4 (f), orientation1 (g), orientation5 (h)	125
5.6	Ensemble des cibles de la classification : (a) Mine sphérique, (b) Mine Manta, (c) Mine Rockan, (d) Mine cylindrique, (e) Récif Artificiel (type 1), (f) Récif artificiel (type 2)	127
5.7	Image sonar réelle d'une cible sphérique : (a) image 2D, (b) A-scan	128
5.8	Image sonar réelle d'une mine Rockan : (a) image 2D, (b) A-scan	128
5.9	Image de le sphère sélectionnée : (a) image 2D, (b) A-scan	128
5.10	Image de la mine Rockan sélectionnée : (a) image 2D, (b) A-scan	128
5.11	Un modèle d'une mine Manta renversée	131
5.12	images tests (a) et images sélectionnés (b) (ainsi que leurs A-scans) à une distance objet-sonar égale à 20m. (1) Sphère, (2) Cylindre incliné, (3) Manta, (4) Manta renversée, (5) Rockan, (6) Récif artificiel incliné.	134
5.13	Cas d'une mauvaise classification : (a) mine rockan (fond2) et (b) l'image sélectionnée est celle d'une mine Manta (fond 2).	134
5.14	Processus de correction d'une ambiguïté dans ECH1 (Etat 0 -> Etat 2) : 2 ^{ème} cas	135
5.15	Processus de correction d'une ambiguïté dans ECH1 (Etat 0 -> Etat 3) : 3 ^{ème} cas.	136
5.16	Image 2D et A-scan correspondant pour une mine Manta sur un fond rocheux à 43m.	140
5.17	Deux configurations ambiguës : (à gauche) le cylindre vue par l'extrémité et (à droite) la mine Rockan dont l'axe majeur est perpendiculaire à l'axe des gisements.	141
5.18	Image 2D et A-scan correspondant pour (a) un cylindre vue par son extrémité et (b) une sphère sur un fond sableux.	141
5.19	Comparaison des classes MS/MC : distance intra (bleu (MS),vert (MC))/inter (rouge) classes.	142
5.20	Image 2D et A-scan correspondant pour (a) une mine Rockan (orientation5) et (b) une mine Manta sur un fond sableux.	142
5.21	Configuration atypique : une mine Manta renversée	143
5.22	Image 2D et A-scan correspondant pour un Récif artificiel (orientation44)	143
5.23	Image 2D et A-scan correspondant pour un Récif artificiel (orientation440)	144
5.24	Distribution de Rayleigh du fond 1	144
5.25	Evolution du taux de bonne classification en fonction du type de fond	145
A.1	Mines réelles, leurs dimensions et les modèles géométriques simulés : (a) Mine sphérique, (b) Mine cylindrique, (c) Mine Manta, (d) Mine Rockan, (e) Mine Rigeel, (f) Mine Sepia, (g) Mine Limpet, (h) Mine Sigeel400	151
A.2	Quelques modèles géométriques d'objets simulés : (a) Cube, (b) Torus, (c) Ellipsoïde, (d) Récif artificiel (type 1) et (e) Récif artificiel (type 2)	152
B.1	B-scan d'une sphère de rayon a = 0.5m	153

B.2	Résultat du filtrage adapté appliqué à l'A-scan test (au milieu) : L_1 le maximum de corrélation de la classe la plus probable (à droite) et L_2 est celui de la classe suivante (à gauche)	154
B.3	Résultat du filtrage adapté appliqué entre les B-scans (dernière colonne). En haut : le B-scan test et en bas : celui de la configuration initialement plus probable (mine Manta)	155
B.4	Résultat du filtrage adapté appliqué entre les B-scans (dernière colonne). En haut : le B-scan test et en bas : celui de la configuration initialement moins probable (mine cylindrique)	156

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques techniques de quelques sonars latéraux disponibles dans le commerce [Bel95]	10
4.1	Définitions des descripteurs utilisés	110
5.1	Types de fonds simulés	118
5.2	Tailles des cibles	118
5.3	Orientations des cibles	119
5.4	Résultats de classification des données réelles GESMA/DERA	127
5.5	Phase 1 de classification pour un échantillon (ECH1) des données simulées	130
5.6	Phase 2 de classification pour l'échantillon (ECH1) des données simulées	131
5.7	Matrice de confusion de l'échantillon (ECH1)	138
5.8	Matrice de confusion de l'échantillon (ECH2)	138
5.9	Estimation du paramètre $\hat{\sigma}$ pour chaque type de fond simulé	143

Abréviations

ACP	Analyse en Composantes P incipales
AFD	Analyse F actorielle D iscriminante
ALD	Analyse L inéaire D iscriminante
A-scan	An amplitude modulation s can
APL-UW	Applied P hysics L aboratory-University of W ashington
AUV	A utonomous U nderwater V ehicle
BE	B oundary E lements
CAC	C omputer- A ided C lassification
CAD	C omputer- A ided D etection
Chirp	C ompressed H igh I ntensity R adar P ulse
CMRE	C enter for M aritime R esearch and E xperimentation
CU	C Ube
DERA	D efence E valuation and R esearch A gency
DGA	D irection G énérale de l'Armement
DI	D irectivity I ndex
DT	D etection T hreshold
FDTD	F inite D ifference T ime D omain
EF	E lements F inis
EL	E Lipsoïde
GESMA	G roupe d'Études S ous- M arines d' A tlantique
EPSRC	E ngineering and P hysical S ciences R esearch C ouncil
IFREMER	I nstitut F rançais de R echerche pour l'É X ploitation de la M er
KNN	K - N earst N eighbor
MC	M ine C ylindrique
ML	M ine L impet

MM	M ine M anta
MNT	M odèle N umérique du T errain
MR	M ine R ockan
MS	M ine S phérique
NL	N oise L evel
NSE/AS	U nité N avires et S ystèmes E mbarqués/ S ervice A coustique S ismique
NURC	N ato U ndersea R esearch C enter
PG	P rocessing G ain
RA	R écif A rtificiel
Radar	R adio D etection A nd R anging
RC	R apport de C ompression
RI	M ine R Igeel
ROI	R egion O f I nterest
SE	M ine S Epia
SI	M ine S Igeel400
SIGMAS	S pecial I nterest G roup on M odeling A nd S imulation
SIMONA	S imulation, M otion and N avigation
SIS	S onar I mage S imulator
SL	S ource L evel
SNR	S ignal- N oise R atio
Sonar	S ound N avigation A nd R anging
SSA	S mall S lop A pproximation
SWAT	S hallow W ater A coustic T oolkit
TL	T ransmission L oss
TO	T Orus
TS	T arget S trength
TVG	T ime V arying G ain

Symboles

c	célérité de l'onde	$m.s^{-1}$
g	gradient de la célérité	s^{-1}
α	coefficient d'absorption (amortissement du son dans l'eau)	$dB.Km^{-1}$
Z	impédance acoustique d'un milieu	$Pa.m.s^{-1}$
h	hauteur des ondulations d'une surface mesurée crête à crête	m
a	taille d'un réflecteur	m
θ	angle d'incidence	deg
φ	angle de rasance	deg
ρ	masse volumique	kgm^{-3}
f_0	fréquence centrale	kHz
f_e	fréquence d'échantillonnage	kHz
B	la bande que occupe le signal	kHz
λ	longueur d'onde	m
k	nombre d'onde	$rad.m^{-1}$
w	pulsation (fréquence angulaire)	$rad.s^{-1}$
S	surface de diffusion	m^2
dS	élément de surface	m^2
t	temps	s
I	intensité acoustique	$Watt.m^{-2}$
p	pression acoustique	Pa
W	puissance acoustique diffusée	
D	distance oblique d'un point	m
δD	résolution en distance	m
$\delta\theta$	resolution angulaire en gisement	deg
δl	résolution latérale (en gisement)	m

δa	la dimension selon l'axe des distances de la cellule de résolution	m
d_i, d_j	dimensions longitudinale et latérale d'un pixel	m
$\Delta\theta$	fréquences d'échantillonnage spatiale	deg
$\Delta\varphi$	ouverture angulaire verticale (en site)	deg
L	longueur de l'antenne physique	m
H	altitude de navigation du sonar	m
TL	pertes d'énergie par propagation	dB
TL_α	perte par absorption	$10^{-3}dB$
D_{min}	distance au début de portée	m
D_{max}	portée maximale du sonar	m
T_{pulse}	la durée du signal émis	s
T_{ar}	temps d'aller-retour de l'onde émise	s
V_s	vitesse de déplacement du sonar	$m.s^{-1}$
T_r	durée de recurrence	s
Cr	le coefficient de réflexion à l'interface eau-réfecteur	
R	paramètre de Rayleigh	
σ	section efficace de diffusion	
ξ	un nombre aléatoire uniformément distribué	
\vec{N}	la normale à la surface d'un réflecteur	
μ_0	paramètre de Lambert	
BS_0	coefficient de rétrodiffusion du fond	
BS_N	indice de rétrodiffusion du fond en incidence normale	
C_{xy}	fonction de corrélation de deux A-scans x et y	
L_{xy}	coefficient de corrélation entre deux A-scans x et y	
L_i	degré d'appartenance à la classe C_i donnée par le filtrage adapté	
E_x, E_y	énergies cumulées des A-scans x et y	
C_a	classe sélectionnée par le classificateur KNN	
K	nombre de plus proches voisins dans l'algorithme KNN ($K = 3$)	
L_a	degré d'appartenance à la classe C_a	
ζ	critère de détection d'ambiguïté	
G	gabarit	
A_i	ensemble de classes qui vérifient le critère ζ	
A_{in}	A-scan inconnu	

- Desc* liste de descripteurs pertinents Ca
- ECH1* échantillon de l'ensemble de test à courte distance
- ECH2* échantillon de l'ensemble de test à grande distance

A tous mes chers ...

Mes parents, Mes frères & soeurs

Mon époux & Ma fille

Chapitre 1

Introduction générale

La première utilisation du principe du sonar remonte peut être à plusieurs siècles mais il n'était pas appelé sonar à l'époque. En 1490, Léonardo Da Vinci a observé un phénomène et en a tiré une conclusion empirique : "Si vous arrêtez votre bateau et vous placez l'extrémité d'un long tube dans l'eau et l'autre extrémité à l'oreille, vous entendez des navires à des grandes distances". Cette description correspond bien à un système très simple de sonar passif.

Concrètement, l'étude de l'acoustique sous-marine a commencé depuis un siècle, lorsque le paquebot britannique "Le Titanic" a heurté un iceberg. L'idée de base était que la connaissance précise de la vitesse du son dans l'eau et le temps de parcours permet de calculer la distance qui sépare la source du diffuseur.

Compte tenu de la connaissance moderne de la physique de la propagation du son dans l'eau, des images de haute résolution ont été obtenues à des grandes distances dans un milieu optiquement opaque. En effet, les ondes acoustiques se propagent bien dans l'eau un peu comme le font les ondes électromagnétiques dans l'air. Par ailleurs, les systèmes reposant sur l'utilisation des ondes électromagnétiques ne sont pas adaptés au contexte sous marin, du fait de la très forte atténuation par ce milieu de ce type d'ondes. Cette limitation a motivé la recherche dans ce sens, dans le but de trouver un type d'ondes capable de transmettre un signal dans le milieu marin sans subir une atténuation rédhibitoire. Cette étude a abouti à l'utilisation des ondes sonores couramment nommées "ondes acoustiques" qui sont des ondes de vibrations mécaniques. Le sonar est le résultat des recherches menées dans ce domaine [Tho96].

Face à l'incapacité des ondes électromagnétiques à se propager sur de longues distances dans l'eau, l'acoustique s'est rapidement imposée comme le moyen privilégié de prospection et de communication en milieu sous-marin.

Après la deuxième guerre mondiale, différents systèmes de détection/classification et de

localisation des cibles sous-marines à l'aide d'un signal acoustique ont été inventés. L'ensemble de ces systèmes est couramment désigné par le terme générique SONAR (SOund NAvigation and Ranging) par analogie au RADAR qui est le système électromagnétique équivalent.

Un type de sonar qui a trouvé une application croissante dans les domaines militaire, commercial et environnemental est le sonar latéral. Il s'agit d'un dispositif d'imagerie acoustique généralement porté par un véhicule sous-marin afin de fournir une image du fond marin étendue par ses émissions ultra-sonores perpendiculaires à la trajectoire. Les images sont générées successivement en tant que signaux acoustiques qui sont transmis sur le côté du sonar. L'image générée par un sonar latéral fournit une représentation qualitative de la topographie du fond marin du fait que les ondes enregistrées sont des ondes diffusées par l'effet de relief de l'interface. Nous allons voir en détail les caractéristiques ainsi que le mode de fonctionnement de ce type de sonar dans le chapitre 2.

Dans le domaine militaire, ce type de sonar a été souvent utilisé dans les opérations de la chasse aux mines. En effet, les mines sous marines représentent une menace redoutable, malheureusement toujours d'actualité. Une mine qui coûte quelques milliers d'Euros est capable d'infliger des dommages de plusieurs centaines de millions d'Euros. Les mines permettent de protéger les littoraux et d'empêcher le passage de bateaux ennemis. Cependant, les mines non détectées restent une menace en temps de paix. Les dégâts infligés peuvent être considérables [Leo12].

Les moyens de lutte anti-mine sous-marine ont évolué en fonction de l'évolution des systèmes sonar. La décision sur la dangerosité de l'objet est confiée à un opérateur. Les opérations de neutralisation des mines s'effectuent par des plongeurs démineurs. Avec l'apparition des systèmes très haute résolution, la quantité d'information est devenue importante. Ceci a nécessité l'automatisation du traitement des images pour l'aide à la décision. D'un autre côté, ces traitements automatiques ont été essentiels pour l'émergence des véhicules autonomes sous-marins (AUV) sur lesquels le sonar peut être monté. L'apparition des systèmes de détection et de classification automatiques (CAD/CAC) était une conséquence directe de ces avancées technologiques. Les premiers systèmes développés dans le domaine de la classification des cibles sous-marines étaient majoritairement basés sur l'utilisation de l'ombre acoustique afin de classer les cibles en mine ou non mine. Plus tard, on s'est intéressé à l'identification des mines potentielles. L'information sur le type de mine peut être utile pour neutraliser la menace. En effet, la signature acoustique est composée de l'écho de la cible et de son ombre qui est généralement plus représentatif de sa forme géométrique, c'est la raison pour laquelle les études étaient focalisées davantage sur l'ombre pour faire la classification. En revanche, l'écho était généralement utilisé pour faire la détection à cause du nombre réduit de pixels qui le composent.

Les problèmes de détection et de classification ont nécessité l'utilisation de systèmes haute

fréquence. C'est le cas aussi dans ce travail de thèse, ce qui justifie les approximations que nous allons utiliser dans la suite du document.

1.1 Motivation

Ce travail est construit autour de deux axes directeurs : (1) la simulation et (2) la classification.

Le premier axe ne peut être étudié sans une réelle connaissance des différents phénomènes physiques (liés à la propagation et à la perception des ondes acoustiques dans le milieu marin) associés au fonctionnement des systèmes sonar. Le deuxième axe fait intervenir des méthodes classiques de traitement d'images adaptées au contexte de l'identification des cibles sous marines.

Le présent travail a été mené en vue de proposer une amélioration à la classification des mines sous-marines en se basant sur la zone écho de leur signature acoustique. La méthode proposée repose sur la disponibilité des images sonar dans plusieurs scénarios pour la même configuration opérationnelle. Pour atteindre le but final il est donc indispensable de recourir à la modélisation numérique des systèmes sonar latéral pour pallier le manque des données réelles adéquates et exploitables.

Le simulateur aura donc deux objectifs : satisfaire les exigences de modélisation du processus de formation d'une image sonar latéral avec des modèles numériques et fournir des images fidèles aux images réelles d'un sonar latéral pour l'apprentissage du classificateur. Le travail de thèse du docteur Isabelle Quidu de l'équipe OSM (Ocean Sensing and Mapping) de l'ENSTA Bretagne a été réalisé autour de l'identification des cibles à partir de leurs ombres portées sous plusieurs points de vues [Qui01]. En revanche, l'utilisant de l'ombre en mono-vue pour l'identification a révélé la subsistance de quelques confusions. Typiquement, les confusions entre la mine cylindrique et la mine sphérique, d'une part, et la confusion entre la mine Manta et la mine Rockan, d'autre part. L'objectif de ces travaux de thèse est d'exploiter l'information extraite de l'écho en vue d'étudier la potentialité de la fusion des résultats de classification sur ombre et sur écho.

1.2 Contributions

Le modèle de simulation proposé dans cette thèse est aussi un outil destiné à faciliter l'interprétation des images sonar. Le modèle permettra de simuler des objets de différentes formes dans divers environnements plus ou moins complexes et aider ainsi les opérateurs à comprendre les phénomènes physiques qui contribuent à la génération des

images. Cela se traduira par une amélioration des compétences d'interprétation, à la fois pour l'opérateur, ou dans le cadre d'un système de classification automatique.

Parmi les premiers simulateurs d'images sonar latéral, on trouve celui développé par l'équipe OSL (Ocean Systems Laboratory) à l'université Heriot-Watt de Edimbourg. Le simulateur a fait l'objet de la thèse du docteur Judith Bell [Bel95]. Plus tard, il a été utilisé dans la détection et la classification basées modèle de mines sous-marines [RPB04]. L'état de l'art des simulateurs ainsi que les modèles sous-jacents seront présentés en détail dans le chapitre 3.

Le modèle adopté, dans cette thèse, considère les principaux processus physiques, tels que la propagation des ondes acoustiques dans l'eau, l'atténuation des signaux, la réverbération du fond ainsi que les caractéristiques du transducteur. L'originalité du simulateur proposé est l'utilisation d'une méthode stochastique pour gérer les trajets multiples et la diffraction.

Une autre principale contribution consiste à avoir un outil capable de qualifier l'influence d'un seul paramètre ou de n'importe quelle combinaison des paramètres sur l'image sonar finale.

En résumé, ce simulateur produit des images quantitatives à partir d'une description qualitative de la scène et des caractéristiques opérationnelles.

L'amélioration de la classification grâce à cet outil de prédiction et d'apprentissage est l'objectif de la deuxième partie de cette thèse. En effet, une méthode de classification supervisée comme l'appariement de gabarits nécessite des données d'apprentissage suffisantes et adéquates. L'approche proposée consiste en deux phases : la combinaison d'un traitement sur l'écho en 1D par une approche basée modèle et le calcul de quelques nouveaux descripteurs sur l'écho en 2D.

1.3 Organisation du manuscrit

Les deux axes de ce travail ont guidé l'organisation du manuscrit qui est, par conséquent, composé de deux grandes parties.

La première partie, regroupant les chapitres 2 et 3, est consacrée, d'une part, à la description des phénomènes physiques liés à la formation des images sonar afin de comprendre les spécificités de ces images (chapitre 2) et, d'autre part, à la description des modèles existants pour mieux situer le modèle de simulation que nous proposons dans le chapitre 3.

Dans la deuxième partie, formée des chapitres 4 et 5, nous allons formuler théoriquement la méthode de classification ainsi que les nouveaux descripteurs (chapitre 4). Dans le chapitre 5, nous illustrerons les résultats de la méthode proposée sur des images sonar réelles et simulées. Il s'agit d'une méthode de classification des cibles sous-marines s'appuyant

sur le modèle développé dans la première partie. Cette méthode utilise l'information écho dans les images sonar.

Pour bien exploiter cette information, nous avons utilisé "l'A-scan" (calculé sur les données brutes ou les images 2D) qui regroupe l'information 2D en un vecteur 1D capable de fournir des informations discriminantes. La classification se déroule en deux phases : une phase de filtrage adapté et une phase de vérification du résultat préliminaire à l'aide des descripteurs calculés (soit sur l'A-scan soit sur la partie écho de l'image 2D) ou bien par l'enrichissement de la base d'apprentissage. Le résultat de la classification est une liste ordonnée des classes les plus probables avec leurs poids respectifs.

Chapitre 2

Généralités et traitements sur les images sonar

2.1 Introduction

Les systèmes d'imagerie sous marine sont capables de fournir des images plus ou moins résolues selon l'application visée et en fonction des caractéristiques techniques du système à disposition. En effet, tous les systèmes sonar ne s'utilisent pas pour les mêmes applications, chaque type est spécialisé dans des tâches bien définies. Cette (ces) tâche(s) est (sont) définie(s) lors de la toute première étape de conception, puisque les capacités en terme de portée et de résolution de chaque sonar dépendent de la fréquence et de la bande du signal d'émission, de la dimension de l'antenne de réception, donc de son architecture et du mode de visualisation (latéral, sectoriel ou panoramique). La compréhension du processus du sonar latéral et la capacité à interpréter les images sonar est une étape primordiale pour réussir la simulation de ces images, qui est l'une des contributions de cette thèse.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons introduire les principales notions liées au cadre d'acquisition des images sonar autour duquel notre travail sera réalisé.

Les processus de formation des images sonar ainsi que les spécificités de ces images vont être développés dans la deuxième partie, afin de bien comprendre les liens qui existent entre cette représentation sous forme d'image et la réalité du terrain. La représentation sous forme d'image constitue un bon compromis, car elle permet d'analyser un nombre important de données en un temps relativement court.

A la fin de ce chapitre, nous allons faire le lien entre le mécanisme de formation des images sonar et celui de formation de l'écho. Cette partie permettra d'expliquer théoriquement les phénomènes observés. Nous allons aussi décrire la manière avec laquelle

nous obtenons l’“A-scan” qui est le descripteur principal défini dans ce travail et qui va nous permettre de présenter notre méthode de classification basée sur un modèle.

2.2 Notions utiles du sonar

2.2.1 Architecture du sonar

Les deux grandes catégories de sonar sont les sonars actifs et les sonars passifs. Cette distinction actif-passif est déterminée par l’origine de l’énergie captée par le sonar. Un sonar actif s’intéresse à l’énergie renvoyée par le milieu marin quand cette énergie est la réponse du signal émis par le sonar lui-même. En contrepartie, le sonar passif capte le bruit émis par des sources externes dans l’eau. Ce dernier est utilisé, par exemple, dans le contexte militaire pour détecter les sous-marins. La première étape dans le processus du sonar actif est la génération d’une impulsion électrique, d’une fréquence, durée et amplitude données, par l’émetteur. Ce signal électrique est ensuite converti par le transducteur électroacoustique qui peut être constitué de céramique piézoélectrique qui se dilate et se contracte sous l’application du champ électrique afin de générer une impulsion acoustique de pression oscillante dans l’eau. Cette impulsion se propage à travers la colonne d’eau puis elle sera réfléchiée ou diffusée par le fond et les objets présents dans la colonne d’eau ou posés sur le fond. Une partie de cette énergie est réfléchiée vers l’antenne de réception qui convertit les vibrations de pression en un signal électrique qui est amplifié et converti en signal numérique par le module de réception.

L’ensemble du processus est géré par l’unité de commande qui synchronise le fonctionnement et contrôle l’émission et la réception des signaux électriques. L’unité de commande comprend généralement un dispositif pour afficher et enregistrer les signaux renvoyés. D’autres fonctions de contrôle sont aussi incorporées dans l’unité de commande pour permettre à l’opérateur de sélectionner des paramètres tels que la fréquence centrale, la fréquence de répétition des impulsions ou la portée.

Il convient de noter que le sonar ne mesure pas réellement la profondeur ou la distance, mais fournit le temps aller-retour de l’onde. Dans le cas du sonar actif, le temps aller-retour est le temps mis par une impulsion de son émission à sa réception après interception avec un diffuseur [Bel95].

En mode émission, le transducteur se nomme projecteur ou base acoustique alors qu’en mode réception, il se nomme hydrophone dans le cas d’un récepteur ponctuel ou antenne pour un récepteur constitué de plusieurs transducteurs élémentaires ou capteurs. De par leur conception, les antennes favorisent certaines directions d’arrivée du signal et par extension, localisent précisément la cible [Qui01].

Les premiers sonar actifs sont : le sondeur mono-faisceau, le sondeur multi-faisceau et

le sonar latéral. Ce dernier étant celui qui nous intéresse pour la suite de l'étude, nous détaillerons ensuite son fonctionnement et ses spécificités.

2.2.2 Principe de fonctionnement du sonar latéral

Un système sonar actif à vision latérale est souvent constitué de deux antennes émettrices-réceptrices fixées de part et d'autre d'un poisson remorqué par un bateau à l'aide un câble électroporteur. Ce poisson navigue généralement près du fond. Le faisceau émis par le sonar latéral est caractérisé par une ouverture latérale (en gisement) étroite. En revanche, en site, l'ouverture verticale est élevée (de 50 à 80 degrés pour chaque côté). L'objectif de cette conception est de permettre une bonne résolution en gisement et d'avoir une grande fauchée (Figure 2.1).

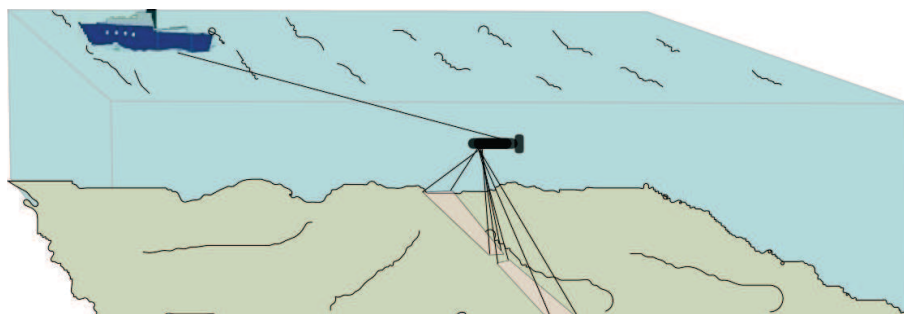


FIGURE 2.1: Exemple de sonar latéral remorqué

Des exemples de caractéristiques typiques de fonctionnement de sonars latéraux disponibles dans le commerce sont résumés dans le tableau 2.1. Beaucoup de sonars à faible portée et à haute résolution ont une double fréquence et peuvent basculer à des fréquences autour de 100 kHz à 500 kHz à proximité des cibles ou des zones d'intérêt pour améliorer la résolution en gisement. La fréquence de répétition des pings augmente en conséquence.

2.2.3 Antenne et directivité

Un système sonar latéral est souvent formé de deux antennes latérales logées dans le poisson remorqueur (voies latérales bâbord et tribord). Chaque antenne est constituée de plusieurs capteurs appelés transducteurs. La combinaison des signaux de capteurs d'une antenne permet de former les faisceaux (ou voies) latérales qui sont de l'ordre du degré (pour les sonars plus performants cette valeur peut atteindre 0.1 degrés).

Les principales caractéristiques d'un capteur sont les suivantes [Lur10][Leg11] :

Paramètres du système	Types des sonars			
	EG& G 272	Klein 422S	EDO 4175	Ultra 3050
Fréquence	100/400 kHz	100/500 kHz	100/520 kHz	100/325 kHz
Durée du pulse	0.1/0.01 ms	0.1/0.02 ms	0.1/0.05 ms	0.09/0.03 ms
Ouverture horizontale	1.2°/0.5°	1°/0.2°	1°/0.5°	1.6°/0.6°
Ouverture verticale	50°	40°	25°	32°
Energie maximale	228/222dB	228/216dB	218/217dB	210dB
Angle d'inclinaison	20°	10°	-	-
Profondeur maximale	600m	1200m	60m	300m
Portée maximale	1000m/200m	1000m/300m	1200m/200m	800m

TABLE 2.1: Caractéristiques techniques de quelques sonars latéraux disponibles dans le commerce [Bel95]

- Efficacité : elle traduit le rendement en émission (transmission sans perte) et la sensibilité et la précision en réception (capacité à détecter les signaux et qualité de conversion électroacoustique)
- Fréquence centrale f_0 : elle est définie par la résonance du capteur en émission. Les pertes d'énergie dues à la propagation de l'onde dans le fluide augmentent rapidement avec la fréquence. Ceci contraint l'utilisation des fréquences élevées à des portées moyennes. En contrepartie, l'émission des fréquences basses porte plus loin mais donne une qualité inférieure (résolution latérale inférieure).
- Bande passante : capacité à émettre et à "écouter" sur une largeur de bande autour de la fréquence centrale sans trop de distorsion et d'atténuation.
- Directivité : ce terme résume les caractéristiques directionnelles d'un capteur, c'est-à-dire les variations angulaires de la sensibilité du capteur vis-à-vis d'une onde incidente (en réception) et la répartition de l'énergie acoustique (en émission).

La fonction de directivité d'une antenne acoustique est souvent formée par un lobe principal et des lobes secondaires. Elle dépend de la géométrie et des dimensions de l'antenne ainsi que de la fréquence centrale.

Le lobe principal est caractérisé par son ouverture à -3dB notée $2\theta_3$. Cette largeur correspond à l'angle qui sépare les deux directions situées de part et d'autre de l'axe correspondant au niveau maximal du lobe principal [DGM98]. La largeur du lobe principal est inversement proportionnelle à la fréquence. Pour avoir une bonne résolution latérale il suffit donc d'augmenter la fréquence mais ceci au détriment de la portée du fait d'une plus grande absorption de l'énergie par le milieu.

La figure 2.2 montre un exemple de fonction de directivité.

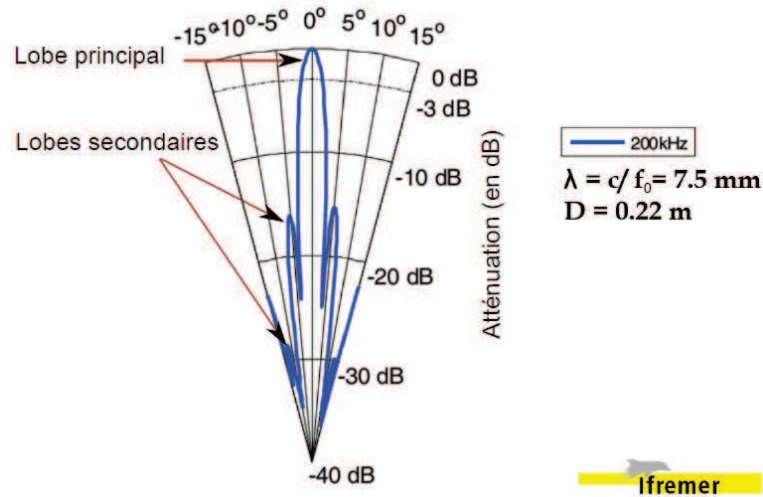


FIGURE 2.2: Exemple de fonction de directivité d'un transducteur circulaire (*diamètre* = 0.22 m , $f_0 = 200\text{kHz}$)

2.2.4 Attributs de l'environnement

L'environnement marin, comme tout environnement réel, est complexe du fait de la présence de plusieurs éléments non homogènes.

2.2.4.1 Paramètres physiques de l'eau de mer

Trois paramètres physiques permettent de décrire l'eau de la mer [LC04] :

1. La température des océans dépend à la fois de la latitude et de la profondeur. Elle décroît globalement de la surface vers le fond. Ses variations spatiales et temporelles concernent surtout la couche superficielle jusqu'à environ 1000m . En dessous, la température moyenne décroît lentement en fonction de la profondeur et la position géographique n'a plus beaucoup d'influence.
2. La salinité quantifie le pourcentage massique de sels minéraux dissous dans l'eau pure ; la valeur moyenne étant de 35% . Cette valeur moyenne peut varier en fonction des conditions géographiques. La salinité est très peu dépendante de la profondeur.
3. La pression hydrostatique est fonction de la latitude et de la profondeur ; elle augmente d'environ 1bar par 10m^2 .

Ces trois paramètres de la mer peuvent être regroupés dans une seule grandeur physique ; c'est la célérité ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

2.2.4.2 Phénomène de réverbération

La complexité du milieu marin a aussi pour origine les inhomogénéités présentes dans la colonne d'eau (bulles, poissons, etc.) ou aux interfaces plus ou moins rugueuses (la surface de la mer ou le fond). Ces inhomogénéités sont la cause d'un phénomène caractéristique de l'imagerie cohérente appelé phénomène de réverbération. Celui-ci sera détaillé au paragraphe 2.3.4.2.

2.2.4.3 Bruit ambiant

Dans le milieu marin, il y a différents types de bruit. Parmi ces types, on trouve le bruit ambiant qui regroupe l'ensemble des bruits de sources extérieures au système sonar qui viennent de l'environnement : trafic maritime, agitation thermique, pluie, etc.

2.2.5 Equation du sonar

Le principe général de l'équation du sonar est de comparer le signal additionné de bruit par rapport à un seuil de détection. Dans le cas d'un sonar actif en présence d'une cible (le fond, une mine, un véhicule sous-marin, etc.), l'équation sonar s'écrit [Leg11] :

$$(SL + TS + DI + PG) - (2TL + NL) > DT \quad (2.1)$$

Avec :

- SL (Sound Level) est le niveau d'énergie générée par le sonar,
- TS (Target Strength) est la puissance de la réponse de la cible,
- DI (Directivity Index) est le gain lié à la directivité de l'antenne,
- PG (Processing Gain) est le gain de traitement,
- TL (Transmission Loss) regroupe les pertes par transmission (par divergence et par absorption),
- NL (Noise Level) est le bruit (électronique et propre) du système,
- DT (Detection Threshold) est le seuil de détection nécessaire fixé.

L'équation peut être interprétée simplement comme suit : le niveau du signal reçu par le transducteur est amplifié par les termes de la première parenthèse et atténué par les termes de la deuxième parenthèse. Le bon fonctionnement du sonar est donc conditionné par la relation suivante [Leg11] :

$$\text{Signal} - \text{Bruit} > \text{Seuil de détection}$$

2.2.6 Perte par propagation

La perte d'énergie par propagation est un paramètre capital du fonctionnement du système acoustique, puisqu'elle influence directement l'amplitude du signal reçu. Cette perte correspond d'une part à l'absorption (amortissement) du signal par le milieu de propagation et d'autre part à un effet de divergence géométrique [Lur02].

2.2.6.1 Perte par absorption

La propagation dans l'eau, qui est un milieu dissipatif, provoque une atténuation de l'onde émise par perte d'énergie due au frottement ou à des réactions chimiques. Cette perte d'énergie se traduit par un coefficient d'absorption α .

Un phénomène dit de relaxation est causé par le réarrangement des molécules suite à un changement de pression. La perte d'énergie acoustique dépend alors du temps de relaxation (temps pendant lequel les molécules du sulfate de magnésium et d'acide borique se réordonnent). Plus ce temps est proche de la période du signal, plus la perte est importante. Ce coefficient dépend fortement de la fréquence de l'onde acoustique : plus la fréquence est élevée, plus le coefficient d'absorption est important.

Différents modèles ont été utilisés pour estimer cette atténuation. Le plus utilisé a été développé par François et Garrison [FG82] qui ont proposé ce modèle :

$$\alpha = C_1 \frac{f_1 f_0^2}{f_1^2 + f_0^2} + C_2 \frac{f_2 f_0^2}{f_2^2 + f_0^2} + C_3 f_0^2 \quad (2.2)$$

Où $f_i, i = 1, 2$ sont les fréquences de relaxation du sulfate de magnésium et d'acide borique, les coefficients $C_i, i \in \{1..3\}$ dépendent de la température, de la pression et de la salinité et f_0 la fréquence centrale du signal. La quantité α est le coefficient d'absorption, exprimée en Décibels par Kilomètre (dB/Km). L'équation de la perte par absorption TL_α à une distance D est donnée par l'équation 2.3, en Décibels.

$$TL_\alpha = \alpha D \quad (2.3)$$

2.2.6.2 Perte par divergence géométrique (par diffusion)

L'étalement de l'énergie sur une surface de plus en plus importante est un phénomène de perte par divergence qui n'affecte pas uniquement l'onde acoustique mais aussi les ondes électromagnétiques. L'énergie émise est conservée, l'intensité diminue alors proportionnellement à l'inverse de cette surface.

Les deux principaux types de divergence en acoustique sont illustrés dans la figure 2.3.

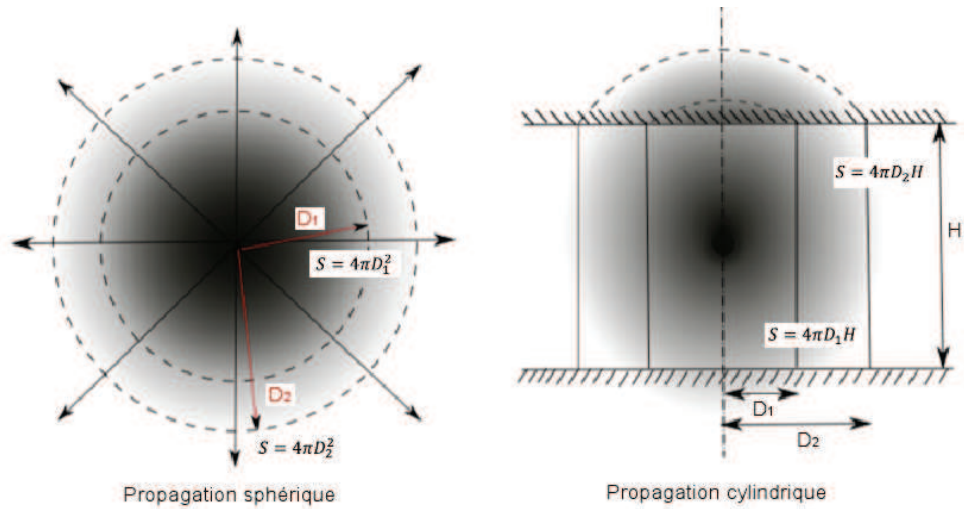


FIGURE 2.3: Propagations sphérique et cylindrique

Divergence sphérique

On parle de divergence sphérique quand la source sonore est ponctuelle et localisée dans un milieu homogène et illimité (champ libre). L'onde générée par la source rayonne uniformément dans toutes les directions. L'énergie émise se répartit sur des sphères de rayons de plus en plus grands.

La puissance W diffusée par la source à une distance D s'écrit en fonction de l'intensité acoustique I à cette même distance comme suit : $W = I.4\pi D^2$.

En exprimant l'intensité acoustique en fonction de la puissance diffusée, le rapport des intensités à deux distances D_1 et D_2 est donné par l'équation 2.4.

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2 = \left(\frac{4\pi D_1}{4\pi D_2}\right)^2 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (2.4)$$

où I_1, I_2 : Les intensités acoustiques respectives à la distance D_1 et D_2 de la source ;

p_1, p_2 : Les pressions acoustiques correspondantes.

L'intensité décroît donc en $1/D^2$ et la pression en $1/D$.

TL_s est l'équation de la perte par divergence. Elle est donnée par l'équation 2.5 dans le cas de la propagation sphérique.

$$TL_s = 20\log_{10}(D) \quad (2.5)$$

Divergence cylindrique

La propagation est cylindrique quand l'onde émise est guidée à l'intérieur d'un conduit cylindrique ou bien quand la source est linéaire.

Les fronts d'onde sont des cylindres coaxiaux. La puissance diffusée par la source à une distance D s'écrit $W = I \cdot 2\pi D h$, où I est l'intensité acoustique à la distance D et h la distance entre les deux plans parallèles limitant le conduit.

L'équation de la perte par divergence, dans le cas de la propagation cylindrique (TL_c), est donnée par l'équation 2.6.

$$TL_c = 10 \log_{10}(D) \quad (2.6)$$

Dans la suite, c'est la divergence sphérique qui sera utilisée puisque nous allons considérer l'hypothèse d'une source ponctuelle.

2.3 Imagerie par sonar latéral

2.3.1 Formation des images sonar

Tout au long du remorquage, les transducteurs recueillent, de manière discrète, les échos renvoyés de la zone du fond perpendiculaire à la direction de déplacement du sonar. La géométrie du problème est illustrée par la figure 2.4, avec $\Delta\theta$ l'angle en gisement et $\Delta\varphi$ l'angle en site.

L'amplitude de l'énergie retournée pour chaque impulsion émise (couramment nommée "ping") correspond à une ligne de l'image (ou "échogramme"). Les lignes formées par l'avancement du sonar sont ensuite affichées de manière séquentielle pour former l'image. L'image obtenue est donc définie par deux directions : l'axe des distances obliques, perpendiculaire à la trajectoire du sonar et l'axe des gisements parallèle à cette trajectoire. Le balayage se fait suivant les deux directions.

La résolution latérale de l'image est fonction de l'ouverture en gisement du faisceau $\Delta\theta$ tandis que la résolution longitudinale en site est fonction de la fréquence de répétition des impulsions. En site, les échos sont reçus successivement avec des temps aller-retour croissants à cause du passage de l'impulsion à travers la colonne d'eau. Lors de l'acquisition, les données enregistrées sont représentées dans le plan oblique.

2.3.2 Spécificités des images sonar

Le signal acoustique rétrodiffusé est transformé en signal électrique et est ensuite traité pour construire l'image du fond avec les éventuels objets posés dessus, enfouis ou se trouvant dans la colonne d'eau. Généralement, l'énergie des ondes rétrodiffusées reçue par le sonar est codée sur 256 niveaux de gris. Les nuances de gris reflètent l'intensité de l'onde rétrodiffusée, qui dépend des propriétés des sédiments ou des matériaux et de la

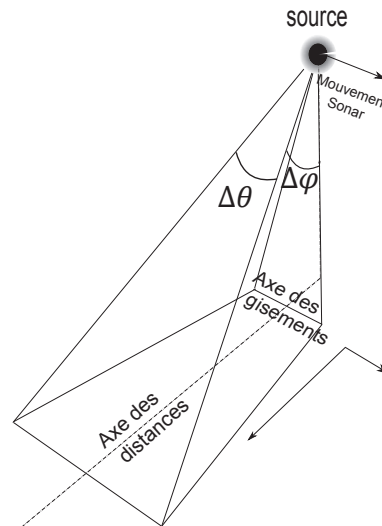


FIGURE 2.4: Géométrie d'acquisition par sonar latéral

topographie (ou l'incidence) [Ehr03].

A un type de sédiment correspond un indice de rétrodiffusion du fond : par exemple la roche, les galets ou les graviers apparaissent plus clairs que les sables et les vases. Des images sonar de bonne résolution reflètent la rugosité, l'impédance acoustique et la granulométrie du fond.

Le coefficient de réflectivité de certains matériaux est proche de 1 (100%), tels que l'acier ou l'aluminium (pour les ondes courtes). Ces matériaux apparaissent beaucoup plus clairs car l'énergie reçue est quasiment renvoyée sans atténuation due à l'absence de la transmission (paragraphe 2.3.4.4). Le relief (ou la présence d'objet) influe aussi sur l'intensité de l'onde rétrodiffusée : les surfaces perpendiculaires à l'onde incidente apparaissent plus claires. Certains reliefs (ou objets) créent une zone d'ombre qui fournit une information sur leur hauteur et leur forme géométrique dans certaines configurations. La zone qui se trouve sous le sonar est appelée zone aveugle puisque cette partie du fond n'est pas correctement couverte. L'étendue de cette zone dépend de l'ouverture en site et du choix de l'angle de rasance maximale (figure 2.6).

La figure 2.5 présente un exemple de l'amplitude du signal reçu dans une voie sonar (l'échogramme enregistré pour un ping sonar). En effet, la première zone (A) d'une image sonar (dite zone aveugle) correspond à la durée minimale avant que le signal émis touche le point le plus proche du fond. (B) est la réponse spéculaire du fond (à incidence normale). Les zones (C), (D) et (E) correspondent à la réverbération du fond. Les zones sont présentées séparées dans cette figure puisque la valeur moyenne de réverbération dépend de l'indice de rétrodiffusion de chacun des trois types du fond. L'écho d'une cible (F) se produit lorsque celle-ci est touchée par le signal sonar. Généralement, derrière une zone écho arrive la zone d'ombre (G). Cette zone correspond à la partie du fond (et l'environnement) occultée par la cible.

2.3.3.1 Pouvoir de résolution en distance

La réponse d'un réflecteur ponctuel placé à une distance oblique D est reçue après un temps de retard t caractéristique de cette distance et de la célérité de l'onde sonore c :

$$t = 2D/c \quad (2.7)$$

Soit T_{pulse} la durée de l'impulsion émise modulée linéairement en fréquence telle que $BT_{pulse} = m$ avec $m \geq 1$. Pour pouvoir détecter le deuxième écho, il doit arriver au récepteur après un temps minimum, tel que :

$$t + T_{pulse} = 2(D + m\delta D)/c \quad (2.8)$$

avec δD la distance oblique entre les deux points sur le fond. On obtient alors une séparabilité dans le plan oblique égal à :

$$\delta D = c.T_{pulse}/2m \quad (2.9)$$

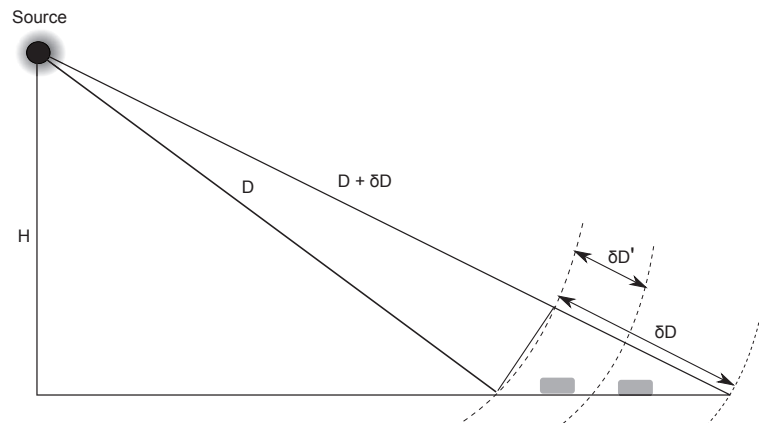


FIGURE 2.7: Résolution en distance

En distance, le pouvoir de résolution est donc lié à la durée du signal émis T_{pulse} et m . Plus le signal est court meilleure est la résolution en distance. Si on considère la configuration de la figure 2.7, il est possible de distinguer les deux objets initialement confondus en émettant un signal de courte durée $T_{pulse}' < T_{pulse}$ qui correspond à la distance oblique $\delta D'$.

2.3.3.2 Pouvoir de résolution en gisement

La directivité d'une antenne linéaire est liée à sa longueur L et à la longueur d'onde λ (paragraphe 2.2.3). La résolution latérale (en gisement) δl est proportionnelle à la résolution angulaire $\delta\theta$ qui est l'ouverture à -3dB de l'antenne. En utilisant l'approximation de petits angles, $\delta\theta$ s'écrit, en fonction de l'inverse de la longueur de l'antenne physique, comme suit (2.10) [DGM98] :

$$\delta\theta = \lambda/L \quad (2.10)$$

où $\lambda = c/f_0$ désigne la longueur d'onde.

La résolution latérale se dégrade avec la portée, ce que signifie que deux points proches de la source peuvent être résolus à une distance donnée, alors que les mêmes points placés à une distance oblique plus grande ne le sont plus. On définit cette résolution de la façon suivante :

$$\delta l = D.\delta\theta \quad (2.11)$$

où D désigne la distance oblique.

La figure 2.8 montre la condition de discernement de deux objets A et B en fonction de l'ouverture angulaire en gisement $\delta\theta$ et la distance oblique D .

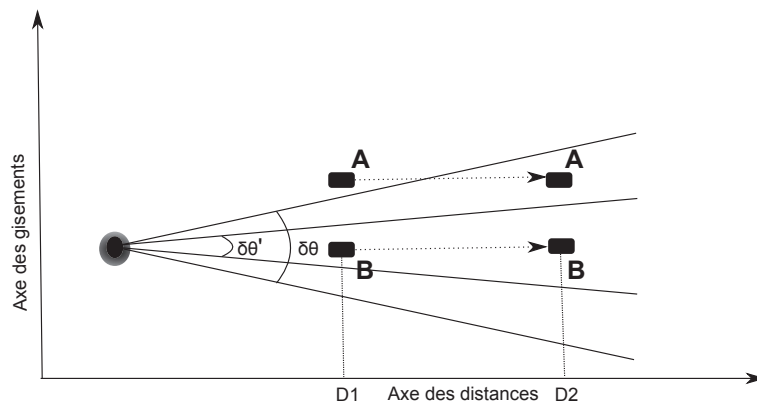


FIGURE 2.8: Résolution en gisement

On remarque que les deux objets initialement confondus à la distance $D2$ peuvent être distingués à une distance $D1$ plus proche du sonar, ou avec une ouverture angulaire en gisement $\delta\theta'$ plus petite en restant à la même distance $D2$.

Parmi les solutions pour améliorer la résolution en gisement, il y a l'augmentation de la fréquence centrale et/ou de la taille de l'antenne, mais dans le premier cas, on limite la portée maximale à cause de l'atténuation du signal par absorption et du bruit électrique et dans le second cas, on est limité par le coût ou l'encombrement. Une alternative est

d'appliquer un traitement de synthèse d'ouverture en formant une antenne synthétique de longueur synthétique déterminée par le déplacement latéral de l'antenne physique [Leg11].

2.3.3.3 Résolution spatiale

De D_{min} à D_{max} , le nombre de cellules de résolution insonifiées par le sonar est $D_{max}/\delta D$. La cellule de résolution est fixée par les deux grandeurs de résolution expliquées plus haut. La résolution angulaire $\delta\theta$ donne la largeur de la cellule de résolution (résolution latérale) δl d'où l'élargissement transversal de la cellule. La résolution en distance δD définit l'autre dimension δa en fonction de l'angle d'incidence θ (figure 2.9).

$$\delta a = \delta D / \sin(\theta) \quad (2.12)$$

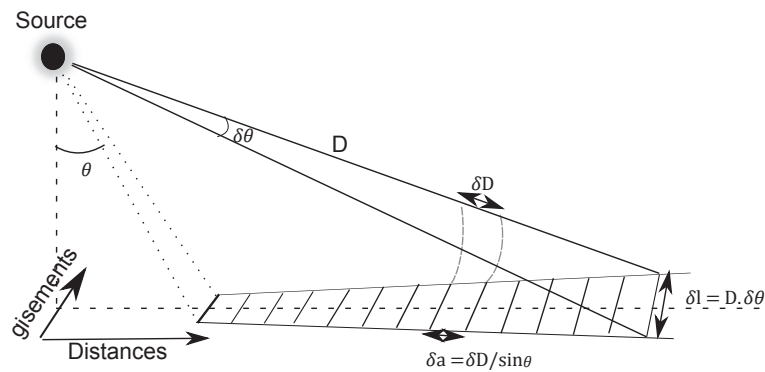


FIGURE 2.9: Cellule de résolution

Le sonar se déplace à une vitesse V_s suivant une trajectoire rectiligne. La durée du temps nécessaire à l'impulsion pour parcourir le trajet aller-retour jusqu'à la portée maximale D_{max} est appelé durée de récurrence T_r . La récurrence se traduit sur l'image sonar par une ligne représentant une bande du fond de largeur $V_s \cdot T_r$.

Dans le cas usuel, où le sonar est monovoie, la vitesse du sonar doit être définie comme suit :

$$V_s \leq D_{max} \cdot \delta\theta / T_r \quad (2.13)$$

$$V_s \leq c \cdot \delta\theta / 2 \quad (2.14)$$

avec $T_r = 2 \cdot D_{max} / c$.

2.3.3.4 Echantillonnage

Pour bien restituer la forme du signal, il faut utiliser un échantillonnage temporel suffisamment fin. Le critère de Shannon fixe une fréquence d'échantillonnage minimale pour avoir une bonne observation et ne pas perdre l'information du signal : "Au delà de la fréquence de coupure, l'information échantillonnée sur 2 points par période est perdue" [Leg11].

Cette condition s'écrit :

$$f_e > 2f_0 \quad (2.15)$$

f_e désigne la fréquence d'échantillonnage.

Des valeurs de l'ordre de $2f_0$ ne donnent pas souvent une restitution optimale du signal. En effet, pour pouvoir rendre compte du déphasage entre deux réponses issues de 2 points voisins, l'espace temporel doit être très finement échantillonné ($f_e \gg 2f_0$). Si on part du principe qu'un signal peut toujours être transposé en bande de base sans altération de l'information qu'il contient et en appliquant ce principe au théorème de Shannon, celui-ci devient : la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être au minimum égale à B ($f_e \gg B$) avec B la bande qu'occupe le signal. Ceci est une généralisation du théorème de Shannon (le théorème de Shannon-Nyquist).

2.3.3.5 Dimension du pixel

A la réception, les fréquences d'échantillonnage temporel en distance (f_e) et spatiale en gisement ($\Delta\theta$) fixent la dimension du pixel. Pour avoir une image sonar de bonne qualité, la dimension du pixel doit être inférieure ou égale à la résolution du sonar. En effet, les dimensions longitudinale et latérale d'un pixel sont définies, respectivement, par d_i et d_j :

$$d_i = c/(2f_e) \quad (2.16)$$

$$d_j = D\Delta\theta \quad (2.17)$$

Dans le cas d'un sonar monovoie, $\Delta\theta = \delta\theta$, et par conséquent $d_j = \delta l$ (où δl est la résolution latérale).

2.3.4 Sources d'imperfections (dégradations)

2.3.4.1 Le bruit multiplicatif (*speckle*)

L'amplitude du signal reçu par le sonar à un instant donné est la somme des contributions élémentaires de plusieurs microdiffuseurs présents dans la cellule de résolution. La distance exacte qui sépare chacun des micros diffuseurs du sonar définit la phase de celui-ci. Comme leurs déphasages respectifs varient beaucoup, les sommes se font parfois en phase et parfois en opposition de phase. Des fortes fluctuations donnent l'aspect granulaire de l'image sonar. Ce phénomène donne lieu à un bruit multiplicatif qui est caractéristique du phénomène de réverbération. Il est appelé chatoiement (*speckle* en anglais) [Qui01].

2.3.4.2 Réverbération

L'onde émise par le transducteur peut atteindre la surface de la mer ainsi que les inhomogénéités se trouvant dans le volume d'eau (bulles d'air, aspérités, etc.) et être diffusée dans des directions aléatoires. Une partie de cette énergie sera retournée au transducteur et modifie ainsi l'image finale. Ce phénomène a deux effets : la réduction de la quantité d'énergie qui pourra atteindre le fond d'où l'augmentation de la perte qui limite la portée du signal et la génération d'un niveau constant d'une énergie parasite qui est susceptible de masquer la réponse du fond ou de la cible. Si la cellule de résolution du sonar est suffisamment grande, la rétrodiffusion de l'énergie émise répond à un phénomène appelé réverbération. La partie rétrodiffusée par la surface de la mer est la réverbération de la surface, celle rétrodiffusée par les inhomogénéités dans le volume d'eau est la réverbération du volume et la partie rétrodiffusée par le fond est la réverbération du fond. La réverbération de la surface dépend de l'état de la mer et de la position du sonar. En effet, si la surface de la mer est calme, sa contribution est une colonne étroite ayant un niveau de gris élevé, la position de cette colonne est définie par la position du sonar par rapport au fond et à la surface de la mer. Si le sonar est plus proche de la surface, la ligne va apparaître avant la première réponse du fond est elle sera très brillante. Si le sonar est plus proche du fond, la ligne va apparaître après la première réponse du fond et sera superposée à la réverbération du fond.

Dans le cas où la mer est agitée, les réflexions sur les faces internes des vagues vont produire des sortes de tâches aléatoires sur l'image sonar. Ces effets indésirables peuvent être minimisés en pointant le transducteur le plus loin possible de la surface de la mer ou en améliorant la directivité en site.

Chaque type de fond est caractérisé par un coefficient de rétrodiffusion qui définit l'amplitude moyenne de l'onde rétrodiffusée. Autour de cette amplitude, des fluctuations importantes du signal reçu donnent l'aspect granulaire du fond qui est dû, principalement,

au bruit de speckle (paragraphe 2.3.4.1). Sur l'image sonar, deux niveaux de speckle sont présents : un fort niveau qui est lié à la réverbération du fond et un faible niveau qui représente uniquement la réverbération de volume et éventuellement la surface, que l'on peut voir sur les zones d'ombre acoustique (absence de réverbération du fond) [Qui01].

2.3.4.3 Bruits

Outre le bruit ambiant et le bruit multiplicatif, introduits, respectivement, au paragraphes 2.2.4.3 et 2.3.4.1, les données sonar sont soumises à deux autres types de bruit :

- Le bruit propre du porteur produit par son déplacement (sillage du bateau, hélices, appareillage, etc.)
- Le bruit électronique généré par l'électronique de réception du sonar

D'autres sources de dégradations peuvent survenir, telles que le phénomène de remonté du niveau de bruit sur la frontière de la zone d'ombre dû à la présence des lobes secondaires associés à des lobes principaux pointant une partie annexe du fond ou encore une mauvaise calibration et/ou mouvements involontaires de l'antenne, etc [Qui01].

2.3.4.4 Trajets multiples

Les trajets multiples interviennent en cas d'interaction entre l'onde et le fond ou la surface de la mer. Leur effet est plus important dans les eaux peu profondes où les trajets qui proviennent de la surface forment un vrai problème [HG04]. Un effet d'interférence se produit quand les trajets touchent à la fois le fond et la surface avant qu'ils soient captés par le transducteur [Bel95].

En général, le fond, la surface ou les objets forment un obstacle à l'onde acoustique qui se propage dans le milieu marin. Les différentes interactions possibles entre un rayon sonore et un obstacle sont illustrées par la figure 2.10.

En se plaçant dans l'approximation des hautes fréquences, les surfaces des obstacles sont donc supposées rigides (pas de propagation de l'onde à l'intérieur). Par conséquent, les effets de réfraction ne seront pas modélisés.

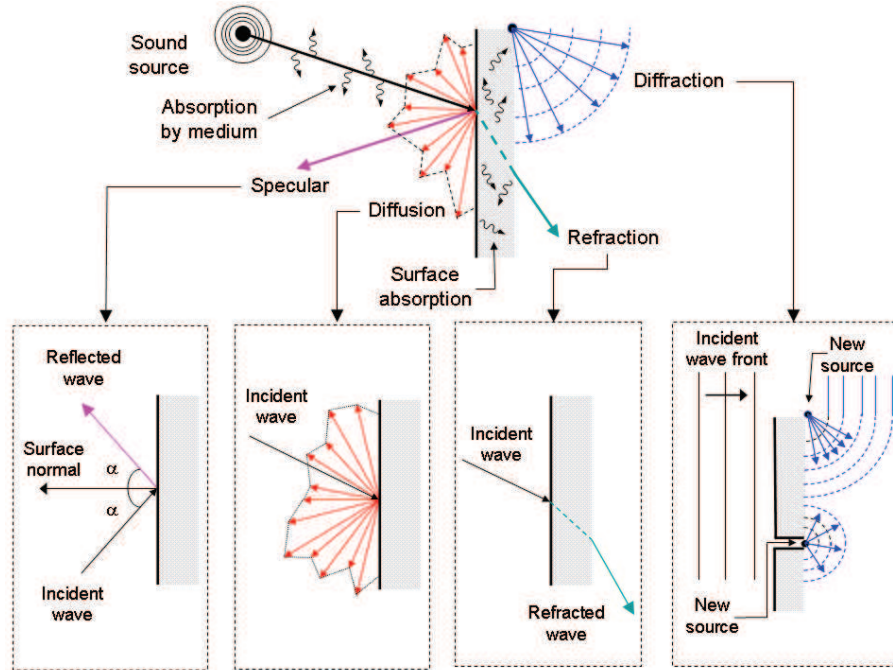


FIGURE 2.10: Interactions entre un rayon sonore et un obstacle [KJM08]

2.3.5 Distribution statistique des pixels (images sonar)

D'après le phénomène de formation du speckle, décrit dans le paragraphe 2.3.4.1, le champ acoustique rétrodiffusé peut être vu comme la somme d'un grand nombre d'ondes complexes indépendantes dont les parties réelle et imaginaire de l'amplitude résultante suivent une loi gaussienne, d'après le théorème de limite centrale [LC86] [Lap09].

L'amplitude du signal résultant peut être modélisée par une variable aléatoire qui suit une loi de Rayleigh dont l'écart type est proportionnel à l'espérance [Qui01]. La démonstration se fait grâce à la somme quadratique des deux composantes gaussiennes indépendantes.

2.3.6 Signaux et traitements des données brutes

2.3.6.1 Fréquences et contraintes

La gamme des fréquences utilisée en acoustique sous-marine va de $10kHz$ à $2MHz$, selon l'application [Lur02]. Le choix d'une fréquence pour une application donnée doit prendre en compte les contraintes physiques liées à celle-ci.

D'une part, la résolution spatiale est d'autant meilleure que la fréquence est élevée mais l'absorption du son dans l'eau augmente très rapidement avec la fréquence, ce qui limite la portée maximale.

D'autre part, une antenne est d'autant plus directive que sa taille est plus grande que la longueur d'onde. La taille de l'antenne (physique) devient très vite restrictive aux basses fréquences.

La fréquence définit aussi la réponse acoustique de la cible puisque l'amplitude de cette réponse dépend non seulement de l'indice de cible mais aussi de la perte d'énergie dans l'eau. L'indice de cible lui-même est fonction de la longueur d'onde et des dimensions de la cible [Uri83].

Dans les opérations de détection et de classification, les fréquences utilisées sont hautes et le sonar latéral opère près du fond afin d'obtenir des images hautement résolues.

Il existe 4 gammes de fréquences qui définissent la portée maximale d'un système sonar : les basses fréquences ne dépassent pas le $80kHz$, les moyennes fréquences se situent entre $80kHz$ et $100kHz$, les hautes fréquences sont supérieures à $100kHz$ et les très hautes fréquences atteignent le MHz [Lur02].

2.3.6.2 Emission

Afin d'augmenter le rapport signal sur bruit (SNR : Signal Noise Ratio) et, par conséquent, la portée du sonar, la puissance du signal émis est maximisée. Les puissances électriques à l'émission sont typiquement de plusieurs centaines de watts à quelques kilowatts. Les niveaux atteints à l'émission (Le terme SL dans l'équation 2.1) sont en général de l'ordre de 220 à 230 dB (réf. $1\mu Pa$ à $1m$).

Pour des raisons technologiques, la puissance maximale est limitée par des contraintes mécaniques et électroniques. Cependant, il est possible d'augmenter la quantité d'énergie transmise en émettant plus longtemps. Mais, puisque la résolution en distance est inversement proportionnelle à la largeur de bande B , cette dernière doit être importante. Or, pour une impulsion monochromatique ($B \times Tpulse = 1$), plus la largeur de bande est importante, plus la durée du signal $Tpulse$ doit être courte et moins d'énergie peut être émise [Leg11].

L'objectif est d'émettre plus longtemps pour une largeur de bande donnée tout en conservant une bonne résolution.

Deux types de signaux sont classiquement utilisés par les systèmes sonar :

- L'impulsion bande étroite (Burst) ou monochromatique : Ce signal est couramment utilisé puisque une seule fréquence est émise et le traitement en réception est simple. Le principe du traitement consiste en une détection de l'énergie présente dans la bande et la durée du signal; on parle de traitement non-cohérent. Il s'agit d'une sinusoïde limitée dans le temps par un rectangle de durée $Tpulse$, d'amplitude constante A , de fréquence f_0 et de durée $Tpulse$.

$$e(t) = A.Rect(t) \exp^{2\pi j f_0 t} \quad (2.18)$$

avec $Rect$ la fonction porte de durée $Tpulse$ centrée en 0.

$$Rect(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } |t| < Tpulse/2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.19)$$

Ce type de signal donne de bonnes performances mais il nécessite d'émettre des niveaux d'énergie importants en augmentant A ou $Tpulse$ [LC04].

- Le signal modulé linéairement en fréquence (Chirp) : Ce type de signal permet d'émettre de manière continue les différentes fréquences. En fonction de la loi d'évolution en fréquence, la durée du signal peut être plus ou moins longue. Il s'agit d'une sinusoïde dont la fréquence instantanée varie linéairement avec le temps.

Si le signal est de durée $Tpulse$ et balaie la bande B centrée en f_0 , le chirp s'écrit :

$$e(t) = A.Rect(t) \exp^{2\pi j(f_0 + \frac{B}{2Tpulse}t)t} \quad (2.20)$$

La fréquence instantanée varie alors de $f_0 - B/2$ pour $t = -Tpulse/2$ à $f_0 + B/2$ pour $t = Tpulse/2$, soit une longueur de bande B découplée de la durée du signal.

Ce type de signal est traité en réception par corrélation du signal reçu $s(t)$ avec une copie du signal émis $e(t)$. Ce traitement dit cohérent est connu sous le nom de compression d'impulsion et met en oeuvre un filtrage adapté.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{e}(u)s(t+u)du \quad (2.21)$$

Avec \bar{e} est le conjugué de e .

En effet, elle permet de concentrer l'énergie du signal en sortie de traitement sur une durée τ de l'ordre de $1/B$ alors que l'énergie du signal en entrée s'étalait sur une durée $Tpulse$. La résolution est améliorée d'un facteur $BTpulse$. En respectant la condition $B > 1/Tpulse$, le filtrage adapté permet de s'affranchir de la contrainte sur la durée du signal émis.

La nouvelle résolution en distance s'écrit alors comme suit :

$$\delta D = c/2B \quad (2.22)$$

Le rapport de compression RC permet d'augmenter le gain en puissance PG du même facteur. Il est défini par :

$$RC = Tpulse/\tau = Tpulse.B = PG \gg 1 \quad (2.23)$$

Après filtrage adapté, l'enveloppe du signal est un sinus cardinal qui peut avoir des lobes secondaires importants. Pour atténuer l'effet de ces lobes secondaires, le signal est multiplié par une fenêtre dite d'apodisation (type Hamming ou Hanning) avec un

recouvrement par moitié de fenêtre [Leg11].

Puisque le bruit et le signal émis ne sont pas corrélés, le chirp est souvent utilisé quand un rapport signal sur bruit élevé est requis au détriment d'une complexité importante du traitement.

2.3.6.3 Réception et traitements

En général, les transformations apportées aux données brutes, afin d'obtenir des images exploitables, sont subdivisées en 3 grandes catégories [Phi09] : prétraitement, traitement et post-traitement.

Le prétraitement et le traitement sont spécifiques pour chaque type de sonar puisqu'ils dépendent du format des données, quant'au post-traitement sert, par exemple, à améliorer le contraste et réduire le bruit de speckle. Dans notre chaîne de traitement, la phase désignée par post-traitement dans [Phi09] correspond concrètement à la phase de prétraitement pour faire la classification.

Dans la suite, nous allons détailler cette dernière catégorie.

- **TVG (Time Varying Gain)**

Dans une image sonar brute la luminance n'est pas uniforme tout au long de la portée. Parmi les facteurs de perte d'énergie, il y a l'absorption du signal par propagation dans l'eau qui augmente en fonction de la distance. Ce phénomène est illustré par la figure 2.11. Pour des distances allant de D1 à D5, le niveau de gris dans une ligne de l'image sonar décroît jusqu'à devenir complètement noir à la fin de portée (distance D5). Par conséquent, l'image devient moins contrastée à la fin de portée qu'en début de portée. Ce phénomène est susceptible de limiter la possibilité de détecter et de classifier les cibles à partir de leurs ombres acoustiques surtout à grande distance.

Pour avoir des images de luminance uniforme sur toute la portée il est indispensable d'appliquer une correction pour compenser une partie de ces pertes.

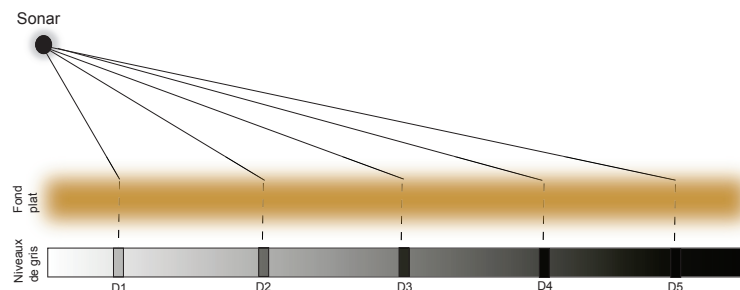


FIGURE 2.11: Effet de la portée sur la luminance de l'image sonar

Le post-traitement utilisé est souvent l'application d'une TVG sur le signal reçu afin de réduire sa dynamique avant numérisation.

Par ailleurs, la perte d'énergie par propagation $2TL$ que l'onde subit durant la propagation (paragraphe 2.2.6) est proportionnelle à la distance D et le coefficient d'amortissement de l'onde acoustique dans l'eau α , elle s'exprime, en Décibels, par :

$$2TL = 40\log_{10}(D) + 2\alpha D \quad (2.24)$$

En introduisant la formule de perte du signal par propagation dans l'équation de sonar 2.1, le TVG est donc [MOS⁺07] :

$$TVG(D) = n.10\log_{10}(D) + 2\alpha D \quad (2.25)$$

La valeur de n dépend du modèle de propagation de l'onde :

- $n = 2$ dans le cas d'une propagation cylindrique dans l'eau peu profonde
- $n = 3$ dans le cas d'une propagation sphérique afin d'assurer une réverbération du fond indépendante des interférences provoquées par la réverbération de la surface d'eau.
- $n = 4$ dans le cas d'une propagation sphérique afin d'assurer une réponse constante d'une cible ponctuelle indépendamment de la distance par rapport au sonar.

- **Normalisation**

D'une manière générale et dans un contexte de classification, les images sonar doivent être normalisées au préalable. La normalisation de l'image est une étape nécessaire puisqu'elle limite les dispersions intra-classe [JAN87]. Le principe d'acquisition des systèmes sonar engendre des fortes distorsions sur les images obtenues. D'autre part, les variations brusques de la vitesse et la trajectoire du sonar provoquent aussi des distorsions sur l'image qui doivent être corrigées. Pour des raisons technologiques, la résolution en distance est plus fine que la résolution en gisement. Cette faible précision en gisement entraîne une distorsion entre la taille réelle du pixel et l'aire effective qu'il représente sur le terrain. De même, la faible rasance entraîne une élongation, suivant l'axe des distances, de la forme de l'ombre acoustique portée par un objet présent sur le fond [Qui01]. La figure 2.12, montre qu'à une distance $D2$ plus grande que la distance $D1$ l'ombre de l'objet est plus longue ($O2 > O1$) et ceci est dû au fait que l'angle de rasance φ_2 est plus petit que φ_1 .

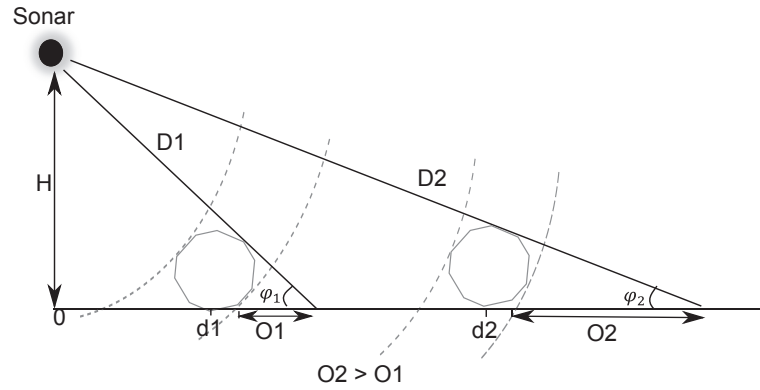


FIGURE 2.12: Elongation des formes de l'ombre portée des objets en fonction de la rasant

La normalisation est primordiale dans la classification basée sur des critères topologiques (la forme géométrique de l'ombre, par exemple). Suite à ce traitement, les ombres apparaissent bien proportionnées et normalisées en forme. Pour obtenir une image "fidèle" au terrain, les corrections géométriques appliquées sont plus au moins sophistiquées suivant la topographie du fond et la qualité de la route suivie par le sonar [DGM98].

- **Filtrage**

Parmi les particularités que présente l'image sonar, l'aspect bruité qui peut gêner l'interprétation des données. Ce phénomène est la manifestation du speckle, le bruit multiplicatif dû à l'utilisation de l'onde cohérente. Pour réduire l'influence de ce bruit et des parasites, des filtres adaptatifs peuvent être utilisés, et permettent en quelques itérations de réduire le speckle sans affecter les traits principaux de l'image. De plus amples détails sur ce traitement peuvent être obtenus à partir de [Ph.07][Leg12][Mal98][Don94][PPLA02].

2.4 Formation de la réponse acoustique d'une cible

Les lois de l'optique géométrique sont admises dans l'acoustique. Cette approximation connue sous le nom de l'approximation de l'acoustique géométrique a été amplement utilisée pour modéliser le processus de formation de l'écho en acoustique sous-marine et expliquer ainsi le mécanisme de formation des images sonar.

2.4.1 Réponse acoustique (théorique) d'une cible rigide immergée dans un fluide

Le calcul de la réponse d'une cible, même de géométrie simple, de manière exacte reste complexe.

Une cible est dite rigide, c'est-à-dire, qu'il n'y a pas pénétration de l'onde à l'intérieur de la cible, si et seulement si $ka \gg 1$, avec a la dimension de l'objet et $k = 2\pi/\lambda$ le nombre d'onde [Uri83].

La puissance acoustique W_i de l'onde incidente sur une cible rigide est donnée par :

$$W_i = I_i \cdot S \quad (2.26)$$

où S est la surface de diffusion et $I_i = p^2/\rho c$ est l'intensité incidente avec p la pression issue de l'onde incidente, ρ la masse volumique de l'eau et c la célérité. La cible (de dimension finie) se comporte comme une source secondaire qui réagit à l'onde incidente en réémettant une onde acoustique. En champ lointain, l'onde rétrodiffusée par la cible est répartie sur des surfaces sphériques et sa puissance W_r s'écrit donc :

$$W_r = I_r \cdot 4\pi D^2 \quad (2.27)$$

où I_r représente l'intensité de l'onde rétrodiffusée et D la distance d'observation depuis la cible.

Dans le cas de cibles parfaitement rigides, toute l'énergie de l'onde incidente est entièrement diffusée par la cible. Il y a conservation de la puissance acoustique $W_i = W_r$ [Uri83].

Le rapport des intensités rétrodiffusée et incidente s'écrit donc :

$$I_r/I_i = S/4\pi D^2 \quad (2.28)$$

Puisque la quantité d'énergie reçue par la cible est égale à I_i (intensité de l'onde incidente par la section efficace de diffusion S), la quantité d'énergie émise par cette source (située au centre de la cible) à une distance $D = D_0$ ($D_0 = 1m$; la distance de référence) est égale à l'intensité I_r de l'onde rétrodiffusée par la sphère de rayon $D = D_0$ [Bur82]. L'équation 2.28 devient alors :

$$I_r/I_i = S/4\pi \quad (2.29)$$

Il faut noter qu'il s'agit bien d'une approximation de l'onde plane en champ lointain ramenée à $D_0 = 1m$ et non l'intensité directement mesurée à 1m. Dans le cas d'une cible sphérique rigide de rayon a et si la cible est complètement insonifiée, la section efficace de diffusion est $S = \pi a^2$. On obtient alors l'expression bien connue de l'indice de cible TS (2.30) d'une sphère rigide en hautes fréquences ($ka \gg 1$, k le nombre d'onde) :

$$TS = 10\log_{10}(I_r/I_i) = 10\log_{10}(a^2/4) \quad (2.30)$$

En revanche si l'insonification de la cible est partielle, il faut calculer la section apparente de la sphère.

2.4.2 A-scan

Le nom A-scan vient de l'imagerie médicale. Le "A" désigne la première dimension obtenue à partir d'un système d'imagerie (sonar latéral, dans notre cas). L'A-scan est défini par la quantité d'énergie en fonction du temps.

Lorsqu'à une position donnée le sonar émet un ping, l'amplitude de la réponse obtenue après un certain retard est généralement appelée "échogramme" ou "réponse impulsionnelle". L'ensemble des échogrammes d'une sphère à une résolution en gisement $\delta\theta$ égale à 0.5° est donné par la figure 2.13.

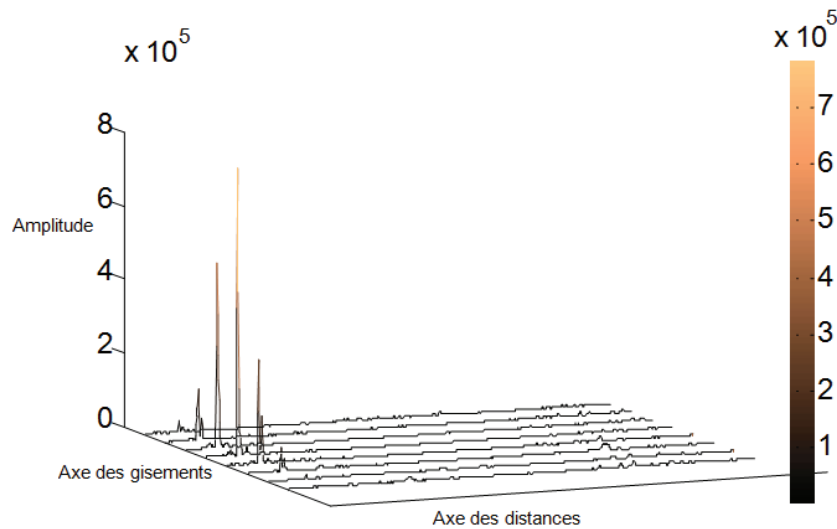


FIGURE 2.13: L'ensemble des échogrammes d'une sphère totalement insonifiée

L'intérêt de l'A-scan est d'autant plus important quand la résolution en gisement est faible. En effet, si la résolution du sonar est moins bonne en gisement (figure 2.14), une seule voie couvre la totalité de la cible. Dans ce cas, l'A-scan est directement donné par le signal de la voie. Par ailleurs, l'A-scan, dans ce deuxième cas, est plus représentatif de la cible puisque il n'y aura pas des discontinuités d'échantillonnage en gisement. La possibilité de travailler même avec une faible résolution est un avantage majeur du traitement basé sur l'A-scan alors que l'ombre acoustique exige une bonne résolution pour être utilisée en classification.

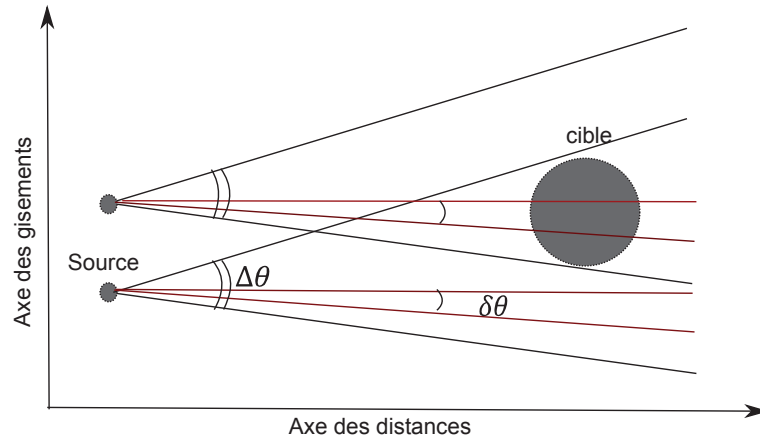


FIGURE 2.14: Méthode d'obtention de l'A-scan par un sonar de bonne ($\delta\theta$) ou de mauvaise ($\Delta\theta$) résolution latérale

Dans ce paragraphe, nous adaptons la notion d'A-scan afin de l'évaluer à partir des images 2D. Ce descripteur déduit à partir de l'image sonar d'une cible sera utilisé dans les chapitre 3 et 4 pour expliquer notre méthode de classification des mines sous marines.

Définition de l'A-scan : signal 1D qui est la somme, sur l'axe des distances, de tous les échogrammes (l'ensemble des positions en gisement) qui renferment une partie de la réponse de la cible. L'axe des x donne la distance (en **m**) et l'axe des y donne l'amplitude cumulée (en **Watt.m⁻²**).

La figure 2.15 illustre la description donnée de l'A-scan.

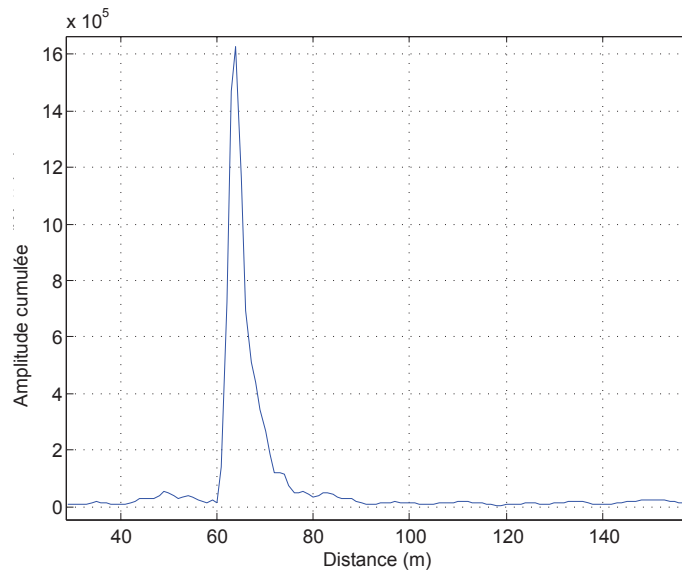


FIGURE 2.15: A-scan d'une sphère de rayon $a = 0.5m$

L'information majeure que renferme l'A-scan est l'agencement temporel des échos rétro-diffusés retardés dans le temps et atténués en amplitude.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les caractéristiques physiques des sonars utiles à notre étude. Les paramètres influençant leurs qualités ainsi que l'acquisition et la formation des images sonar latéral ont aussi été détaillés. Le compromis entre portée et résolution a également été présenté.

Le sonar latéral, opérant à haute fréquence, apporte une réponse efficace aux problèmes liés à la classification des objets reposant sur les fonds marins [Tho96]. Pour bien analyser ces images, il est indispensable de comprendre le processus physique qui régit leur formation et les différents problèmes qui peuvent dégrader leur qualité. Ces notions sont importantes lorsqu'on envisage de simuler tout le processus de formation de ces images. Généralement, ces images sont constituées de trois types de zones : écho, ombre et fond. Pour identifier les cibles, les deux informations pertinentes sont l'écho et l'ombre acoustiques. L'observation de la forme d'ombre a été largement utilisée pour caractériser la forme géométrique d'un objet immergé (paragraphe 4.2). En revanche, l'écho est jusqu'à présent peu utilisé dans le processus de classification. Les systèmes sonar hautement résolus d'aujourd'hui permettent d'envisager de classifier à la fois sur ombre et sur écho.

Il est connu que l'écho peut être variable et dépend fortement des conditions d'acquisition (environnement, signal transmis, etc.). Cependant, il fournit une information pertinente qui mérite d'être utilisée comme un élément d'amélioration de la classification. Ce potentiel de l'information écho sera étudié dans le chapitre 4 en utilisant le descripteur "A-scan".

Chapitre 3

Modélisation des images sonar

3.1 Introduction

Notre objectif est de classer automatiquement les cibles sous marines d'une manière fiable et efficace. Pour atteindre cet objectif, nous allons former, dans le chapitre 4, un système de classification basé modèle dans la phase d'apprentissage au lieu d'utiliser directement de signatures acoustiques des cibles réelles. Pour obtenir suffisamment des données dans des configurations précises et pour divers scénarios, il est indispensable d'avoir recours à la simulation. Avec une approche basée modèle, une bonne performance en classification est étroitement liée à la bonne modélisation des signatures acoustiques des cibles.

Le développement d'un modèle pour simuler le processus d'acquisition des données sonar nécessite la modélisation des processus physiques sous-jacents afin de produire une image quantitative de la même forme que les images réellement produites par le sonar. Un tel outil est particulièrement attrayant pour les besoins d'identification et de classification grâce à la création d'une base des signatures acoustiques, pertinentes et permettant de faire la classification.

Comme les sonars d'imagerie fonctionnent à haute fréquence ou très haute fréquence, typiquement de 100 kHz à 2 MHz, le principe général du modèle est basé sur le lancer de rayons acoustiques. Plusieurs phénomènes ont été modélisés pour augmenter le réalisme des réponses acoustiques obtenues (propagation multi-trajets, interaction avec le fond, discontinuités de la surface, etc.).

Dans ce chapitre, nous présentons la première partie de la méthode de classification. Elle consiste à modéliser les signatures acoustiques des cibles qui formeront la base d'apprentissage du système de classification automatique qui sera décrit dans le chapitre suivant.

3.2 Techniques de modélisation en acoustique sous-marine

Depuis plusieurs décennies, différents modèles ont été développés pour caractériser les phénomènes acoustiques [Pau03][Ett12][MA64][Jac94][CM77]. La combinaison des modèles de réverbération et de propagation acoustique a abouti à créer des modèles globaux de sonars actifs capables de fournir une prédiction numérique de la quantité d'énergie présente pour une situation particulière du sonar en tout point de l'espace. Certains simulateurs ont un rendu plus ou moins proche de la réalité.

3.2.1 Intérêt de la modélisation

La notion du modèle pour décrire les phénomènes acoustiques a été imaginée pour satisfaire différents rôles. Ces modèles ont été appliqués d'une part à la prévision, et d'autre part, à l'analyse des phénomènes acoustiques sous-marins. Dans cette partie, nous décrivons les principales raisons dans leur développement et les rôles qu'ils remplissent auprès de la communauté de l'acoustique sous-marine.

En tant qu'outil de prévision, ces modèles sont capables de fournir un moyen de conception systématique des expériences, qu'elles soient dans l'intérêt de comprendre la complexité de l'environnement ou pour étudier son effet sur les signaux acoustiques. Dans les deux cas l'intérêt est de minimiser le coût d'expérimentation qui peut être très élevé en termes de temps d'acquisition et d'équipements navires nécessaires à une campagne réelle en mer.

En tant qu'outil d'analyse, ces modèles peuvent également être utilisés pour accroître l'efficacité de l'analyse des données et leur interprétation. La modélisation permet aussi de calculer des paramètres descriptifs de l'océan à partir des données expérimentales en se basant sur des modèles inverses [Bel95].

Pour développer un modèle global de traitement d'un sonar actif, il faut intégrer plusieurs sous-modèles. En commençant par modéliser l'onde émise, sa propagation dans l'eau, la surface de l'eau et le fond marin jusqu'à arriver aux lois de rétrodiffusion.

3.2.2 L'équation d'onde

La propagation de l'onde acoustique dans un milieu fluide est décrite par l'équation de l'onde 3.1, où p est la pression acoustique de l'onde, c la célérité locale du son et Δ le Laplacien [MC97].

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

En se plaçant dans l'espace de Fourier, l'équation d'une onde sinusoïdale de fréquence f_0 est donnée par l'équation de Helmholtz 3.2, où $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde [Lur02] :

$$\Delta p + kp = 0 \quad (3.2)$$

La modélisation de la propagation des ondes est généralement basée sur le fait que l'onde est plane ou courbe. L'approximation des ondes planes est utilisée quand l'amplitude du champ de pression peut être considérée comme localement constante et la courbure du front d'onde devient négligeable.

En régime harmonique, la propagation de l'onde dans un milieu homogène comporte deux zones [Leg11] :

- Zone du champ proche (ou zone de Fresnel), où le champ de pression subit une succession de maxima et de minima d'amplitude rendant cette zone difficilement exploitable. C'est la zone la plus près du transducteur. La limite de cette zone est donnée par D_0 , avec L la dimension du transducteur et λ la longueur d'onde :

$$D_0 = 2L^2/\lambda \quad (3.3)$$

- Zone du champ lointain (ou zone de Fraunhofer), où l'amplitude du champ de pression décroît régulièrement et le faisceau devient divergent. C'est la zone au-delà de D_0 . L'onde est localement approximée à une onde plane pour simplifier le calcul (pour faire la formation des voies, par exemple).

Si on considère le cas usuel d'une source ponctuelle placée dans un milieu isotrope, la propagation de l'onde en 3 dimensions est sphérique et elle est donnée par l'équation 3.4, avec $w = 2\pi f_0$ la vitesse angulaire du signal, k le nombre d'onde et D la distance oblique :

$$p(D, t) = \frac{p_0}{D} \exp(j(\omega t - kD)) \quad (3.4)$$

La pression décroît en $1/D$ par rapport à la valeur de référence p_0 prise à la distance de référence ($1m$).

3.2.3 La célérité

Le paramètre qui influe sur le chemin de propagation du son dans la colonne d'eau est la vitesse du son (en plus de son gradient), qui a une valeur nominale de $1500ms^{-1}$. La vitesse du son dans l'océan est une fonction de trois variables : température, salinité et la profondeur (ou pression). Elle change donc de manière significative avec la saison, l'heure de la journée, la météo et la position géographique, etc.

Plusieurs formules ont été utilisées par la communauté des acousticiens pour caractériser

cet attribut, et il n'y a pas totale unanimité sur la meilleur formule existante. Medwin [CM77] a proposé une expression simple de la vitesse du son c exprimée en $m.s^{-1}$ (3.5). D'autres formules plus complexes ont été proposées par Del Grosso [DG74], Chen et Millero [MW97].

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + (134. - 0.010T)(S - 35) + 0.016z \quad (3.5)$$

où T est la température en degrés centigrades, S la salinité en parties par millier et z est la profondeur en mètres.

L'équation 3.5 a été proposée par Medwin pour une combinaison réaliste des variables dans l'intervalle de température de 0° à 35° centigrades, pour une salinité de 0% à 45% et pour des profondeurs jusqu'à $1km$ de la surface.

La propagation acoustique peut également être fortement influencée par un phénomène de nature océanographique : les ondes internes. Ces ondes constituent un des facteurs prépondérants dans la dynamique et la variabilité des océans. Elles sont parmi les principales causes des phénomènes de mélange en eaux profondes et contribuent fortement à la circulation océanique. Elles sont, de plus, à l'origine des mouvements de la thermocline. De telles fluctuations du profil de température sur différentes échelles de temps et d'espace induisent des variations du profil de vitesse du son dans la colonne d'eau. Les ondes internes ont donc un effet direct sur la propagation de l'onde [Bou06].

L'eau de l'océan est souvent divisée en 3 classes : eau profonde, thermocline ou proche de la surface. Les profils de vitesse de deux zones sont différents. En dessous de la surface de la mer la température décroît rapidement avec la profondeur ce qui constitue la principale cause de la thermocline. Sous la thermocline on arrive à une région de température constante, ce qui entraîne l'augmentation du profil de la vitesse. A température et salinité constantes, la vitesse du son augmente avec la profondeur (3.5). Près de la surface, le mélange causé par le vent produit souvent une colonne d'eau presque isotherme qui donne lieu à un profil de célérité linéaire avec un gradient positif.

Un exemple de profil de la célérité du son dans l'océan est présenté dans la figure 3.1.

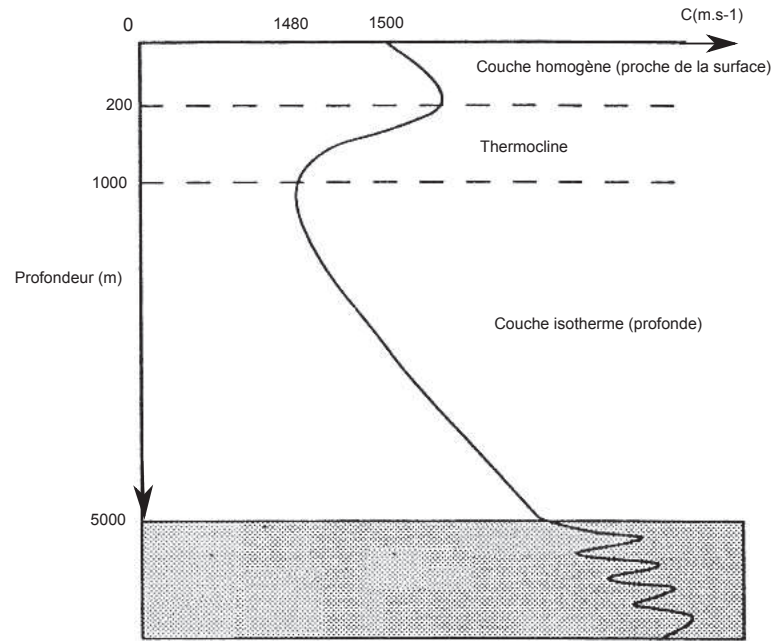


FIGURE 3.1: Structure "type" d'un Profil de célérité : 3 couches sont généralement distinguées (proche de la surface, thermocline et profonde)

3.2.4 Effet de la célérité sur la propagation d'onde

Lors du passage d'un milieu à un autre ayant une célérité différente, l'onde subie une réflexion spéculaire dans le premier milieu et une réfraction dans le second. L'angle selon lequel l'onde est réfractée est donné par la loi de Snell-Descartes (3.6) [Lur02].

$$\cos \varphi_1 / c_1 = \cos \varphi_2 / c_2 \quad (3.6)$$

La propagation entre les milieux (1) et (2) ainsi que les angles de rasances φ_1 et φ_2 sont schématisés sur la figure 3.2.

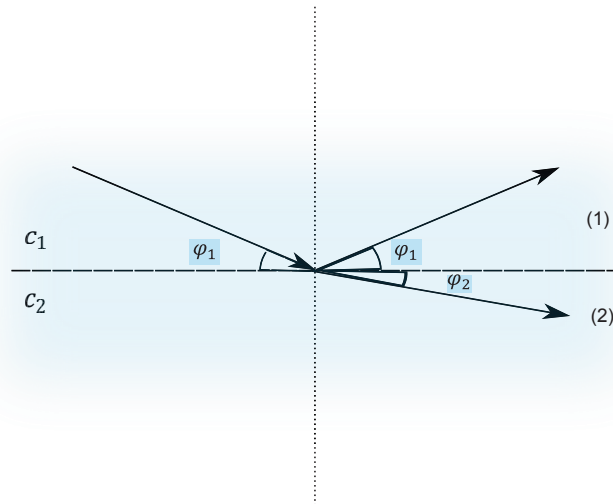


FIGURE 3.2: Réfraction et réflexion de l'onde sonore dues au changement de célérité entre les milieux (1) et (2) ($c_1 < c_2$)

La relation 3.6 n'est valable que si $\cos \varphi_2 \leq 1$, donc pour $\cos \varphi_2 \leq c_1/c_2$, on en déduit la valeur de l'angle critique donnée par l'équation 3.7.

$$\varphi_c = \cos^{-1}(c_1/c_2) \quad (3.7)$$

Cette condition se traduit par l'impossibilité de transmettre l'onde vers le deuxième milieu pour des rasances inférieures à l'angle critique. Dans ce cas, l'onde est totalement réfléchi et change de direction par conséquent.

Le profil de la célérité peut être plus ou moins compliqué. Quand la variation du profil de la célérité dépend uniquement de la profondeur et que le fond marin est supposé plat, le milieu est dit stratifié. Cette hypothèse simplifie énormément le calcul de l'équation de propagation. En réalité, cette condition n'est pas toujours vérifiée puisque la célérité dépend aussi de la distance et/ou du gisement dans un milieu qui contient des fronts océaniques et/ou des tourbillons. Ce phénomène altère le chemin de l'onde et rend la modélisation de sa propagation plus complexe. Le trajet emprunté par l'onde peut être mis sous la forme d'un "rayon acoustique". Lors de sa propagation, le rayon acoustique subit une courbure basée sur la résolution de l'équation de Helmholtz en se plaçant dans l'hypothèse d'un environnement horizontalement stratifié. Pratiquement, cette hypothèse est basée sur une interpolation linéaire de la vitesse du son entre les points de profondeur afin de définir un certain nombre de couches de gradient de vitesse constant. Cette approximation est justifiée par le fait que la courbure du rayon acoustique et la variation de la vitesse du son sur la longueur d'onde sont petites pour les hautes fréquences [Bel95]. La figure 3.3 donne un exemple des trajets des rayons incurvés dans un milieu à célérité variable pour une source placée proche de la surface. L'effet du profil

de célérité dépend aussi de la position du sonar par rapport au fond et la surface de l'eau.

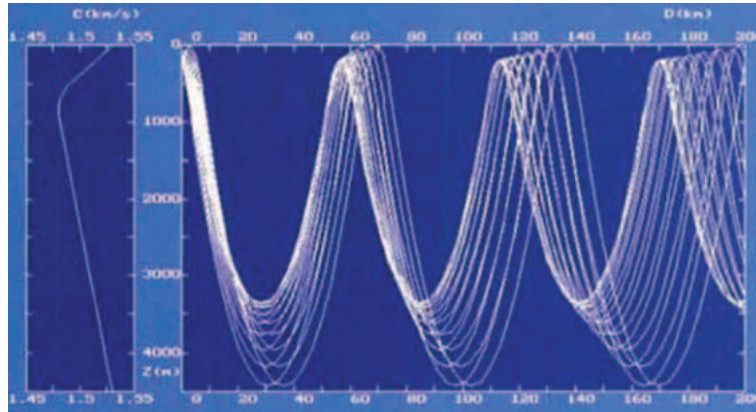


FIGURE 3.3: Trajets des rayons sonores dans un milieu à célérité variable (cas d'une source placée proche de la surface) [Lur98]

Dans chacune des couches de gradient de vitesse constant, le profil de la vitesse est linéaire et le gradient g_i est donné par la formule 3.8.

$$g_i = (c_{i+1} - c_i)/dz \tag{3.8}$$

Le rayon acoustique peut être représenté par un arc de cercle de rayon R_c [Bel95]. Cette situation est schématisée sur la figure 3.4. φ_i et φ_{i+1} sont les angles respectifs que font les tangentes au cercle aux points de coordonnée z_i et z_{i+1} par rapport à l'horizontale. Les célérités respectives en ces deux points (de coordonnée z_i et z_{i+1}) égalent à c_i et c_{i+1} .

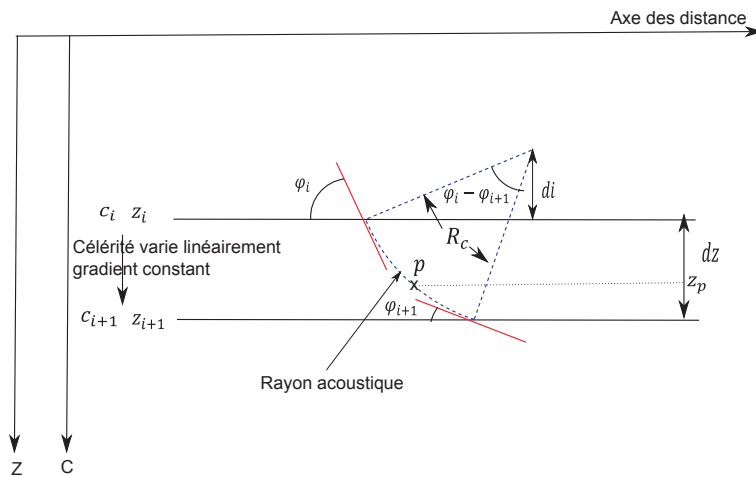


FIGURE 3.4: Trajet d'un rayon dans une couche de gradient de vitesse constant

La relation qui relie les coordonnées cartésiennes d'un point sur un cercle de rayon R_c à ses coordonnées polaires est donnée par l'équation 3.9.

$$d_i = R_c \cos(\varphi_i) \quad (3.9)$$

$$dz = \delta d = R_c (\cos \varphi_{i+1} - \cos \varphi_i) \quad (3.10)$$

Le rayon R_c de cet arc se déduit à partir de l'équation 3.10 en appliquant la loi de Snell-Descartes :

$$R_c = c_i / g_i \cdot \cos \varphi_i \quad (3.11)$$

La position d'un objet ou d'un point spécifique, selon l'axe des distances, dans une image sonar est déterminée par le temps d'aller-retour nécessaire pour intercepter ce point. Théoriquement, la courbure des rayons a une influence sur les deux principaux paramètres mesurés par le sonar : le temps de propagation (aller-retour) de l'onde et l'intensité sonore à un instant donné. En effet, le temps de propagation n'est plus directement proportionnel à la distance parcourue à cause de la variation de la célérité tout au long de la propagation.

Le parcours de chaque rayon est donc construit progressivement à travers chaque couche de gradient de vitesse constant, jusqu'à son arrivée au fond de la mer.

Les trajets des rayons sonores sont des droites dans un milieu iso-célère et des arcs de cercles dans un milieu à célérité variable avec une concentration des rayons (dans le milieu à célérité variable) dans une zone spécifique de minimum de célérité (convergence) [Lur10].

Le temps de parcours aller-retour T_{ar} est calculé en sommant les temps élémentaires tc_i mis par le rayon à travers chacune des couches i .

$$T_{ar} = 2 \cdot \sum_i tc_i \quad (3.12)$$

$$tc_i = R_c (\varphi_i - \varphi_{i+1}) / (c_i + c_{i+1}) / 2 \quad (3.13)$$

$(c_i + c_{i+1})/2$ dans (3.13) est la célérité moyenne dans la couche de gradient constant et le facteur 2 dans (3.12) est vérifiée puisque d'après Horton on peut supposer que le rayon rétrodiffusé suit le même chemin dans son retour vers le sonar [Hor59]. Cette hypothèse concerne le cas où le récepteur est supposé fixe (ne se déplace pas entre l'émission et la réception) pour chaque impulsion.

Le premier effet de la variation de la célérité sur le temps d'aller-retour peut avoir un résultat sur la localisation du pixel de l'image sonar qui correspond à un point donné sur le fond.

Le deuxième effet sur l'amplitude du signal est dû à l'angle d'incidence du rayon au point d'intersection qui dépend de la courbure du rayon et contribue au calcul de l'intensité rétrodiffusée. Le résultat de cet effet sur l'image sonar est plus marquant à des grandes distances. Pratiquement, Bell a pu conclure par l'analyse des différences entre les temps d'aller-retour et entre les angles d'incidences pour, d'une part, un profil iso-célère et, d'autre part, différents profils de célérité variable que l'approximation d'un profil iso-célère a un effet très faible sur l'énergie rétrodiffusée. Les différences les plus importantes ont été obtenues uniquement pour des grandes distances pour lesquelles la réponse est déjà faible à cause de la grande atténuation par propagation [Bel95].

Notre but consiste à classifier les cibles sous marines à partir de leurs échos, il est donc possible d'estimer que l'effet de la variation de la célérité localement (sur l'écho de la cible) soit négligeable. Nous allons démontrer cette supposition dans le paragraphe 3.8 en comparant les images obtenues pour deux célérités différentes.

3.2.5 Modèles de la propagation

Lors de la propagation, l'onde subit différents phénomènes dus au caractère dissipatif du milieu de propagation d'une part, et au mécanisme de propagation lui-même d'autre part. L'énergie initialement émise à partir d'une source sonore s'étale sur une surface de plus en plus importante constituant ainsi la propagation de l'onde acoustique. En plus des effets de la divergence géométrique l'onde subit une absorption par le milieu (paragraphe 2.2.6.1).

La propagation acoustique devient relativement complexe dans un milieu peu profond. En effet, les phénomènes de réverbération et de diffusion sont d'autant plus marqués que le nombre de réflexions intervenant à la fois sur la surface et le fond est élevé c'est-à-dire pour des profondeurs qui ne dépassent pas les 400m [Bou06]. Ce phénomène est connu sous le nom des trajets multiples (paragraphe 2.3.4.4). En plus de la profondeur, la fréquence de l'onde émise a une influence importante sur la propagation dans l'eau. Il est donc important de prendre en compte systématiquement toutes ces conditions dans les modèles de propagation.

Il existe deux approches classiques à la résolution de l'équation d'onde qui sont les méthodes ondulatoires qui consistent à trouver une solution directe et exacte de l'équation de propagation et la méthode des rayons qui est une approximation haute fréquence qui néglige les effets de diffraction. Il existe aussi des modèles hybrides qui combinent deux techniques afin d'améliorer la robustesse dans des milieux très complexes [Lur10].

3.2.5.1 Méthode des rayons

La méthode des rayons est une méthode géométrique basée sur l'utilisation de la technique de lancer de rayons pour le calcul des pertes par propagation. Cette méthode découle de l'approximation de l'optique géométrique (paragraphe 3.5.1.1) qui décompose le champ total en trois catégories de rayons à l'interface de deux milieux d'indices différents (rayons émis, réfléchi et transmis). C'est une approximation haute fréquence qui estime la réponse du signal en émettant des rayons acoustiques en partant de la source et qui suit leur parcours à travers la scène en sauvegardant leurs interactions avec toutes les surfaces. La contribution de chaque rayon est ensuite calculée. Les effets de réflexion, réfraction et de diffusion peuvent être modélisés en considérant un grand nombre de rayons.

L'approximation sur laquelle la méthode est basée est vérifiée dans le cadre des applications des images sonar latéral. Elle est très performante pour l'étude de la propagation de signaux à spectre large [Lur10].

Les modèles de propagation basés sur la théorie des rayons sont généralement utilisés pour des applications en eaux profondes impliquant des expériences tomographiques ainsi que pour des applications hautes fréquences dans les petites profondeurs (la chasse aux mines, détection, sonar actif). Nous avons choisi cette méthode pour le simulateur que nous avons développé dans le cadre de ce travail.

3.2.5.2 Méthodes ondulatoires

Les modèles de propagation basés sur les méthodes ondulatoires, telles que les modes normaux, sont dérivés de la représentation en intégrale de l'équation d'onde. Cette représentation est possible quand la célérité ne dépend que de la profondeur.

Ces méthodes sont plutôt utilisées pour des applications très basses fréquences dans l'eau peu profonde (propagation du bruit de navire, sonars passifs). Ces techniques sont utiles quand la résolution cherchée est de l'ordre de la longueur d'onde afin de pouvoir faire une analyse rigoureuse du comportement du champ acoustique.

Des plus amples détails sur la modélisation de la propagation acoustique se trouvent dans les ouvrages spécialisés de Buckingham [Buc92], Jensen *et al.* [Jen94], Lurton [Lur10] et Etter [Ett12].

3.2.6 Modèles de la rétrodiffusion

La recherche d'une description meilleure du mécanisme de formation de l'écho est la motivation principale dans cette étude et le facteur commun entre les différents modèles

étudiés. Il est indispensable de prendre en compte avec précision le phénomène de la rétrodiffusion acoustique.

3.2.6.1 Description du phénomène de rétrodiffusion

La rétrodiffusion des signaux acoustiques après avoir heurtés un objet ou le fond marin fournit le principe fondamental du fonctionnement de tous systèmes d'imagerie sous-marine. La diffusion des ondes acoustiques à partir d'une surface rugueuse est un phénomène complexe qui se produit dans des nombreux domaines, y compris l'optique et l'électromagnétique. En fait, la même théorie a été exploitée pour une variété d'applications. Les solutions élaborées pour le calcul de la diffusion ne sont pas complètes, mais plusieurs approches existent, chacune ayant ses limites et ses conditions d'application.

La rétrodiffusion est influencée par le type de sédiments lorsqu'il s'agit du fond et le type du matériau lorsqu'il s'agit d'un objet. La caractéristique dominante dans la détermination de la rétrodiffusion est la rugosité. La rugosité est un terme utilisé pour décrire une surface, puisqu'elle dépend des propriétés du matériau et de l'onde incidente. La rugosité du fond marin, par exemple, est partiellement dépendante du type de sédiment.

En effet, l'angle d'incidence et la fréquence de l'onde vont déterminer comment une surface rugueuse apparaît. La même surface peut apparaître plus lisse avec une longueur d'onde courte ou aussi selon un angle d'incidence plus grand [Bel95].

L'onde acoustique incidente sur une surface non lisse est à la fois réfléchi et diffusé. Elle peut même être absorbée et réfractée selon le type de la surface. Certains modèles sont dits monostatiques puisqu'ils ne peuvent calculer l'énergie rétrodiffusée que dans la direction de l'onde incidente. D'autres modèles sont bistatiques et peuvent calculer le champ diffusé dans une autre direction.

La diffusion et la réflexion se produisent chaque fois qu'il y a un changement dans l'impédance acoustique. La proportion de l'énergie réfléchi est donnée par Cr :

$$Cr = (Zr \sin \varphi_1 - Zw \sin \varphi_2) / (Zr \sin \varphi_2 + Zw \sin \varphi_1) \quad (3.14)$$

où Zw est l'impédance acoustique de l'eau, Zr l'impédance acoustique du réflecteur, φ_1 et φ_2 sont donnés sur la figure 3.2 et Cr est le coefficient de réflexion à l'interface eau-réflecteur.

A l'interface eau-air, l'impédance acoustique de l'eau est $Zw = 1.5 \cdot 10^6 Pa.s/m$, et l'impédance acoustique de l'air est $Zr = 430 Pa.s/m$, le coefficient de réflexion est égal alors à :

$$Cr(\text{en dB}) = -0.005\text{dB} \quad (3.15)$$

Les sons ne se transmettent quasiment pas de l'eau vers l'air.

A l'interface eau-fond la situation est beaucoup plus compliquée. En effet, Zr , l'impédance acoustique du fond de la mer, est maintenant beaucoup plus grande que Zw , l'impédance acoustique de l'eau. La valeur de Cr est positive (mais proche de l'unité). La majeure partie de l'énergie est réfléchiée et seule une petite fraction pénètre dans le fond. Cependant, le fond de la mer possède des propriétés acoustiques très variables en raison de sa composition et la nature non homogène de ses sédiments, de sorte que son impédance acoustique Zr varie sensiblement à la fois avec la profondeur de pénétration et latéralement. Une connaissance suffisamment précise et détaillée de la nature du fond n'est jamais disponible pour assurer des prévisions exactes de la diffusion ou la propagation dans le fond de la mer [Wai02], la nature de l'interaction de l'onde avec l'interface (réflexion et diffusion) est fonction de la rugosité de la surface. Si l'onde incidente frappe une surface de la mer ou un fond parfaitement lisse, la quasi-totalité de l'énergie est réfléchiée dans la direction spéculaire. Quand la surface à l'interface devient de plus en plus rugueuse, l'énergie est de plus en plus diffusée dans les directions non-spéculaires et la réflexion spéculaire se réduit en intensité jusqu'à ce que, pour une surface très rugueuse, il ne reste plus de pic discernable dans la direction spéculaire.

Lord Rayleigh [SRL45] a pu résumer cet effet par un paramètre R qui permet de prendre en compte la longueur de l'onde incidente, l'angle de rasance et la nature de la rugosité de l'interface rencontrée :

$$R = kh \sin \varphi \quad (3.16)$$

où h est la hauteur des ondulations de la surface mesurées de crête en creux, φ est l'angle de rasance et $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde.

Dans la pratique, la réflexion et la diffusion sont deux phénomènes qui cohabitent sur une surface maritime ou un fond marin réels. Il est donc nécessaire de définir deux régimes en fonction de R .

- Lorsque $R \ll 1$ la surface est considérée lisse. La rugosité de la surface est faible d'où la composante cohérente (spéculaire) est importante : *Réflexion*
- Lorsque $R \gg 1$ la surface est rugueuse. L'onde subit alors une diffusion à cause de la rugosité importante. la composante spéculaire devient négligeable et finit par devenir inexistante dans le cas d'une surface très rugueuse : *Diffusion*

Qualitativement, la relation entre la rugosité du sol et la diffusion de la surface est illustrée par la Figure 3.5. L'interface étudiée, ici, est le fond de la mer.

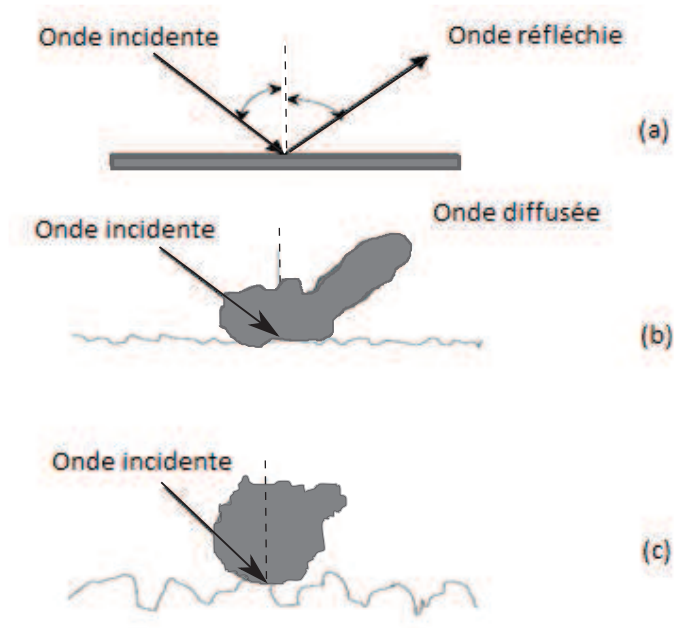


FIGURE 3.5: Étude qualitative de la diffusion sur une surface (a) parfaitement lisse, (b) rugueuse et (c) très rugueuse

La situation est similaire lorsqu'on considère la surface de la mer comme interface. La figure 3.5 sera donc inversée.

La rétrodiffusion dans l'environnement marin peut être décrite soit par la loi de Rayleigh soit par l'approximation de l'acoustique géométrique [Pau03]. La loi de Rayleigh s'applique quand la taille a du diffuseur est beaucoup plus petite que la longueur de l'onde incidente λ ($ka \ll 1$). L'approximation de l'acoustique géométrique est valable quand la taille a est beaucoup plus grande que λ ($ka \gg 1$). Quand a est proche de λ ($ka \approx 1$) le diffuseur interfère fortement avec l'onde. Cette interaction est relativement complexe et la zone correspondante est appelée zone de Mie (figure 3.6).

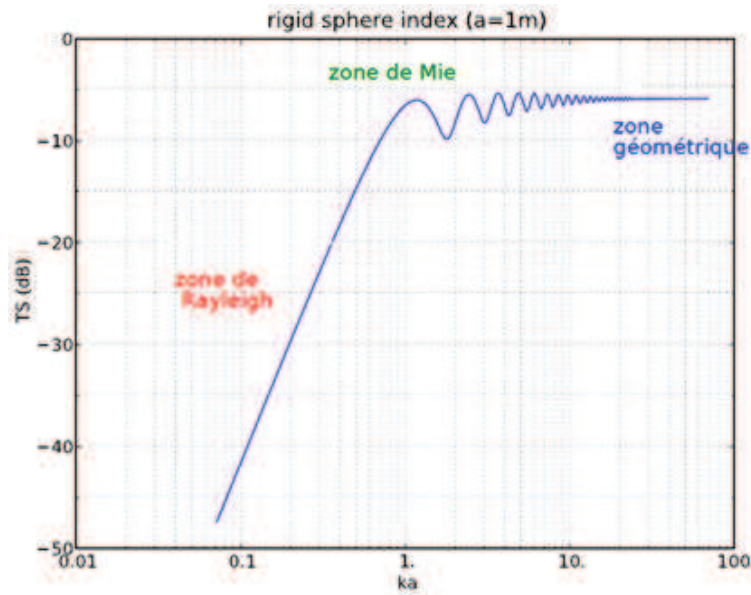


FIGURE 3.6: Réfraction sur une sphère rigide de rayon a [Leg11]

Ces approches sont basées sur la modélisation d'un réflecteur élémentaire par : un point (microdiffuseur) ou une cellule (macrodiffuseur). L'approche de la rétrodiffusion par un point assume que les microdiffuseurs sont aléatoirement distribués. Le niveau de réverbération est ensuite calculé en sommant les échos de chacun des diffuseurs individuels. L'approche de la rétrodiffusion par une cellule assume que les diffuseurs sont uniformément distribués. Pour estimer le niveau moyen de réverbération totale il faut sommer les contributions de chacune des cellules. Pour chaque unité de surface (ou de volume), un indice de rétrodiffusion est utilisé. C'est la deuxième approche qui a été souvent la plus utilisée pour la modélisation des sonars actifs.

3.2.6.2 Les différents types de rétrodiffusion dans un environnement océanique

L'onde émise se propage dans le volume d'eau pour atteindre la surface de la mer ou le fond ainsi que les couches inférieures des sédiments. La rétrodiffusion de l'onde incidente se produit à chacune de ses interfaces. L'énergie retournée au transducteur peut contenir alors la contribution d'une ou toutes ses sources de réverbération y compris les inhomogénéités se trouvant dans le volume d'eau.

- **Réverbération de surface**

L'énergie diffusée par la surface de la mer varie en fonction de l'angle d'incidence et de la fréquence de l'onde émise. Des formules empiriques ont été élaborées pour modéliser ce phénomène. Parmi ces formules, on trouve celle donnée par Chapman et Harris

[CH62] qui est adaptée en particulier à des fréquences comprises entre 1 et 10 kHz.

- **Réverbération de volume**

La réverbération de volume résulte de la diffusion d'énergie par un mélange complexe de différents organismes. Elle est donc majoritairement de nature biologique. Les diffuseurs de volume ne sont pas répartis uniformément dans la mer et ont tendance à être concentrés dans la couche profonde. L'énergie rétrodiffusée dépend de l'activité biologique et aussi de la profondeur des profils qui varie avec la fréquence [Lur02].

- **Réverbération du fond**

C'est la rétrodiffusion des signaux acoustiques par le fond de la mer qui fournit le principe fondamental du fonctionnement du sonar latéral. Parmi les notions fondamentales pour décrire la rétrodiffusion c'est la section efficace de diffusion qui a été définie par Urick [Uri83] (3.17).

$$\sigma = \frac{r^2 I_s}{S I_i} \quad (3.17)$$

Avec S est la surface de la zone dans laquelle la diffusion est mesurée et r est la distance de référence à laquelle les intensités sont calculées. I_s est l'intensité de l'énergie rétrodiffusée vers la source par unité de surface ou de volume à une distance de référence de 1m de son centre acoustique et I_i l'intensité de l'onde incidente. Le terme σ est un paramètre sans dimension.

En haute fréquence, ce coefficient mesure le pouvoir diffusant intrinsèque d'un objet, indépendamment de sa taille et de sa distance par rapport au point d'observation.

L'indice de rétrodiffusion est défini en fonction de σ par la formule 3.18 :

$$TS = 10 \log_{10}(\sigma) \quad (3.18)$$

Une relation de corrélation entre l'indice de rétrodiffusion et la taille des particules qui forment le fond a été constatée par McKinney et Anderson [MA64]. Le fond peut être donc classé selon sa composition sédimentaire. Il peut être de l'argile, sable, galets, cailloux ou un mélange de ceux-ci.

L'indice de rétrodiffusion du fond peut être considéré constant à des fréquences jusqu'à 10 kHz et à des angles de rasances jusqu'à 10 degrés. Il est, cependant, très dépendant des matériaux qui le composent. Il est possible d'avoir une large disparité dans des données mesurées pour un même type de fond, ceci peut être dû entre autre aux réfractions et réflexions dans les sédiments des couches inférieures [Pau03].

Au delà de 10 kHz, le coefficient de rétrodiffusion semble augmenter d'environ 3dB par octave pour les fonds lisses (argile, sable), mais pour les fonds rugueux (galets, cailloux, roche), c'est à dire, où la rugosité est importante par rapport à la longueur

d'onde, ce coefficient est indépendant de la fréquence [Wai02].

Dans le contexte de la chasse aux mines, les sonars doivent fonctionner à des fréquences élevées. L'augmentation du niveau de la réverbération du fond en fonction de la fréquence limite les performances en détection et en classification d'objets.

Le type de l'application à laquelle se destine la modélisation du phénomène de rétrodiffusion va limiter les types de réverbération à prendre en compte. Pour la chasse aux mines sur un fond dur à l'aide d'un sonar latéral dont l'onde rasante pénètre peu dans le sédiment, l'intérêt est focalisé sur la surface du fond [Ber08]. D'autant que le coefficient de rétrodiffusion du fond est généralement supérieure à celui de la surface de la mer et par conséquent, lorsque le lobe vertical du sonar est orienté vers le bas de façon à intercepter le fond (ce qui est généralement le cas dans les eaux peu profondes), la réverbération du fond est souvent dominante et sera la plus importante à modéliser dans les problèmes de détection et de classification [Bel95]. C'est pour cette raison, dans ce travail, on s'est intéressé uniquement à la rétrodiffusion des signaux par le fond sans modéliser les deux autres sources de réverbération (de volume et de surface).

3.2.6.3 Les modèles physiques de diffusion acoustique

Dans la littérature on trouve des modèles physiques de rétrodiffusion acoustique et d'autres empiriques. Les modèles physiques sont développés sur des théories physiques rigoureuses qui sont difficiles à mettre en oeuvre et leur inversion est souvent difficile [Ber08]. Quand aux modèles empiriques, ils forment des outils pratiques d'exploitation des données réelles.

Les premières études de la diffusion à partir d'une surface non plane ont été effectuées par Lord Rayleigh [SRL45]. Il a exprimé le champ acoustique diffusé par une somme d'ondes planes. Cette solution n'est valable que si la rugosité est faible par rapport à la longueur d'onde incidente et les pentes locales de relief sont suffisamment faibles. Ce travail a été étendu plus tard par Rice à des surfaces rugueuses aléatoires avec des angles d'incidences obliques [Ric51]. La diffusion est ensuite calculée en considérant la diffusion à partir d'une surface lisse, à laquelle s'ajoute un terme de perturbation en raison de la faible rugosité de la surface. C'est la méthode des petites perturbations [Ber08].

Lorsque la rugosité n'est plus négligeable devant la longueur d'onde incidente, la méthode des petites perturbations n'est plus applicable. Dans ce cas, la contribution du champ diffusé n'est plus négligeable devant la contribution du champ spéculaire. L'approximation de Kirchhoff considère la surface élémentaire de diffusion comme un plan infini tangent au point d'impact. Il est possible de définir un plan tangent de surface non nulle autour du point d'impact lorsque le rayon de courbure de l'interface de diffusion est plus grand que la longueur d'onde incidente.

La théorie de Kirchhoff donne une solution plus précise que la théorie des perturbations dans son domaine de validité [Bel95]. C'est une théorie exacte si la surface de diffusion est plane, lisse et infinie. Si la surface de diffusion est de taille finie, non plane ou rugueuse, le champ calculé est une approximation.

Ces deux techniques (la méthode des petites perturbations et l'approximation de Kirchhoff) sont les deux principales techniques de modélisation de la rétrodiffusion acoustique. Chacune considère une échelle unique de la rugosité de la surface. Ceci limite leur applicabilité en fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence.

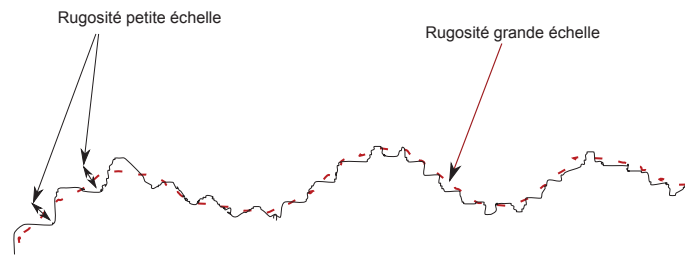


FIGURE 3.7: Illustration de deux échelles de rugosité

Le domaine de la rugosité à petite échelle satisfait les hypothèses du modèle des petites perturbations alors que le domaine de la rugosité grande échelle vérifie les conditions de validité du modèle de Kirchhoff. Un nombre d'onde de coupure de rugosité peut être défini afin de mieux séparer les deux échelles de rugosité [Ber08].

Le modèle de la rugosité composée relie les deux modèles précédents afin de modéliser les deux échelles de rugosité (figure 3.7) qui peuvent néanmoins se recouvrir. Les deux contributions sont ensuite raccordées par une fonction d'interpolation de façon à fournir un coefficient de rétrodiffusion unique pour l'interface. La majorité des travaux qui ont utilisé ce modèle étaient dédiés à la modélisation de la diffusion à partir de la surface de la mer [MG82]. Le modèle de la rugosité composée a été étendu par Jackson *et al.* [JWI86] pour modéliser la rétrodiffusion du fond marin en se basant sur une formule empirique des pressions obtenues grâce à des expériences à la surface de la mer.

Une autre méthode plus récente, la méthode des faibles pentes (SSA pour Small Slope Approximation) qui relie le champ acoustique diffusé par un milieu inhomogène au champ incident. Cette dernière approche permet de traiter toutes les configurations de surface et de fournir un coefficient de rétrodiffusion surfacique le plus exact possible sur tout le domaine angulaire, sans passer par une discrétisation du spectre comme le modèle précédent de rugosité composée. Elle donne des résultats similaires à la méthode des petites perturbations dans son domaine de validité par contre par rapport à l'approximation de Kirchhoff elle fournit des résultats légèrement moins bons [BT97].

Cette approche présente un modèle homogène d'où son potentiel très prometteur. Néanmoins, elle demeure coûteuse et sa mise en application sur des données océanographiques

demeure rare. C'est une approche qui est principalement gardée comme un outil d'étude théorique [Ber08].

3.2.6.4 La rétrodiffusion à partir d'un fond marin

Les modèles physiques décrits dans le paragraphe précédent restent valables pour modéliser la rétrodiffusion à partir du fond. Mais en pratique, des modèles basés sur l'expérimentation seront fidèles au réel. Ces modèles quantifient de manière empirique les principaux comportements acoustiques qui ont été prédits par les modèles physiques mais ils n'établissent pas un lien direct avec les grandeurs physiques du phénomène et leur domaine d'applicabilité est restreint puisque les conditions environnementales d'acquisition seront spécifiques.

- **Loi de Lambert**

La loi de Lambert, bien qu'elle ne soit pas démontrée pour l'acoustique mais plutôt pour l'optique, est parmi les modèles empiriques les plus simples. elle a été utilisée dans plusieurs travaux pour calculer l'indice de rétrodiffusion à des faibles rassesances et particulièrement pour des interfaces très rugueuses sur tout le domaine angulaire [CN93][CJL⁺06].

Ce modèle suppose que la surface est parfaitement diffusante, si bien que l'intensité du champ diffusé est maximale en incidence normale et diminue en s'éloignant de cette condition.

Cette condition se traduit, dans une configuration monostatique, par la formule 3.19 où l'indice de rétrodiffusion $Id(\theta)$ est proportionnel au cosinus de l'angle de diffusion. L'interprétation physique de la loi de Lambert est que l'énergie diffusée par une surface apparaît tout aussi intense, quel que soit l'angle de vue.

$$Id(\theta) = A\mu_0 \cos^2(\theta) \quad (3.19)$$

où : θ l'angle de diffusion, A l'unité de la surface diffusante (m^2) et μ_0 le paramètre de Lambert.

En logarithmique,

$$BTS(\theta) = BS0 + 20 \log_{10}(\cos\theta) \quad (3.20)$$

$$BS0 = 10 \log_{10}(\mu_0) \quad (3.21)$$

La constante μ_0 est une fonction de la réflectivité (Cr) et de la rugosité de l'interface. Elle est généralement, définie d'une façon empirique. Sa valeur théorique pour une

surface parfaitement réfléchissante égale à 1. D'où la valeur (théorique) maximale de $BS0$ est de l'ordre de -5dB, dans la pratique les valeurs observées sont comprises entre -10 et -40 dB [Lur10].

La plupart des études ont obtenu des ajustements raisonnables de la loi de Lambert à des données expérimentales à des rasances inférieures à 45 degrés ([Lur10] paragraphe A.3.4).

En se basant sur certains travaux qui ont étudié la diffusion d'une onde par différents types de fond pour plusieurs angles de rasances et différentes gammes des fréquence [Mac61][Sch71][BU68], Urick [Uri83] a pu déduire qu'il n'y a pas de relation claire entre la fréquence et l'intensité rétrodiffusée. Mais ces études ont observé une relation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'angle d'incidence qui était conforme à la loi de Lambert. Plus tard, Gensane [Gen89] a comparé des données mesurées en incidence proche de la normale et il a pu voir une déviation par rapport à la loi de Lambert pour des angles d'incidences inférieurs à 25 degrés.

Si le fond de la mer possède une rugosité grande par rapport à la longueur de l'onde incidente, la rétrodiffusion est indépendante de la fréquence et la loi de Lambert sera applicable. Si la rugosité est petite par rapport à la longueur d'onde, l'intensité diffusée augmente avec la fréquence. Ceci n'est pas pris en compte par le modèle de Lambert [Ber08].

- **Modèle de Jackson**

Du fait de la gamme des incidences et des fréquences utilisées par les sonars, Jackson *et al.* [JWI86] puis Mourad *et al.* [MJ93] ont proposé un modèle hybride valide pour une gamme de fréquences allant de 10 à 100 kHz.

Ainsi, pour les angles de rasances supérieurs à 70 degrés les auteurs utilisent l'approximation de Kirchhoff (valable quand le rayon de courbure de la surface est grand devant la longueur d'onde). Ils utilisent le modèle de rugosité composée pour les angles de rasances inférieurs à 70 degrés à condition que la rugosité grande échelle soit douce (telle que l'écart type de ses pentes soit inférieur à 0.1) et que la rugosité petite échelle soit petite devant la longueur d'onde.

En l'absence des mesures expérimentales des propriétés des sédiments, les paramètres surfaciques peuvent être estimés à partir des relations empiriques construites par Mourad et Jackson [MJ89], en utilisant des mesures sur la taille logarithmique des grains. Ce modèle a également été étendu par Mourad et Jackson pour modéliser l'absorption du son par les sédiments [Bel95]. Bien que ce modèle présente des problèmes pour modéliser la rétrodiffusion à des angles très rasants [TB95], il reste un des modèles les plus pratiques en terme de mise en oeuvre grâce au nombre réduit de paramètres d'entrée qui avaient généralement des liens physiques directs avec les caractéristiques

du fond marin.

- **Modèle APL-UW**

L'APL-UW (Applied Physics Laboratory, University of Washington) [Jac94] est un modèle semi-empirique basé sur les mêmes considérations théoriques que le modèle de Jackson. Des modifications empiriques ont été apportées au modèle de Jackson afin de mieux ajuster ses réponses à des données expérimentales obtenues pour des fonds durs [Ber08]. Ces modifications consistent principalement à approximer les formules intégrales par des expressions analytiques empiriques et la prise en compte plus réaliste de l'atténuation.

- **Autres modèles empiriques**

Parmi les modèles empiriques les plus anciens, on trouve celui développé par McKinney et Anderson [MA64]. Il opère dans une gamme de fréquence allant jusqu'à 300 kHz. Il dépend, en plus de la fréquence, de l'angle d'incidence et d'un paramètre lié au type du fond. Dans leurs modèles, les auteurs prennent en compte différents types de sédiments du moins au plus rugueux (Sable, Vase, Gravier, etc.). En revanche, ce modèle ne tient pas compte de la rétrodiffusion volumique ni de la présence de spéculaire puisqu'il était dédié à des petites rasances.

Un autre modèle plus récent, basé sur la loi de Lambert, a été largement utilisé par le GESMA. Comme le modèle de McKinney et Anderson, il est adapté à des applications du sonar latéral en haute fréquence en particulier aux applications d'imagerie. Le modèle du GESMA est indépendant de la fréquence et dépend uniquement de l'incidence sur l'interface de diffusion [Bou92].

Le modèle empirique le plus récent a été développé par l'équipe NSE/AS de l'IFREMER [LC04][HBL03]. Il permet de prédire l'évolution du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence. Il est composé d'un certain nombre de paramètres qui n'ont pas une signification physique directe mais peuvent quantifier les principaux comportements acoustiques qui ont été prédits par les méthodes physiques pour décrire les fonds marins.

3.2.6.5 Conclusion sur les modèles de rétrodiffusion du fond

Le modèle physique qui donne des résultats bien en cohérence avec les mesures est le modèle de Kirchhoff [Ker94][SCL94]. L'idéal est d'utiliser un modèle hybride, comme celui de Jackson, qui réunit le principe de Kirchhoff et la théorie des perturbations pour mieux prendre compte de deux niveaux de rugosité aux surfaces.

Le modèle le plus simple et qui donne une adéquation aux données expérimentales à des

faibles rasances est le modèle de Lambert. Cette partie sur les modèles de rétrodiffusion n'est pas exhaustive et davantage de détails sur ces modèles ainsi que les éventuels modèles non cités ici se trouvent dans la publication récente d'Etter [Ett12].

3.2.6.6 La rétrodiffusion à partir d'un objet

L'interface de rétrodiffusion peut être un objet de forme quelconque. Cet objet peut être posé sur le fond, enfoui (partiellement ou totalement) ou suspendu dans la colonne d'eau. La rétrodiffusion de l'onde par des cibles a été largement étudiée dans le but de prédire l'indice de la cible (TS). En se basant sur les différentes approches évoquées dans le paragraphe 3.2.6.3 on peut conclure que pour certaines d'entre elles (théorie de Kirchhoff par exemple) les conditions d'applicabilité sont vérifiées par des cibles sous marines et spécifiquement les mines qui sont supposées lisses et rigides en appliquant l'approximation des hautes fréquences (cibles dont les dimensions sont très grandes par rapport à la longueur d'onde).

Un calcul exact de l'énergie diffusée peut être mené pour des cibles de géométries simples telles que la sphère et le cylindre infini [Ton96]. Certaines méthodes sont même capables de calculer la rétrodiffusion des objets simples pour toutes les fréquences [Cat12]. Dans le cas des cibles de géométries plus complexes, on a souvent recours à des méthodes intégrales, l'intégration est réalisée numériquement en se basant sur un échantillonnage suffisant de la surface de diffusion qui donne une bonne approximation du champ diffusé. Ces méthodes sont fréquentielles ou temporelles.

- **Modèle de Freedman [Fre62]**

Freedman [Fre62] a élaboré son modèle sur des hypothèses simplificatrices. Il se place dans le cadre de l'acoustique linéaire et de l'approximation de Kirchhoff (les phénomènes de diffraction multiple et les ondes rampantes ne sont pas pris en compte). La première hypothèse concerne la longueur d'onde utilisée qui est beaucoup plus petite que la dimension et le rayon de courbure de la surface de diffusion, ce qui a permis d'utiliser l'approximation de Kirchhoff. Cette hypothèse sert également à réduire l'impact des ondes rampantes et autres ondes de surface. La deuxième hypothèse concerne, quant à elle, la localisation de la surface de diffusion qui se trouve dans la région de Fraunhofer (ie. champ lointain). Cela se traduit par le fait que la dimension du transducteur et la taille du diffuseur sont faibles par rapport à la distance qui les sépare.

En générale, la diffusion d'onde peut survenir de trois manières distinctes : à partir de la surface externe, à partir de la surface interne et à partir des phénomènes de résonance. Le modèle de Freedman suppose que le premier mécanisme est dominant. Les hypothèses physiques qui permettent d'obtenir ceci sont les suivantes :

- L’objet est supposé rigide pour éliminer les réflexions internes
- Les amplitudes des ondes acoustiques sont trop petites pour provoquer aucun mouvement dans l’objet et éviter ainsi les phénomènes de résonance.

L’approximation de Kirchhoff utilisée est basée sur 2 hypothèses :

- La surface de diffusion est composée d’un nombre infini de primitives élémentaires
- Chaque élément dS de la surface diffuse l’onde incidente dans le demi-espace qui l’entoure

En utilisant l’approximation ci-dessus et les autres hypothèses, Freedman a donnée une expression de l’écho renvoyé par une cible 3.22 :

$$E = \frac{1}{\lambda} \sum_{g=0} \exp(-2jk(r_g - r_1)) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{D_g^n(S)}{(2jk)^n} \quad (3.22)$$

où $D_g^n(S)$ est la discontinuité dans la dérivée d’ordre n de la surface de diffusion S de la cible à une distance r_g , r_1 est la plus petite distance qui sépare la cible de la source, k est le vecteur d’onde et λ la longueur d’onde.

Freedman a pu donner une explication du mécanisme suivant lequel se forme l’écho en utilisant l’équation 3.22. D’après Freedman, l’écho est formé d’une série d’impulsions discrètes dont chacune est la répétition de l’impulsion émise car leur structure est identique à l’impulsion transmise et diffère uniquement par l’amplitude. Il a choisi ainsi d’appeler “image d’impulsions” les échos qui se produisent à chaque discontinuité. Ce modèle de formation d’écho a été repris par plusieurs auteurs pour des fins divers dans l’acoustique sous marine [Ber08] et aérienne [RLDV94][Tsa05].

• Méthodes exactes

Parmi les méthodes capables de donner la réponse des objets de formes quelconques : la méthode de différences finies (DF) et la méthode des éléments finis (EF). Ces deux méthodes nécessitent un maillage très fin.

Elston et Bell [EB98] ont utilisé la FDTD (Finite Difference Time Domain) pour simuler des images sonar dans un environnement très complexe. Le modèle qu’ils ont proposé permet entre autre de prendre compte de la phase, des réflexions multiples, de l’aspect variable de la célérité du son et la topologie complexe du fond.

Le premier avantage de la méthode des différences finies est le fait qu’elle donne une solution directe de l’équation d’onde dans le domaine temporel, et le signal est récupéré par les transducteurs directement sous forme d’une série temporelle sans aucun post traitement. Cette méthode permet aussi de simuler des sonars multi-sources et récepteurs, d’introduire un signal prédéfini par l’opérateur et contrôler l’introduction du bruit [EB98]. Sachant la valeur du champ acoustique à l’instant $t = 0$, la FDTD permet d’estimer la pression acoustique à tout instant et à tout point de l’espace, c’est

la raison pour laquelle elle peut être utilisée pour toutes les géométries (Sonar monostatique, bistatique, avec une grille d'antenne mobile ou statique). Cette flexibilité donne à cette méthode la possibilité de modéliser une multitude de situations.

Le problème avec les modèles basés sur les différences finies est la grande dimension de calcul. Afin d'obtenir une bonne précision, le champ de pression acoustique doit être très échantillonné dans l'espace et dans le temps. Cet échantillonnage doit être de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde, respectivement en temps et en espace. Le nombre exact de points par longueur d'onde et par période dépend de la scène à modéliser, et généralement doit être égal au minimum à 10 selon Elston & Bell [EB98]. Des techniques comme la "FDTD glissante" sont utilisées en modélisation électromagnétique et peuvent être adaptées à l'acoustique. Cette technique fournit une solution précise au niveau local.

La méthode des EF est une alternative de DF puisqu'elle discrétise le problème de façon plus optimale. Cette approche est complexe à implémenter mais elle donne des résultats stables et précis avec un coût moins élevé [FFM98].

Les méthodes intégrales "BE" peuvent aussi être utilisées, mais certaines configurations peuvent être difficiles à gérer puisque c'est un système des équations linéaires. Les méthodes des EF et les BE sont complexes à implémenter mais leurs résultats sont stables et précis avec un temps de calcul optimal comparé aux différences finies. Brind *et al.* ont développé une application pour détecter les mines posées sur le fond ou enfouis en utilisant une méthode basée sur les éléments finis [BMHM12].

3.2.6.7 Conclusion sur les modèles de rétrodiffusion d'un objet

Les méthodes des EF et des DF sont capables de donner une réponse de la cible exacte. Mais le calcul n'est pas toujours faisable pour des fréquences supérieures à quelques kilohertz (> 10 kHz) même en simplifiant le traitement par la résolution de l'équation d'onde dans une zone limitée autour de la cible. Pour la simulation des images sonar à hautes fréquences, le temps de traitement reste toujours énorme pour ces méthodes. En effet, le nombre de noeuds du maillage varie en $(1/\lambda^3)$.

Dans le domaine des hautes fréquences, où les DF et les EF ne sont pas pratiques, Catherall [Cat12] a utilisé l'approximation de Kirchhoff pour prédire les indices des cibles de formes quelconques et Fawcett [Faw01] a utilisé la même approximation (de Kirchhoff) combinée à l'approche de diffraction de Keller pour calculer la réponse d'une cible rigide. Malgré l'absence de toute vérification expérimentale concrète de ce modèle, il s'agit d'un modèle avec une base théorique solide et qui fournit une compréhension intuitive des mécanismes à l'origine de la diffusion des ondes courtes. C'est pour cette raison que nous

l'avons choisi comme une théorie appropriée pour fonder notre modèle de rétrodiffusion à partir des objets.

3.3 Etat de l'art des simulateurs d'images sonar

Beaucoup de chercheurs dans le domaine de l'acoustique ont été amenés à développer leurs propres simulateurs d'images sonar pour palier au manque de données réelles disponibles ou pour produire celles qui correspondent à leur étude spécifique. Plusieurs approches ont été utilisées pour la simulation d'images sonar, dans le domaine temporel ou fréquentiel.

3.3.1 Domaine fréquentiel

Il existe des modèles de simulation d'images sonar qui expriment la transformée de Fourier du signal rétrodiffusé en fonction de la transformée de Fourier du signal initialement émis. Cette approche simplifie l'intégration de plusieurs processus faciles à représenter dans le domaine fréquentiel. C'est l'approche utilisée dans les simulateurs SWAT [SCL94], SIMONA [Gro06] et SIGMAS [CG09] développé au NURC (NATO Undersea Research Center).

SWAT (Shallow Water Acoustics Toolkit) développé en 1994 était le premier simulateur capable de produire des images réalistes d'un sonar latéral. Ce simulateur utilise deux modèles de rétrodiffusion. Les cibles sont modélisées par des expressions analytiques pour les objets de formes simples (Sphère, Cylindre, etc.) et par l'assemblage de ces primitives simples pour des cibles plus compliquées.

La réverbération du fond est modélisée par l'approximation de Kirchhoff en supposant que le fond est un ensemble de points ou des petites facettes rectangulaires. La technique de lancer de rayon a été utilisée pour modéliser la propagation. SWAT modélise aussi la pénétration de l'onde, la propagation multi-trajets et la rétrodiffusion volumique.

La limite de ce simulateur se résume dans l'utilisation uniquement des expressions analytiques pour les cibles qui restreint la classe d'objets qui peuvent être modélisés ainsi que la restriction sur la topologie du fond qui est supposée plate.

L'auteur du simulateur SIMONA [Gro06] se place dans le cadre de l'iso-vélocité. Il considère des cibles rigides qui peuvent être posées sur le fond ou bien enfouies. Le calcul de la réponse d'un objet se fait dans le domaine fréquentiel en utilisant l'approximation de Kirchhoff et la condition aux limites de Neumann.

Toutes les entités sont représentées à l'aide des points (source et récepteur ponctuels, objet ponctuel ou formé par un ensemble des points quand il est étendu). SIMONA utilise une réverbération générée d'une façon stochastique ou bien modélisée à l'aide des

points diffuseurs. L'ombre acoustique est générée en omettant l'ensemble de points qui se trouve cachés par la cible. Ce simulateur prend en compte les trajets multiples avec la surface de la mer et le fond.

La même approche fréquentielle de SIMONA est utilisée par le simulateur SIGMAS [CG09] qui suppose aussi que la célérité est constante et que les cibles sont rigides. Il modélise en facettes les surfaces des objets auxquelles il applique l'approximation de Kirchhoff. Il calcule la pression acoustique pour tous les pixels de l'image en même temps. Entre l'instant de l'émission et l'instant de la réception, le sonar est supposé garder la même position.

Wendelboe *et al.* [WJB06] ont proposé un modèle pour simuler les images sonar des mines et d'autres objets sous-marins. Les objets 3D sont supposés rigides puisqu'ils opèrent à haute fréquence et sont numériquement modélisés par des facettes triangulaires planes. Pour chacune des facettes, ils utilisent l'approximation de Kirchhoff en champ lointain [Faw01]. Leur méthode est bistatique et son expression est donnée dans le domaine fréquentiel, basée sur l'équation intégrale de Kirchhoff Helmholtz, afin de pallier quelques instabilités constatées dans le domaine temporel de la même expression. Le champ total diffusé est obtenu par la somme cohérente des contributions de toutes les facettes visibles à l'émetteur et au récepteur. La méthode de Wendelboe est une amélioration d'une expression temporelle du champ de pression diffusé pour une facette triangulaire et qui avait des problèmes numériques pour certains angles [Faw01]. Le principe général de cette méthode a été proposé par Sammelmann [SCL94] et modifié plus tard par Fawcett [Faw01]. C'est une méthode hybride qui combine l'approximation de Kirchhoff et la théorie de diffraction.

L'expression de la réponse d'une facette présentée par Fawcett comprend trois contributions chacune pour un sommet du triangle combinée à la réponse de l'aire effectivement insonifiée. Le problème est dans la réponse temporelle du sommet qui devient instable pour certains angles. La technique de discrétisation des objets en facettes élémentaires a été largement utilisée dans la modélisation. Sammelmann [Sam01][SCL94] et George [GB95] ont utilisé des facettes rectangulaires. L'utilisation des facettes rectangulaires peut créer des problèmes liés à une représentation approximative de la surface des objets de formes quelconques. Par contre, les facettes triangulaires qui sont toujours coplanaires sont adaptées à toutes formes d'objets. Il existe une autre alternative pour les facettes planes qui consiste à utiliser les surfaces B-splines non uniformes (NURBS) [WJB06].

3.3.2 Domaine temporel

La plupart des simulateurs dans le domaine temporel utilisent la méthode de lancer de rayons (paragraphe 3.2.5.1) [Ker94][Bel95][BL97][DGM98]. Parmi les premiers simulateurs celui initialement développé par la thèse de Judith Bell [Bel95] au sein du OSL (Ocean System Laboratory) à l'université Heriot-Watt. Il utilise la technique de lancer de rayons pour modéliser la propagation et considère une réflexion Lambertienne [Fol96] pour le champ rétrodiffusé. Ce simulateur donne des images réalistes et prend en compte plusieurs phénomènes physiques (fonds marins réalistes, trajets multiples, célérité variable, directivité de l'émetteur et du récepteur, mouvement du sonar, etc.). Il est possible d'utiliser ce simulateur dans une configuration mono ou bistatique. Il est l'un des quelques simulateurs qui modélisent un environnement stratifié pour prendre compte de la variation de la célérité. Il utilise les fractales pour générer des scènes de fonds marins réalistes et modélise des objets simples à l'aide de leurs définitions mathématiques. Une méthode déterministe qui ne garde que la réflexion spéculaire pour calculer la contribution des trajets multiples a été utilisée. Ce simulateur a été étendu plus tard dans un projet de recherche entre DERA (Defense Evaluation and Research Agency), qui est devenue QINETIQ, et l'EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council). Il existe aussi une autre méthode qui est utilisée pour la synthèse d'images en optique et qui est extrêmement rapide par rapport au lancer de rayons, c'est la rasterisation. Toutefois, elle consiste tout simplement au calcul de la correspondance (mapping) entre la géométrie de la scène et celle de l'image (pixels). Cette méthode consiste à décomposer la scène en des petits patchs (éléments géométriques) qui sont traités indépendamment. Cela permet une synthèse d'images rapide, bien que les effets de l'interaction entre les différents patchs (par exemple : objets miroirs) soient compliqués à simuler. L'avantage majeur de cette technique est le fait que le calcul est accompli par le GPU (Graphical Processing Units) aujourd'hui inclus dans la plupart des ordinateurs et qui accélère énormément le traitement.

Le NURC travaille sur une implémentation du modèle SIGMAS basée sur un GPU afin d'accomplir une exécution plus rapide.

Dans l'acoustique sous marine, le phénomène d'ombre donne des informations importantes en termes de position d'un objet par rapport à la source (sonar) ainsi que la taille et la forme de cet objet. C'est pourquoi le recours au lancer de rayons, même si c'est une alternative plus complexe en terme de temps de calcul, est plus courant dans la simulation des images sonar.

D'autres modèles de simulation, qui utilisent la technique de lancer de rayons, ont été développés récemment : le KiwiSAS en 2006 [Hun06] et le modèle développé en 2005 par l'université de Limerick en Irlande [RTF05]. Ce dernier est similaire au modèle de Bell puisqu'il utilise aussi le modèle de Jackson pour la rétrodiffusion du fond [MJ89].

Gueriot [GSG07] a implémenté une plateforme de simulation qui utilise des tubes au lieu des rayons pour garder l'historique de propagation des ondes. L'objectif principal de son simulateur est de proposer un environnement logiciel commun pour développer des outils de simulation modulaires. L'utilisateur choisit donc parmi plusieurs familles de composants logiciels pour affiner son environnement de simulation, certains de ces composants logiciels sont relatifs à des propriétés statiques de la scène sous-marine tandis que d'autres sont censés représenter des phénomènes dynamiques.

L'atout majeur de ces différents modèles est leur capacité à générer des résultats rapides et moins coûteuses avec un minimum d'intervention d'un opérateur humain. Il n'existe pas un modèle unique pour simuler les images sonar dans toutes les conditions environnementales, pour toutes les fréquences et les applications visées, c'est pourquoi il faut bien sélectionner la bonne solution parmi les solutions qui ont été proposées.

3.4 Motivations

La modélisation des images sonars est aujourd'hui primordiale dans des domaines comme la classification ou la détection sous-marine. Le modèle peut donc être ajusté et validé selon la configuration des capteurs, la nature du fond et de ses reliefs ainsi que les objets présents dans la colonne d'eau, posés sur le fond ou enfouis. La complexité des simulateurs varie selon l'objectif visé et l'application envisagée.

L'image sonar d'une cible sous marine est généralement formée de deux composantes écho et ombre acoustiques. Dans certaines conditions atypiques (cible enfouie, reliefs importants, falaise, pente, mauvaise résolution, etc.) l'une de ces composantes, ou les deux, peuvent être altérée(s). La classification des cibles sous marines dans les images sonar est généralement basée sur les caractéristiques géométriques et statistiques de l'ombre acoustique. Le résultat d'identification dépend alors de la qualité de segmentation de l'ombre qui peut être difficile dans certaines configurations (rides de sables, etc.). D'autre part, les régions d'ombre correspondent à l'absence du signal rétrodiffusé. En contrepartie, l'écho d'une cible comme cela était démontré par Freedman [Fre62] est un ensemble de signaux rétrodiffusés atténués et retardés dans le temps. L'agencement temporel de ces signaux est contrôlé par la forme de l'objet et de la scène aux alentours. La réponse énergétique quant à elle est fonction du matériau qui compose l'objet, de sa taille et de la propagation (entre l'objet et le sonar, l'objet et le fond et la surface, ou à l'intérieur même de l'objet).

Il existe des modèles de sonars hautes fréquences qui simulent l'ombre acoustique en se basant sur l'approximation de l'optique géométrique. Pour obtenir un modèle complet d'images sonar (ombre et écho) il faut ajouter des échos réalistes. Il n'est pas possible d'avoir une base exhaustive des échos à partir des images sonars réelles donc la solution

est de proposer un modèle d'images sonar complet (fond, ombre et écho) pour tenter d'améliorer la classification des cibles sous marines en utilisant l'information écho.

Pour simuler le mécanisme de formation des images sonar nous avons développé un simulateur qu'on va désigner par SIS (Sonar Image Simulator) qui reproduit le fonctionnement d'un sonar d'imagerie [EQZ⁺11]. L'objectif de ce simulateur est de fournir des images sonar de bonne résolution en modélisant les caractéristiques d'un sonar latéral haute fréquence et la plupart des phénomènes physiques observables en acoustique.

Les modèles sous-jacents au simulateur que nous avons développé sont présentés ci-dessous :

- La loi de Lambert pour modéliser la réverbération du fond.
- Un modèle simplifié de Freedman pour modéliser la rétrodiffusion à partir des cibles.
- Le principe de Huygens pour gérer les discontinuités de surface.
- La technique de lancer de rayons pour modéliser la propagation.
- La technique du “Sonel Mapping” pour gérer les trajets multiples.

3.5 Choix de la technique de modélisation

Ce paragraphe a pour objectif de décrire le modèle que nous avons choisi pour développer notre simulateur d'images sonar (SIS).

Ce simulateur considère un ensemble de phénomènes complexes liés à la formation de l'image sonar, tels que la rétrodiffusion à partir du fond et des objets ainsi que leurs caractéristiques, la propagation multi-trajets, les discontinuités de surface, etc.

La modélisation exacte de l'ensemble des phénomènes physiques est une tâche très complexe qui n'est jamais exhaustive, bien que dans le cadre de la classification on n'ait pas besoin d'une simulation exacte. Un modèle simple peut être suffisant et permet d'obtenir des résultats exploitables dans un traitement orienté reconnaissance des objets, de plus, il permet de gagner considérablement en temps de calcul.

3.5.1 Approche

En haute fréquence, la rétrodiffusion à partir d'un obstacle peut être modélisée par 3 approches, chacune ayant un domaine de validité en fonction de la longueur d'onde et la taille de l'objet [Ton96].

L'optique géométrique, l'optique physique et la théorie géométrique de diffraction [K⁺62] sont des approches fondées sur des principes de diffusion similaires mais se distinguent par les approximations effectuées.

Les lois de l'optique physiques sont admises dans l'acoustique. Cette approximation a

été amplement utilisée pour modéliser le processus de formation de l'écho en acoustique sous-marine et expliquer ainsi le mécanisme de formation des images sonar.

3.5.1.1 Optique géométrique et optique physique

Dans l'optique géométrique, les sources sont considérées ponctuelles et les dimensions d'objets doivent être suffisamment grandes devant la longueur d'onde considérée.

L'optique géométrique n'est pas une réduction simpliste de l'optique ondulatoire mais une approximation qui modélise parfaitement la majorité des phénomènes optiques observables dans la vie de tous les jours [Ris96].

Les lois de l'optique géométrique se résument principalement dans les lois de réfraction et de réflexion. Lorsque le milieu de propagation est supposé rigide l'onde est totalement réfléchi et il n'y a pas de pénétration. Descartes a regroupé l'ensemble des phénomènes optiques observables à son époque, dans un traité intitulé *Dioptrique* (1637). Puis c'est à Fermat que l'on doit le principe d'optique géométrique qui résume les lois de réflexion et de réfraction (1657).

L'optique physique est aussi une approximation haute fréquence. C'est une méthode intermédiaire entre l'optique géométrique, qui ignore les effets ondulatoires, et l'optique ondulatoire qui est une théorie physique exacte. Cette approximation consiste à utiliser les rayons comme dans l'optique géométrique pour estimer la propagation de l'onde. Pour calculer la quantité d'énergie réfléchi et transmise, il faut intégrer la quantité d'énergie élémentaire (de chaque élément de surface) sur toute la surface insonifiée (approche de Freedman, par exemple). En étant en haute fréquence, cette approximation néglige les effets du phénomène de diffraction. En effet, ce phénomène dépend à la fois de l'onde et de l'obstacle, son effet augmente quand le rapport entre la longueur d'onde et la taille de l'obstacle augmente.

À cause de cette hypothèse, cette approximation est d'autant plus correcte lorsque les objets étudiés sont grands devant la longueur d'onde et avec des surfaces lisses (approximation de Kirchhoff). Il faut aussi noter que dans les zones de discontinuités (les arêtes ou les coins) l'approximation devient inexacte. Pour gérer ces discontinuités, nous proposons d'utiliser le principe de Huygens (paragraphe 3.5.1.3).

3.5.1.2 Modèle simplifié de Freedman

Freedman a pu expliquer la plupart des phénomènes de diffraction produits par les corps rigides en haute fréquence (paragraphe 3.2.6.6). Dans la figure 3.8, on présente un exemple illustratif de la rétrodiffusion selon Freedman à partir d'une sphère rigide.

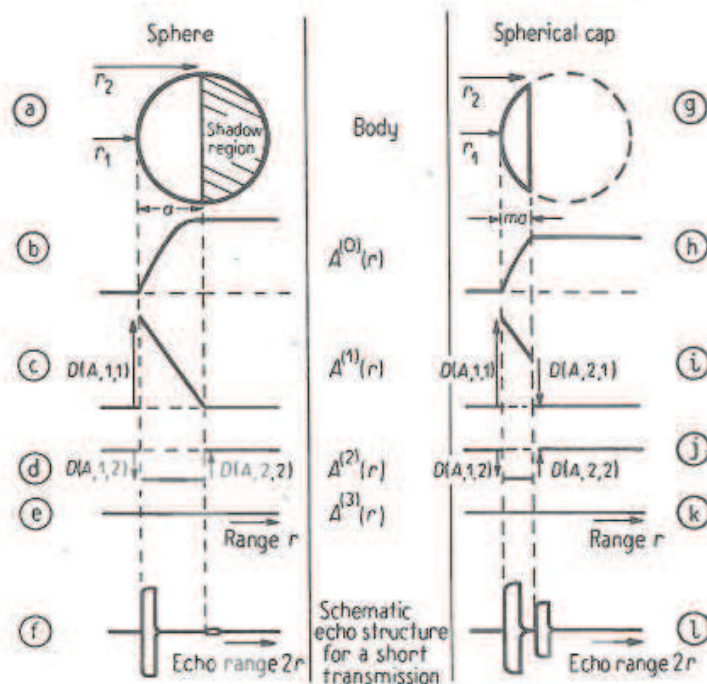


FIGURE 3.8: Mécanisme de formation de l'écho pour une sphère rigide [Fre62]

L'effet de diffraction observé dans le modèle de Freedman n'était pas prédit par la solution exacte de Stenzel pour une sphère rigide [HG06].

Hickling [DH67] a montré que le deuxième écho qui arrive à l'équateur (la dérivée première de la surface d'une sphère) ne provient pas de la diffraction de l'onde à cet endroit mais il est dû à des effets élastiques. Même si Freedman se place dans le cas d'une cible rigide, il n'est pas impossible de voir ces effets d'élastique. En effet, les réponses élastiques proviennent lorsque l'onde est capable de pénétrer et se réfléchir sur la surface interne de la cible (cas des cibles à coque fine) mais aussi à cause des ondes rampantes [Rud69] qui entourent la cible et arrivent après une période relativement longue par rapport à la première réponse.

Pour avoir la réponse d'une cible rigide nous allons utiliser une version simplifiée du modèle de Freedman où nous ne gardons que le premier terme de l'équation 3.22 et nous négligeons les dérivées d'ordre supérieur.

En utilisant cette simplification, on retrouve exactement le modèle de Kirchhoff [Ker94]. En effet, il est possible de montrer mathématiquement que la partie spéculaire de la réponse d'une cible donnée par le modèle de Freedman est la même que celle donnée par le modèle de Kirchhoff [HG06].

L'expression de l'écho E renvoyé par une cible de surface S placée à une distance D est donnée par l'équation 3.23 :

$$E = \frac{-j}{\lambda} \exp(jwt) \int \int_S D_E(D, \varphi) D_R(D, \varphi) \cos\theta / D^2 \exp(-2jk \cdot D) dS \quad (3.23)$$

où D_E et D_R sont les directivités du transducteur pour l'émission et la réception, (D, φ) est la position d'un point de la surface S , k est le vecteur d'onde, w la pulsation, λ la longueur d'onde et θ l'angle que fait l'onde incidente avec la normale à dS en (D, φ) .

En réalité, la structure de l'écho peut devenir complexe en présence des trajets multiples. A l'origine, l'approche de Freedman a été conçue pour prédire les effets de ce phénomène. La technique de lancer de rayons (paragraphe 3.2.5.1) peut prendre compte des trajets multiples en associant à chaque interaction avec la scène une nouvelle source mais la complexité de calcul est une préoccupation. Pour calculer la contribution de ces trajets, nous proposons d'utiliser une méthode stochastique appelé "Sonel Mapping" (paragraphe 3.6.1.4).

3.5.1.3 Principe de Huygens

Le principe de Huygens s'énonce comme suit : Chaque point d'une surface d'onde S_0 atteinte par la lumière à un instant t_0 peut être considéré comme une source secondaire qui émet des ondelettes sphériques. A un instant t postérieur à t_0 , la surface d'onde S est l'enveloppe des surfaces d'ondes émises par les sources secondaires convenablement réparties sur S_0 [MC97].

Le principe de Huygens a été généralement utilisé pour décrire les discontinuités de surface d'une manière simple et efficace.

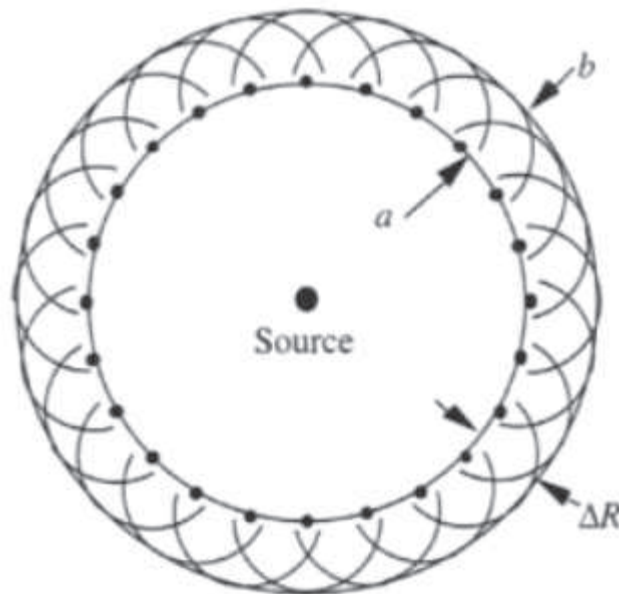


FIGURE 3.9: Principe de Huygens : l'onde se propage de a vers b [MC97]

3.5.2 Hypothèses et Approximations

Le modèle proposé est globalement fondé sur l'hypothèse d'une faible longueur d'onde par rapport à la taille des objets (HF). Ceci permet de ne tenir compte que de la partie rigide de la réponse acoustique.

Du fait de son caractère physiquement intuitif, et de ses facilités pratiques de mise en oeuvre, nous avons choisi la technique de lancer de rayons, comme la plupart des applications de l'acoustique sous marine [Lur98], pour modéliser la propagation.

La théorie de rayons est dérivée de la séparation de la composante amplitude et phase dans l'équation de Helmholtz en appliquant l'approximation de l'optique géométrique. Elle est fondée sur le postulat que les rayons sont en tous points perpendiculaires au front d'onde et décrivent ainsi la propagation du son dans l'espace. Cela suppose que l'amplitude varie plus lentement que la phase en fonction de la position [BL97]. Ceci limite la méthode des rayons au domaine de hautes fréquences puisque les conditions physiques qui régissent cette approximation sont les suivantes :

- *Condition 1* : La courbure d'un rayon sur une longueur d'onde doit être petite.
 - *Condition 2* : La variation de la vitesse du son doit être petite sur une longueur d'onde.
- Avant de détailler le modèle et afin de développer un modèle réaliste mais aussi rapide, quelques hypothèses doivent être fixées. Ces simplifications sont liées au traitement dans la colonne d'eau ainsi que la taille et la directivité des antennes.
- *Hyp 1 (iso-vélocité)* : La célérité du son dans la colonne d'eau est supposée constante. Ce qui signifie que les rayons vont être des lignes droites. Nous avons montré dans la paragraphe 3.2.4 l'impact réel de cette hypothèse sur les images sonar. En effet, localement autour de la cible (la zone qui nous intéresse) le changement de célérité n'a pas d'effet sur l'image finale.
 - *Hyp 2 (source ponctuelle)* : Le sonar est supposé constitué d'un seul transducteur ponctuel.
 - *Hyp 3* : Le bruit électronique du sonar ainsi que les réverbérations du volume et de la surface sont négligés.
 - *Hyp 4 (directivité en réception)* : L'ouverture horizontale du lobe en réception est petite. Il en résulte une insonification d'une ligne étroite du fond perpendiculaire au trajet du sonar. Le résultat de cette hypothèse se manifeste par l'absence des lobes secondaires.

Nous avons aussi considéré une scène discrétisée en facettes triangulaires. Chacune des facettes est définie par trois points et un vecteur normal. Nous avons choisi des facettes triangulaires puisqu'il est possible de décomposer toutes les surfaces en un ensemble continu de triangles [Fol96]. Nous avons considéré la configuration d'un sonar qui se

déplace discrètement dans la direction perpendiculaire à l'axe de l'émission et forme un canal hautement directionnel. La scène est donc explorée par secteur. La même méthode est employée dans toutes les directions perpendiculaires au sens du déplacement du sonar et pourra ainsi s'adapter à toutes les géométries sonar (latéral, de sédiment, sondeur, etc.). Dans la littérature deux primitives sont généralement utilisées : points ou facettes. Par exemple, SIMONA [Gro06] utilise une représentation en points pour la scène, par contre SWAT [SCL94] et le modèle de rétrodiffusion de Bell [Bel95], quant à eux, utilisent des facettes respectivement rectangulaires et triangulaires. Pour les surfaces lisses le modèle en facettes est plus adapté que le modèle de points. Le modèle de points rapproche les surfaces par un grand nombre de points infinitésimaux, un tel grand nombre des primitives peut provoquer des problèmes de calcul. D'autre part, il est moins physique que le modèle de facettes. Cependant, l'efficacité de deux représentations est comparable pour des surfaces rugueuses. Il est donc plus approprié d'utiliser des facettes rugueuses au lieu des facettes lisses. Pour une surface rugueuse, cela se traduit par moins de primitives et une efficacité meilleure [Hun06]. C'est cette représentation que nous avons choisi pour modéliser les surfaces.

Dans ce travail, où la simulation est un outil pour montrer l'apport de l'information écho dans la classification des mines sous-marines, ces hypothèses sont suffisantes pour fournir des images sonar de qualité acceptable.

3.5.3 Le lancer de rayons optiques

La technique de lancer de rayons est bien connue dans le milieu de la synthèse d'image simulant le parcours inverse de la lumière. Les rayons de la lumière sont suivis à travers l'ensemble de leurs réflexions et réfractions jusqu'à ce qu'une image se construise.

La simulation du parcours d'un rayon se fait dans le sens inverse puisque dans la réalité, les rayons de lumière partent des sources lumineuses et se dirigent vers notre oeil, mais la majorité des rayons ne nous parviennent pas et ne contribuent pas à la synthèse de l'image.

Le suivi des rayons depuis notre oeil vers les sources lumineuses correspond donc à l'inverse du sens physique mais c'est celui-ci qui est utilisé en tant que sens normal en lancer de rayons afin d'optimiser la vitesse de calcul (puisque les rayons émis par la source lumineuse et qui n'atteignent pas l'observateur sont très nombreux). En effet, Ris [Ris96] a montré que cette manière de procéder est nettement plus performante dans la plupart des cas. Le lancer de rayons [Whi05][CPC84] est la technique la plus intuitive qui soit, puisque l'on va suivre le trajet des rayons lumineux en respectant les lois de Descartes pour les réfractions et les réflexions [Dey02].

Cette technique est très utilisée en synthèse d'images grâce à ses atouts en termes de

facilité de mise en oeuvre et sa capacité à produire des images réalistes. C'est une méthode qui intègre plusieurs aspects (interaction lumière/objet, projection 3D/2D, faces cachées, etc.). Cependant, elle nécessite beaucoup de calculs ce qui rend son utilisation impossible pour des applications temps réel ou pour faire des animations. Pour la plupart des images, l'utilisation de lancer de rayons est utile principalement pour introduire des effets d'optique tels que l'ombre, réflexion (effet miroir), réfraction, effet "chrome" et brillant, caustiques, etc. Le principe de cette méthode consiste à lancer un rayon depuis le point de vue (la caméra) dans la scène 3D d'une façon récursive pour chaque pixel de l'image. Le premier objet qui intercepte ce rayon définit donc l'objet concerné par le pixel correspondant. Ensuite, en partant du premier point d'intersection des nouveaux rayons sont lancés en direction de chaque source de lumière pour déterminer si l'objet est éclairé ou bien dans l'ombre d'autres objets et en déduire sa luminosité.

Et pour déterminer la couleur finale du pixel d'autres informations sur la géométrie de la scène (angles entre la normale à l'objet et les sources de lumière, réflexions, transparence, etc.) et les propriétés de la surface (sa couleur, sa rugosité, etc.) de l'objet sont combinées avec la valeur de la luminosité.

3.5.4 Différences entre images optiques et images sonar

Dans ce travail, l'onde sonore est également considérée comme étant "un ensemble de rayons" et ces rayons sont calculés de la même manière, construisant ainsi une image sonar.

Le facteur commun entre le modèle développé dans cette thèse et le lancer de rayons optiques est l'application du principe de base de la théorie des rayons pour créer des images synthétiques des scènes. Cependant, les différences qui existent entre les images sonar et les images optiques empêchent l'application directe de cette méthode dans le domaine de l'acoustique [Bel95]. En effet, en acoustique nous avons une seule source d'énergie (le sonar) contrairement à l'optique où plusieurs sources lumineuses sont présentes. Les caractéristiques de propagation de l'onde acoustique rendent impossible de considérer que les trajets de rayons sont rectilignes. Ceci est dû au phénomène de réfraction du rayon acoustique selon la bathycélérimétrie tout au long du trajet. D'autres différences par rapport au lancer de rayons dans le domaine de l'optique ont été évoquées par Daniel [DGM98] à savoir les différences fondamentales entre les propriétés de la lumière et du son qui induisent des méthodes de génération d'images différentes. En fait, dans un lancer de rayons optiques le rayon est émis à travers un pixel vers la scène. Donc, le pixel qui subira la contribution de l'intersection des rayons est connu alors qu'en acoustique il est impossible de connaître le pixel ou les pixels qui vont subir la contribution d'un certain rayon avant que l'intersection avec la scène ne se produise. Ceci est dû au phénomène de

concentration des rayons dans certains endroits lorsque les rayons se courbent suite aux réfractions dans le cas où la vitesse du son ne peut pas être considérée constante dans la colonne d'eau. Une autre différence fondamentale entre les images optiques et les images sonar est la façon avec laquelle les données sont présentées : dans le domaine spatial pour le premier cas et dans le domaine temporel pour le deuxième. En effet, l'image sonar reflète l'énergie retournée en fonction du temps d'aller-retour nécessaire pour que l'onde émise parcoure le trajet Sonar/fond/Sonar. A chaque impulsion d'onde émise correspond une ligne de l'image totale qui est constituée ligne par ligne pour un sonar latéral. Ceci nécessite donc un lancer explicite des rayons pour pouvoir connaître le (ou les) pixel(s) qui subira (subiront) la contribution du rayon. De plus, un pixel de l'image (cellule temporelle) peut parfois recevoir la contribution d'un seul rayon, de plusieurs rayons (cas de trajets multiples) ou d'aucun rayon. Ce dernier cas permet de définir l'ombre acoustique. Pour éviter l'apparition de ce phénomène, un ajustement s'impose entre le nombre des rayons lancés et le nombre des cellules temporelles qui seront influencées par le signal retourné.

3.6 Description du modèle

3.6.1 Modèle de la propagation

3.6.1.1 Lancer de rayons acoustiques

Le modèle de propagation utilisé dans notre simulateur (SIS : Sonar Image Simulator) est basé sur l'approximation des rayons en haute fréquence. Dans ce paragraphe, l'implémentation pratique du lancer de rayons est présentée. Chaque récurrence sonar est représentée par un ensemble de rayons orthogonaux au front d'onde du signal émis. Ces rayons sont lancés à travers l'espace tridimensionnel selon des angles fixés (en partant de la position du transducteur à l'instant $t = 0$) vers la scène. La visibilité des diffuseurs (les facettes) est déterminée par le calcul de l'intersection entre les rayons et chaque facette. La trajectoire de chaque rayon est déterminée et le temps d'aller-retour (la distance objet-sonar) ainsi que l'intensité du signal rétrodiffusé sont calculés. Ce sont ces deux valeurs qui sont utilisées pour générer une ligne de l'image (suivant l'axe des distances).

3.6.1.2 Propagation multi-trajets

Les trajets multiples jouent un rôle important dans la structure de l'écho pour les objets placés à proximité des interfaces (eau-sédiment ou eau-air) à cause des rayons qui touchent à la fois l'objet et le fond ou la surface de la mer (paragraphe 2.3.4.4).

Les échos des objets placés près du fond sont différents en forme et en amplitude des échos des mêmes objets placés dans la colonne d'eau. Ces effets sont connus sous le nom des effets de multi-trajets. Différentes solutions ont été proposées pour modéliser ces effets ; la plus simple est de supposer que le fond est réfléchissant et plat [Ker94]. Dans cette méthode le seul trajet considéré en plus du trajet direct (à partir du sonar vers l'objet et de nouveau vers le sonar) est la direction spéculaire avec différents niveaux de réflexion. Cette méthode ne considère pas les rayons qui touchent l'objet plus qu'une fois puisque les réflexions spéculaires qui lui sont associées sur le fond sont très rasantes d'où les coefficients de réflexion seront faibles et l'auteur de [Ker94] suppose que leur contribution est négligeable. Seulement quatre types de trajets sont retenus puisque supposés importants (trajet direct, trajets avec une seule réflexion sur le fond et les trajets avec deux réflexions sur le fond). Groen, quant à lui, a pris en compte la contribution des trajets multiples avec le fond et la surface de la mer dans le simulateur SIMONA [Gro06]. Ces deux interfaces sont considérées comme deux miroirs parfaitement réfléchissants. Sur les images obtenues à l'aide de ce simulateur, l'intensité du deuxième écho est supérieure à l'intensité du premier trajet direct. Ce résultat se justifie par l'accumulation de deux réponses exactement en phase comme par exemple le chemin source-fond-cible et le chemin source-cible-fond qui donnent un seul trajet et par conséquent la même réponse qui se double. L'intensité du second écho pourrait être plus élevée lorsque seules les réflexions spéculaires sont traitées en raison de cette double contribution du même trajet. La méthode des images [KFCS99] a aussi été utilisée pour modéliser l'effet de multi-trajets à partir d'une surface lisse de la mer, correspondant à des conditions météorologiques calmes. Cependant, dans le cas des surfaces rugueuses, correspondant à une mer agitée, la technique de lancer de rayons récursive est utilisée.

Une illustration de la propagation multi-trajets entre un objet et le fond est donnée par la figure 3.10

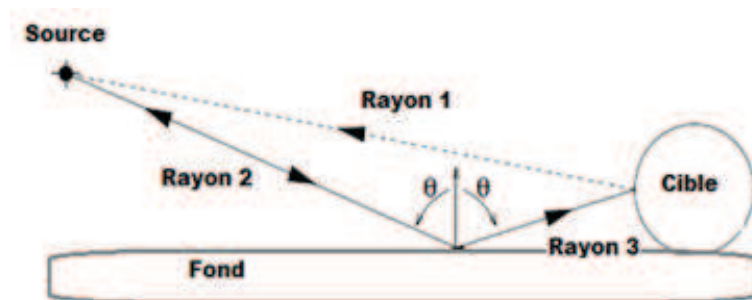


FIGURE 3.10: Phénomène de multi-trajets

La méthode de lancer de rayons récursive est employée pour modéliser les rétrodiffusions d'ordre supérieur. Elle consiste à lancer des rayons à partir de chacun des diffuseurs visibles vers les autres diffuseurs dans la scène. Les rayons sont ensuite lancés à partir

de chaque nouveau diffuseur visible (par rapport aux sources secondaires) vers le sonar [Fol96]. Cette méthode récursive a un coût de calcul très élevé de l'ordre de N^M opérations nécessaires pour une scène de N diffuseurs et M niveaux de rétrodiffusions multiples.

Il existe des méthodes plus simples qui consistent à tracer le rayon uniquement dans la direction spéculaire pour déterminer s'il rencontre la scène dans un autre endroit, après une première interaction [Bel95]. La procédure est ensuite répétée itérativement pour chaque rayon. La solution exacte pour modéliser les trajets multiples consiste à lancer plusieurs rayons à chaque point d'intersection. Par contre, un rayon incident peut être réfléchi dans la direction spéculaire ou diffuse, réfracté (transmis) ou diffracté. Le temps de calcul pour traiter exhaustivement tous ces rayons est trop élevé pour l'intégrer en classification automatique. Il faut donc trouver un compromis pour modéliser un maximum de phénomènes physiques liés aux trajets multiples en gardant le temps de calcul raisonnable.

Au lieu d'utiliser des telles approches déterministes et suivre tous les rayons générés jusqu'à ce qu'ils quittent la scène ou que leurs énergies deviennent suffisamment faibles d'une manière qu'ils ne puissent plus contribuer à la réponse acoustique, nous proposons une technique probabiliste.

Pour modéliser la propagation multi-trajets et les effets de diffraction, nous proposons d'utiliser une méthode stochastique pour sélectionner un seul type d'interaction entre le rayon et les surfaces parmi l'ensemble des interactions possibles. C'est le "Sonel Mapping" qui est une méthode de type Monte Carlo basée sur la stratégie de "Roulette Russe" [HHW65] utilisée jusqu'à maintenant que dans l'acoustique aérienne (in Room) pour modéliser des environnements complexes. Grâce à cette méthode les trajets des rayons acoustiques sont maintenues de taille raisonnable tout en permettant l'exploration des trajets de tailles arbitraires [KJM08].

L'autre problème auquel les approches déterministes sont confrontées est la manière de mettre fin au rayon acoustique. Une des solutions proposées est basée sur le nombre de réflexions que subit le rayon. Le rayon se termine quand il atteint un seuil de nombre de réflexions. Une autre solution plus fondée, consiste à évaluer la quantité d'énergie perdue après chaque interaction entre le rayon et la scène [Bel95]. Intuitivement, la deuxième solution est plus représentative de la réalité. En effet, la fin d'un rayon est fonction de la quantité d'énergie qu'il contient et non pas du nombre de réflexions qu'il a subit.

3.6.1.3 Méthode du "Photon mapping" dans l'optique (H.W.Jensen)

Le "photon (élément de lumière) mapping" est une méthode probabiliste basée sur une représentation en corpuscules de la lumière. Elle est développée par Jensen en 1995 [Jen95]

afin de déterminer l'illumination dans n'importe quel point de la scène.

Les images obtenues sont plus réalistes avec des effets de caustiques, réflexion diffuse et spéculaire grâce à un algorithme en deux étapes.

- 1^{ère} étape : les photons sont émis à partir de chaque source de lumière et transitent à travers la scène jusqu'à leur interaction avec une surface. Quand un photon rencontre une surface de diffusion, il sera sauvegardé dans une structure nommée "photon map".
- 2^{ème} étape : La scène est affichée en utilisant l'information fournie par le "photon map" collectée dans la 1^{ère} étape afin d'obtenir une estimation rapide de l'éclairage diffus.

La distribution des rayons tracés est utilisée pour modéliser les effets spéculaires.

Il a été démontré par Jensen [Jen95] que le "photon mapping" permet de calculer l'éclairage des scènes complexes puisqu'elle est indépendante de la géométrie de la scène. Cette méthode est capable de gérer des interactions complexes entre la lumière et la surface y compris les réflexions spéculaires et diffuses ainsi que les effets de brillance et toutes combinaisons entre eux. Une illustration est montrée sur la figure 3.11.

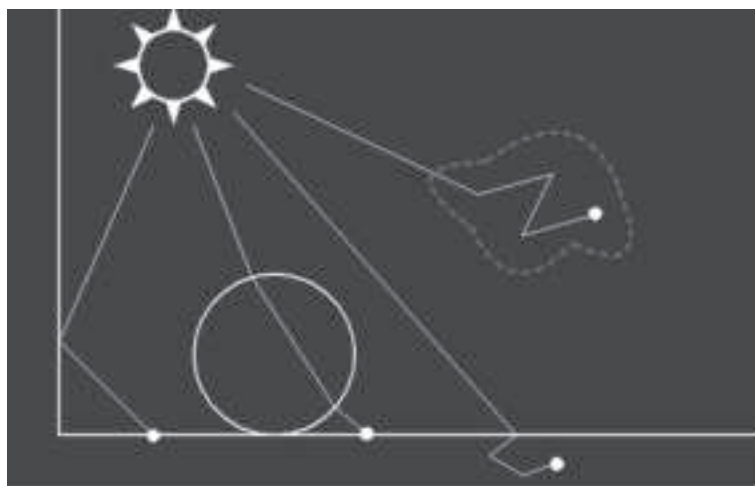


FIGURE 3.11: Illustration du "photon mapping" de ZACK WATERS

3.6.1.4 Méthode du "Sonel Mapping" dans l'acoustique des salles

Le problème des trajets multiples est bien connu dans l'acoustique aérienne, notamment l'acoustique des salles. La méthode de "Sonel mapping" est une application de la méthode de l'optique "photon Mapping" à l'auralisation (technique qui permet de synthétiser la réponse acoustique d'une salle). C'est une méthode de modélisation acoustique capable de modéliser les réflexions spéculaires et diffuses, la réfraction, l'absorption et la diffraction dans une manière simple [KJM04], en utilisant une technique stochastique pour enlever les "sonels" (rayons) moins importants et focaliser l'effort sur les "sonels" importants.

Cette technique stochastique est inspirée de la Roulette Russe mais adaptée à une règle de

sélection [KJM05b]. Un seul type d'interaction sera sélectionné d'une façon probabiliste en se basant sur les caractéristiques de la surface (les coefficients de réflectivité spéculaire et diffuse et le coefficient d'absorption).

Comme le "photon mapping", le "Sonel Mapping" est composé de deux étapes : tracer les rayons puis les afficher [KJM08].

3.6.1.5 "Roulette Russe" adaptée

Lorsqu'un rayon rencontre une surface à un point, une vérification est effectuée pour déterminer si le point incident est dans une zone de diffraction ou non.

Lorsque le rayon incident ne tombe pas dans une zone de diffraction, il sera soit réfléchi dans la direction spéculaire, diffusé ou complètement absorbé par la surface. La décision sur le type de l'interaction à modéliser est donnée par la valeur d'un nombre aléatoire uniformément distribué $\xi \in [0, 1]$ comme suit :

$$\begin{aligned} \xi \in [0, \delta] &: \text{diffusion} \\ \xi \in [\delta, \delta + \chi] &: \text{réflexion spéculaire} \\ \xi \in [\delta + \chi, 1] &: \text{absorption} \end{aligned}$$

χ et δ sont les coefficients de réflexion, respectivement, spéculaire et diffuse (fonction de la fréquence).

3.6.1.6 Méthode du "Sonel Mapping" dans l'acoustique sous marine

Le SIS utilise une version modifiée du "Sonel Mapping". Le but de ces modifications est d'améliorer l'adéquation de la méthode à l'acoustique sous marine et à la configuration choisie.

La première modification consiste à réduire les deux étapes en une seule puisque nous considérons une configuration monostatique dans ce simulateur. La deuxième modification qui est aussi liée à la configuration monostatique est la méthode utilisée pour modéliser la diffraction. Dans notre cas nous utilisons le principe de Huygens puisque l'émetteur et le récepteur sont confondus. La méthode originale traite ce problème comme suit : Dans le cas où le rayon incident tombe dans une zone de diffraction (arrête ou un coin), deux alternatives se présentent : un nouveau rayon est généré et émis en choisissant une direction aléatoire dans l'hémisphère centré autour du point d'impact ou bien le rayon sera transmis à travers la zone de diffraction sans modification. Le choix parmi ces deux alternatives est aussi déterminé d'une façon stochastique en se basant sur un nombre aléatoire uniformément distribué et les caractéristiques de la surface (dimension)

et du rayon (fréquence). La direction et la quantité d'énergie de l'onde diffractée sont calculées en utilisant le principe de Huygens-Fresnel modifié [KJM05a].

La troisième modification concerne à nouveau le traitement quand le rayon rencontre une arête ou un coin : la méthode originale sélectionne une seule direction dans l'hémisphère autour du point d'interaction. Ceci risque de trop limiter les effets de diffraction, c'est pourquoi le SIS trace des nouveaux rayons dans plusieurs directions.

La quatrième modification concerne la manière avec laquelle le rayon sera terminé. La méthode originale utilise l'approche stochastique pour décider quand le rayon sera terminé, alors que les méthodes déterministes utilisent un autre critère. Le critère qui a été utilisé dans le simulateur de Bell [Bel95] consiste à terminer le rayon (le signal) quand la perte d'énergie dépasse un seuil (40 dB). Il semble que cette alternative est plus représentative du phénomène réel.

- **Réflexion spéculaire**

Si l'interaction est supposée spéculaire, le rayon est réfléchi dans la direction spéculaire.

L'angle selon lequel le rayon est réfléchi est égal à l'angle d'incidence (figure 3.12).

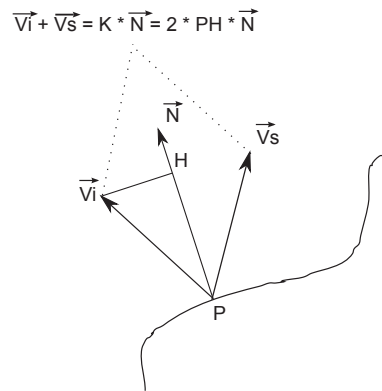


FIGURE 3.12: Réflexion spéculaire

Considérant \vec{N} la normale à la surface et v_i la direction de l'onde incidente, v_s la direction spéculaire est donnée par (3.24) :

$$v_s = 2(v_i \cdot \vec{N})\vec{N} - v_i \quad (3.24)$$

Chaque rayon est identifié par deux principaux paramètres : Le point source (le dernier point d'interaction), et la distance totale parcourue. Ces deux paramètres sont mis à jour à chaque interaction avec la scène. La distance totale parcourue est calculée en ajoutant à la distance courante du rayon la distance parcourue entre le dernier point d'interaction et le point d'interaction en cours.

- **Réflexion diffuse**

Si la valeur de ξ prévoit une réflexion diffuse pour un rayon, celui-ci est sauvegardé tandis qu'un nouveau rayon est généré et diffusé. La réflexion est supposée Lambertienne et la direction de réflexion est sélectionnée aléatoirement dans l'hémisphère qui entoure le point d'impact. Cette direction est sélectionnée proportionnellement au cosinus de l'angle par rapport à la normale à la surface (figure 3.13).

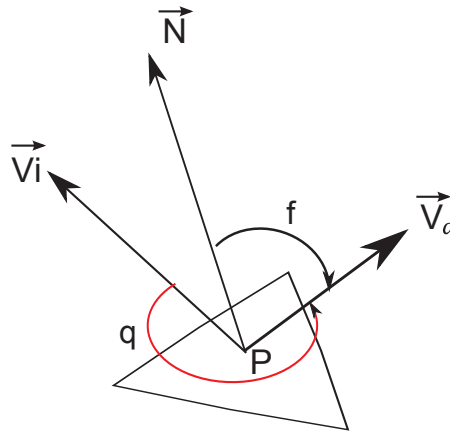


FIGURE 3.13: Réflexion diffuse

Deux nombres aléatoires uniformément distribués $r_1 \in [0, 1]$ et $r_2 \in [0, 1]$ sont générés. La direction de réflexion V_d sera aléatoire [Dut01] et ses coordonnées polaires (q, f) sont données par (3.25) :

$$V_d(q, f) = (2\pi r_1, \cos^{-1}(\sqrt{r_2})) \quad (3.25)$$

q est l'angle de rotation autour de la normale à la surface et f est l'angle par rapport à la normale.

- **Absorption**

Suivant le modèle stochastique, si l'interaction sélectionnée est l'absorption, le rayon est donc terminé. C'est insuffisant ici.

Afin de trouver un compromis entre la modélisation du phénomène physique et l'optimisation du temps de calcul, nous avons choisi de combiner les critères énergétique [Bel95] et stochastique de terminaison d'un rayon [KJM08]. Notre objectif est d'exploiter les avantages de chacun. En fait, le critère énergétique est utilisé pour modéliser avec précision la première partie et la plus importante de la réponse impulsionnelle alors que le critère stochastique (Roulette Russe) est utilisé pour modéliser la dernière partie, car cette partie est généralement approximée à un bruit qui diminue de façon exponentielle [FG82].

- **Discontinuités de la surface**

Afin de modéliser les effets de discontinuité, nous utilisons le principe de Huygens (paragraphe 3.5.1.3) que nous intégrons dans la méthode du “Sonel Mapping”.

Le principe de Huygens suppose que l’onde se propage de proche en proche. Chaque point atteint par l’onde se comporte comme une source secondaire qui émet une ondelette sphérique ayant l’amplitude et la phase de celle de l’onde incidente, dont la somme reconstitue l’onde réelle [MC97].

Nous utilisons un maillage triangulaire pour modéliser la scène. Les arêtes et les points du maillage ne sont pas tous diffractants. Nous pouvons rencontrer deux types d’arêtes, les arêtes vives qui sont de vraies discontinuités de la cible ou du fond, et les arêtes dues au maillage des surfaces courbées. Afin de pouvoir dire que nous sommes face à une vraie discontinuité de la cible, nous devons éliminer les arêtes dues au maillage des surfaces courbées en imposant un angle seuil entre deux facettes adjacentes. En effet, pour chaque arête on cherche l’angle entre les normales des deux facettes. Si cet angle est inférieur à un angle seuil empiriquement fixé, alors nous sommes face à une discontinuité due au maillage. Dans le cas contraire, nous sommes bien dans le cas d’une arête diffractante [Ben12]. D’une manière similaire, on définit par un coin tout point du maillage qui appartient à une ou plusieurs arêtes diffractantes. Ces situations sont illustrées sur la figure 3.14.

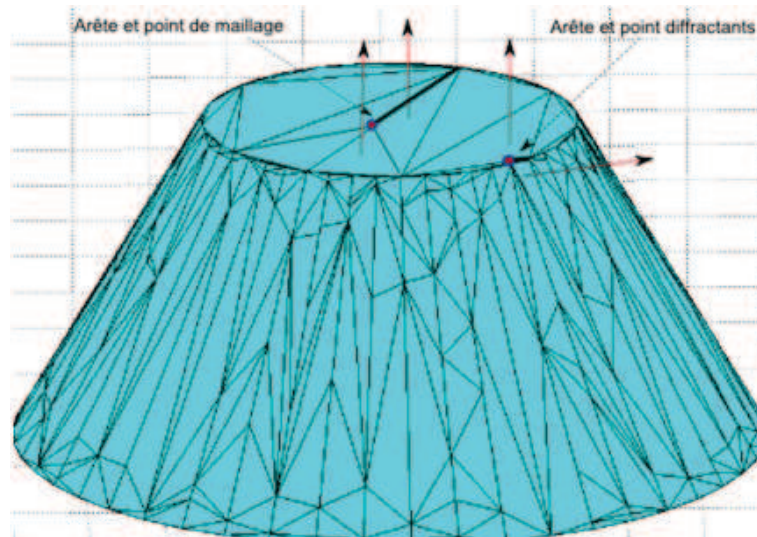


FIGURE 3.14: Exemple d’une arête diffractante et d’un coin dans un modèle géométrique d’une mine Manta

En se basant sur ce principe et en se plaçant dans les conditions du champ lointain (Fraunhofer), nous considérons que la propagation de l’onde diffractée est sphérique (3.4). La pression de l’onde diffractée par chacune des discontinuités dans n’importe quelle direction et à un instant t est donnée par la formule 3.26 :

$$p(D, t) = \frac{p_i}{4\pi D} \exp(j(\omega t - kD)) \quad (3.26)$$

Avec k le nombre d'onde, $\omega = 2\pi f$ la vitesse angulaire (pulsation) du signal et D la distance parcourue pendant la période du temps t et p_i la pression de référence pris à la distance de référence ($1m$) du point source secondaire.

Les directions de propagation des rayons sont choisies aléatoirement autour du point d'impact par la même formule 3.25.

3.6.1.7 Bilan de la technique des trajets multiples en SIS

En tenant compte de tous les ajustements proposés dans le paragraphe 3.6.1.4, la nouvelle technique basée sur le “Sonel Mapping” est présentée par la figure 3.15.

Après les modifications apportées à la méthode originale, la décision sur le type de l'interaction à modéliser est maintenant donnée par la valeur d'un nombre aléatoire ξ uniformément distribué comme suit :

$0 \leq \xi < \delta$: Réflexion diffuse

$\delta \leq \xi \leq 1$: Réflexion spéculaire

δ est le coefficient de réflexion diffuse de la surface.

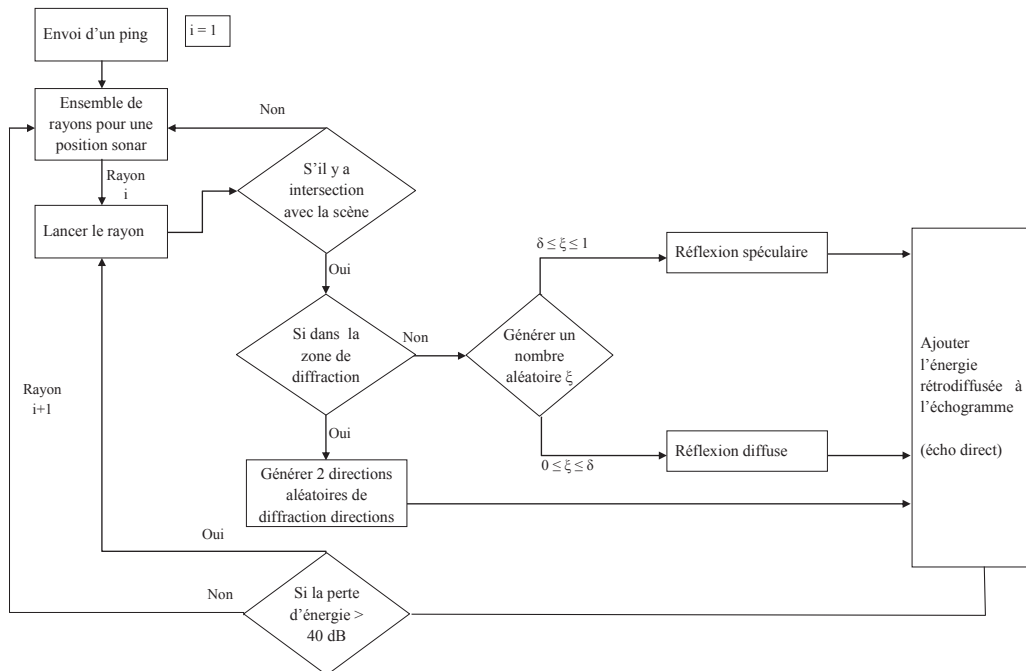


FIGURE 3.15: Diagramme en bloc du modèle de propagation de SIS

3.6.2 Modèle de rétrodiffusion des cibles

Une fois que l'onde atteint un obstacle, une partie de l'énergie est rétrodiffusée vers le transducteur. Lord Rayleigh [SRL45] était le premier à travailler sur la rétrodiffusion de l'onde sonore par une sphère rigide de rayon petit devant la longueur d'onde. Plus tard, Freedman [Fre62] a donné une explication du mécanisme selon lequel l'écho est formé pour les hautes fréquences (paragraphe 3.2.6.6).

En utilisant le modèle simplifié de Freedman (paragraphe 3.5.1.2), le signal rétrodiffusé peut être écrit sous la forme d'une fonction analytique du temps. Chaque impulsion sera placée à l'échantillon temporel correspondant avec une phase et une atténuation propres. La pression du signal rétrodiffusé est, donc, formulée comme suit (3.27) :

$$p_{cible}(t) = -TLn.C.jE_0 \exp(j(2\pi ft - 2kD)).rect(t, T_{ar}, T_{pulse}) \quad (3.27)$$

T_{ar} : Le temps d'aller-retour qui égal à $2D/c$

$rect$: Fonction rectangle qui vaut 1 sur la période T_{pulse} à partir de $t = T_{ar}$ et 0 sinon

E_0 : Niveau du signal émis

k : Nombre d'onde

D : Distance entre la cible et la source

TLn : Atténuation totale subie par le signal lors de sa propagation

C : L'indice de rétrodiffusion d'une surface finie démontré par Kerr [Ker51] dans l'électromagnétique et validé par Urick [Uri83] pour l'acoustique.

Dans la formule 3.23, cet indice substitue le facteur $\cos(\theta)dS/\lambda$ qui correspond à l'indice de rétrodiffusion à partir d'un élément de surface dS . Dans notre modèle, nous avons choisi d'ajuster cet indice en utilisant celui d'une facette triangulaire [Uri83].

L'indice de rétrodiffusion de n'importe quelle surface rectangulaire finie qui forme un angle θ avec l'onde incidente est la suivante :

$$C = \cos(\theta)ab/\lambda(\sin(\beta)/\beta) \quad (3.28)$$

$$\beta = ka \sin(\theta) \quad (3.29)$$

a et b : Les arêtes du rectangle avec a la plus petite

θ : Angle d'incidence

λ : Longueur d'onde

k : Nombre d'onde

Par analogie, pour une surface triangulaire finie cet indice devient :

$$C = \cos(\theta)A/\lambda(\sin(\beta)/\beta) \quad (3.30)$$

A : L'aire de la surface triangulaire par analogie à ab l'aire de la facette rectangulaire
 Les pertes par propagation en valeurs naturelles TLn sont déduites à partir de l'équation du sonar 2.2 :

$$TLn = 10^{-TL/10} = 10^{(-10\log_{10}D - \alpha D)/10} = \frac{1}{D} \cdot 10^{-\alpha D/10} \quad (3.31)$$

α : Atténuation due à l'absorption dans la colonne d'eau obtenue par l'équation donnée par François et Garisson ($10^{-3} \cdot dB \cdot km^{-1}$) [FG82].

En plus des pertes par diffusion et par absorption, il existe aussi une perte d'énergie due à la diffusion par les inhomogénéités dans la colonne d'eau. Cette perte est à présent négligée et nous considérons seulement les pertes déterministes par propagation qui sont les principales causes de perte d'énergie à hautes fréquences, ainsi que l'absence d'uniformité en distance [Bel95]. Une correction est appliquée au signal afin de réduire la différence d'amplitude du signal entre le début et la fin de portée en utilisant la TVG (paragraphe 2.3.6.3).

Une fraction de l'onde incidente est réfléchiée. La quantité d'énergie réfléchiée est mesurée en fonction du coefficient de réflexion Cr de la surface de diffusion.

Dans nos simulations, nous considérons des surfaces rigides, cela signifie que la réflectivité Cr d'une cible est égale à 1. C'est l'approche utilisée par SIGMA [CG09] pour simplifier les conditions aux limites.

Une partie de l'énergie réfléchiée part vers la direction spéculaire et le reste est diffusé. Plus la surface est lisse, plus la réflexion est dans la direction spéculaire. Pour une surface parfaitement lisse, la totalité de l'énergie est réfléchiée dans la direction spéculaire. En sous-marin, des objets ayant des surfaces parfaitement lisses n'existent pas puisqu'en général ils sont restés dans l'eau pendant un temps considérable pour que des rugosités se forment à la surface.

3.6.3 Modèle de rétrodiffusion du fond (réverbération)

Pour définir l'environnement dans lequel les images sonar vont être simulées nous avons besoin d'une vérité terrain. Il existe deux méthodes principales pour obtenir une représentation géométrique du fond, soit un vrai modèle numérique de terrain (MNT) obtenu au cours des essais en mer soit une carte bathymétrique simulée. Parmi les techniques capables de fournir des scènes naturelles complexes et réalistes on trouve les fractales [DGM98] [BL97]. Il est courant aussi d'utiliser une distribution gaussienne des profondeurs avec une fonction de corrélation particulière, généralement gaussienne ou exponentielle, pour modéliser la rugosité. Cela est dû à sa simplicité par rapport au modèle des fractales [Hun06]. Dans notre simulateur, des MNTs réels de plusieurs types de fond (sable fin, rides de sable, vase et roches) ont été employés.

Deux éléments influencent l'énergie rétrodiffusée du fond, la réflectivité du fond (fonction de la nature des sédiments qui le composent) et l'étendu de la surface qui contribue à la rétrodiffusion du signal à l'instant t . L'élément de la surface qui contribue à la rétrodiffusion est la facette interceptée à l'instant t . La quantité qui caractérise la réflectivité du fond est le coefficient Cr (entre 0 et 1). Pour calculer la pression rétrodiffusée à partir du fond marin nous utilisons la loi de Lambert 3.2.6.4. Les équations 3.27 et 3.33 diffèrent uniquement par les indices de rétrodiffusion (C pour la cible et Id pour le fond).

$$p_{fond}(t) = -TLn.Id.jE_0 \exp(j(2\pi ft - 2kD)).rect(t, T_{ar}, T_{pulse}) \quad (3.32)$$

$$Id = A\sqrt{\mu_0}\cos(\theta) \quad (3.33)$$

où : θ l'angle d'incidence, A l'aire de la facette (en m^2) et μ_0 le paramètre de Lambert. Dans la littérature, on trouve souvent le coefficient $BS0$ (en forme logarithmique) obtenu empiriquement à partir duquel on peut déduire μ_0 (paragraphe 3.2.6.4).

La loi de Lambert est prouvée pour des faibles et moyennes rasances jusqu'à 65 degrés. Pour des incidences inférieures à 25 degrés, Hammerstad [Ham00] a montré qu'une adéquation raisonnable aux données mesurées est obtenue en supposant que l'indice de rétrodiffusion du fond varie linéairement entre BSN à 0° et $BS0$ à 25° . D'autre part, les effets de cette hypothèse sont négligeables pour le sonar latéral qui opère souvent près du fond et la majorité des données sont collectées à des faibles rasances.

Pour cette raison, nous avons choisi la loi de Lambert avec cet ajustement proche de la normale.

3.7 Implémentation de la méthode de lancer de rayons simple

3.7.1 Géométrie de la scène

Une source S est placée à l'origine d'un espace cartésien (x, y, z) . La géométrie du problème est donnée par le schéma de la figure 3.16, pour simuler l'insonification de la scène par un sonar latéral haute fréquence, on balaye l'espace en gisement selon un pas angulaire $\delta\theta$ et en site selon un deuxième pas angulaire $\delta\varphi$.

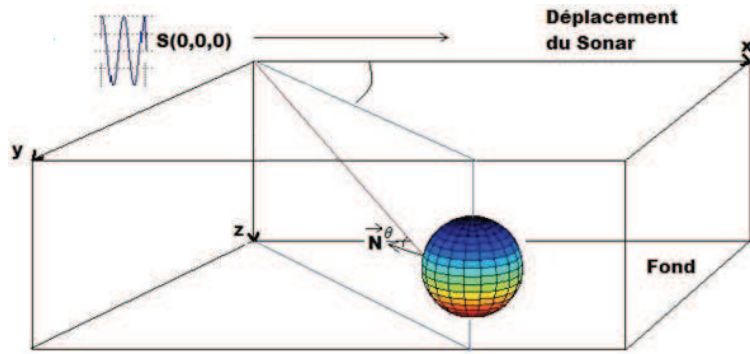


FIGURE 3.16: Géométrie de la scène

La scène est représentée par des facettes triangulaires. Chacune est définie par une liste d'attributs (coefficient de réflectivité et coefficient de diffusion) et distinguée par les caractéristiques de l'objet auquel elle appartient (le type de sédiment pour le fond ou le matériau pour les cibles). On cherche le point d'intersection, s'il existe, entre le rayon et l'équation d'un plan triangulaire et on vérifie par la suite la visibilité entre ce point et la source.

Par souci d'optimisation du temps de calcul, un test est effectué à l'émission de chaque ping pour ne garder que les facettes qui se trouvent dans le secteur à l'instant de l'émission du signal. Ceci évite de tester l'intersection entre des rayons et des facettes qui ne peuvent jamais se rencontrer dans la configuration que nous avons choisie pour notre simulateur. Nous nous sommes inspirés du système sonar le Klein S3000 [JA] pour paramétrer le simulateur SIS. En effet, à chaque émission, le sonar attend la réponse du ping émis (abscisse x_i) avant d'avancer à l'abscisse $x_i + \text{delta_}x$. La navigation est effectuée le long de l'axe des abscisses (axe des gisements). La durée du pulse d'émission est 0.1 ms et la largeur de bande est 60 kHz autour de la fréquence centrale qui est 100 kHz. L'ouverture horizontale est de l'ordre de 0.5 degrés et celle verticale est égale à 40 degrés. L'énergie maximale initialement émise égale à 220 dB.

Quelques images simulées avec et sans prise en compte des trajets multiples pour un cylindre seront montrées dans la suite.

3.7.2 Images Simulées

Les images choisies pour illustrer les résultats de simulation du modèle décrit dans ce chapitre sont celles d'un récif artificiel. Ce récif artificiel est composé de 6 cubes troués, la longueur de chaque côté égale à 1.73m, quatre constituent la base et les deux autres sont situés au-dessus.

Deux modèles géométriques de deux types de récifs artificiels sont montrés sur les figures

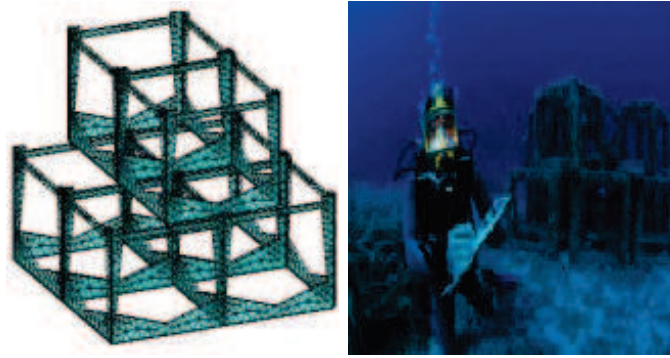


FIGURE 3.17: modèle géométrique d'un récif artificiel "Type 1"

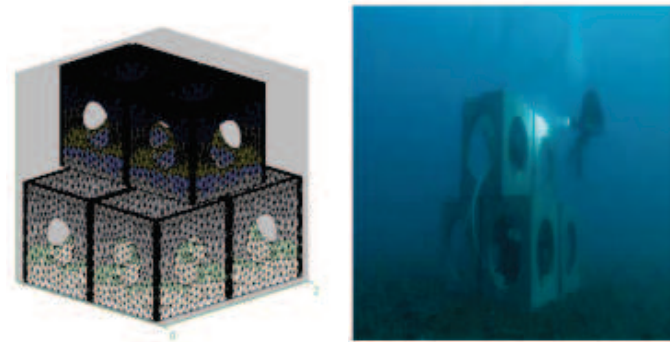


FIGURE 3.18: modèle géométrique d'un récif artificiel "Type 2"

3.17 et 3.18 ainsi qu'une comparaison qualitative des images simulées d'un récif artificiel "Type 1" à des images réelles du même objet sur la figure 3.19.

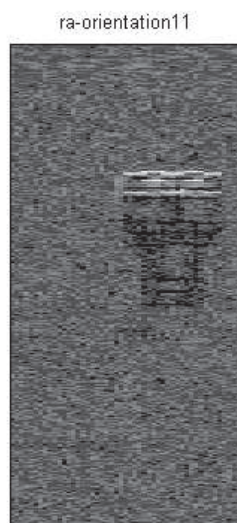
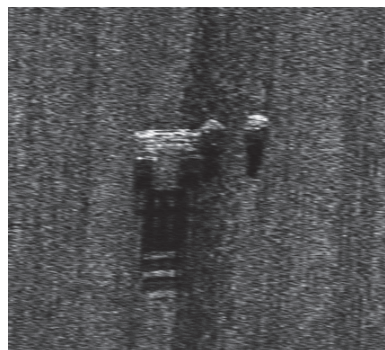
Les images réelles du récif artificiel sont la propriété de la société iXBlue et à savoir que nous ne disposons d'aucune information sur les conditions opérationnelles et environnementales d'acquisition (ni les dimensions de l'objet ni les propriétés du signal et du sonar utilisé et non plus la distance entre le récif et le sonar).

La légende des orientations dans lesquelles les images de récif artificiel ont été simulées est donnée au début du chapitre 5 (paragraphe 5.2.1).

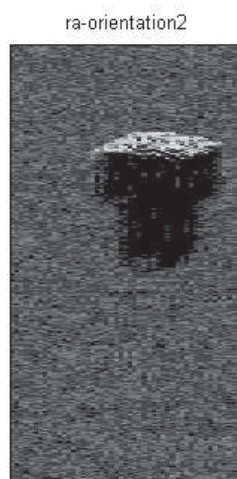
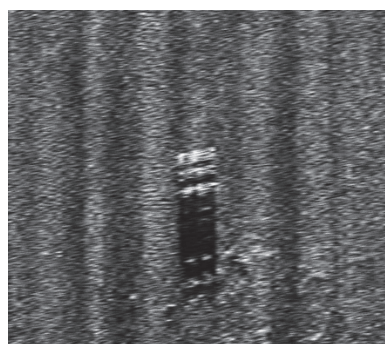
3.8 Effets de la célérité sur l'écho simulé d'une cible cylindrique

En haute fréquence, les variations d'intensité et les différences en temps créées par l'hypothèse de célérité constante sont supposées négligeables. Pour justifier cette approximation pour les échos des cibles, nous avons comparé les échos d'une cible cylindrique aux deux célérités extrêmes de la plupart des profils de célérité ($1480m.s^{-1}$ et $1520m.s^{-1}$).

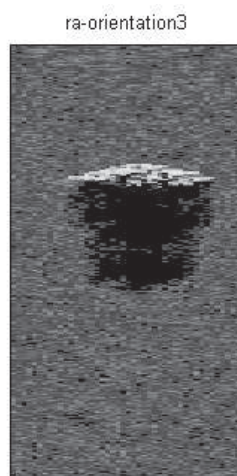
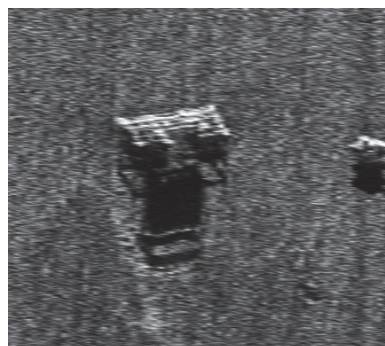
Les figures 3.20 et 3.21 correspondent, respectivement, aux célérités $1480m.s^{-1}$ et $1520m.s^{-1}$.



(a)



(b)



(c)

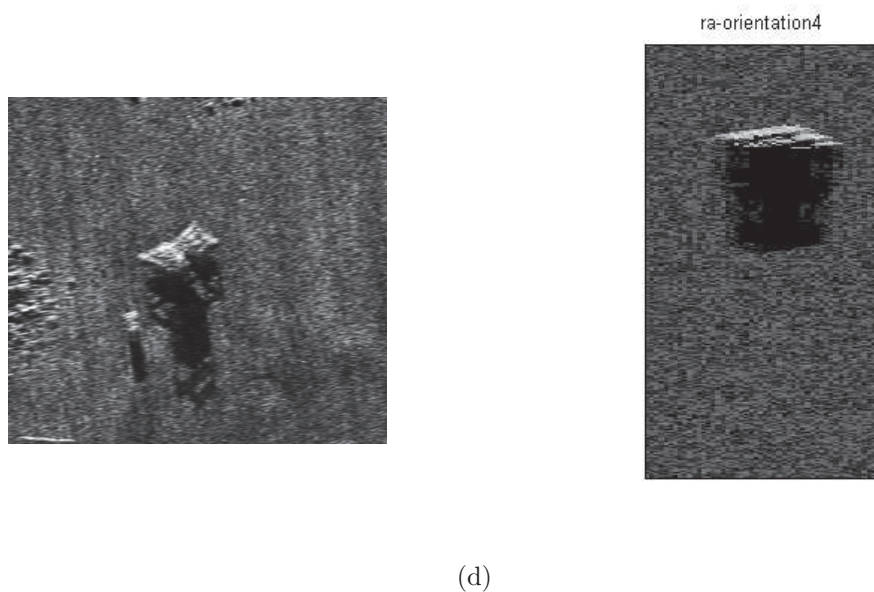


FIGURE 3.19: Images sonar réelles (C) iXBlue (à gauche) et simulées (à droite) d'un récif artificiel de "type 2" à une distance de $20m$ et sur un fond sableux : (a) Image simulée dans l'orientation 11, (b) Image simulée dans l'orientation 2, (c) Image simulée dans l'orientation 3 et (d) Image simulée dans l'orientation 4

Les deux échos sont visuellement similaires mais leurs positions en distance sont décalées. En effet, l'écho du cylindre dans la figure 3.20 arrive à un instant t qui correspond à une distance Sonar-Objet de l'ordre de $20.5m$ alors que dans la figure 3.21 cet instant correspond à une distance de l'ordre de $20m$. En effectuant la différence entre ces deux images pixel par pixel nous avons pu visualiser sur la figure 3.22 ce décalage. Néanmoins, cette figure nous a permis de comparer les tailles des deux échos qui sont presque les mêmes. Afin de comparer leurs niveaux d'énergie (pixel à pixel) nous avons appliqué un recalage entre les deux images avant de faire la différence qui est donnée par la figure 3.23. Nous constatons que les niveaux d'énergies sont faiblement influencés par la différence de célérité.

Cette petite différence dans les niveaux d'énergie est due à la technique stochastique du Sonel Mapping utilisée pour calculer la contribution des trajets multiples (paragraphe 3.6.1.4). Il a été remarqué que cette méthode ne donne jamais exactement la même réponse même dans les mêmes conditions et avec la même célérité. C'est dû à la stratégie de sélection des rayons qui est non déterministe. Théoriquement, la célérité agit aussi sur la résolution en distance mais il semble que son effet est pratiquement inexistant puisque dans notre cas le calcul de la résolution en distance (paragraphe 2.3.3.1) ne varie presque pas en fonction de ceux deux valeurs de célérité.

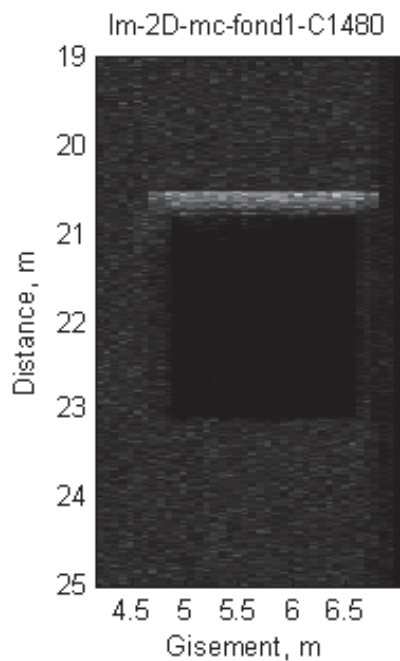


FIGURE 3.20: Image simulée d'un cylindre (diamètre=0.53, longueur=1.6 m) sur un fond sableux ($c=1480m.s^{-1}$)

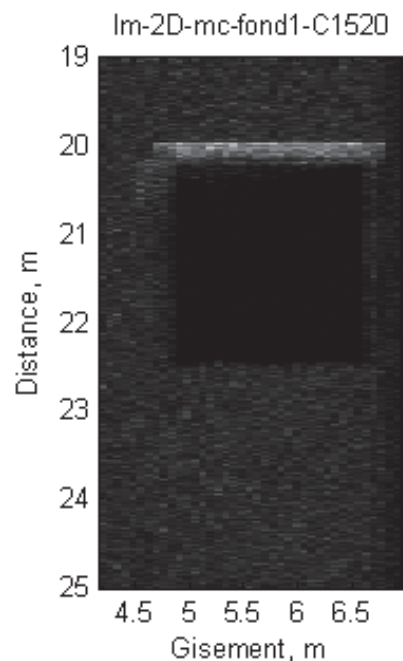


FIGURE 3.21: Image simulée d'un cylindre (diamètre=0.53, longueur=1.6 m) sur un fond sableux ($c=1520m.s^{-1}$)

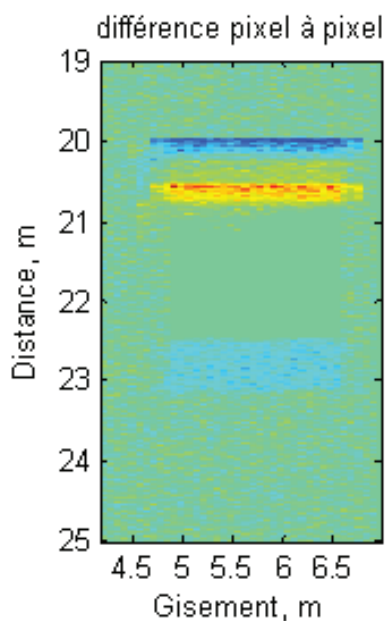


FIGURE 3.22: Différence pixel à pixel de deux images simulées à deux célérités différentes pour un cylindre droit

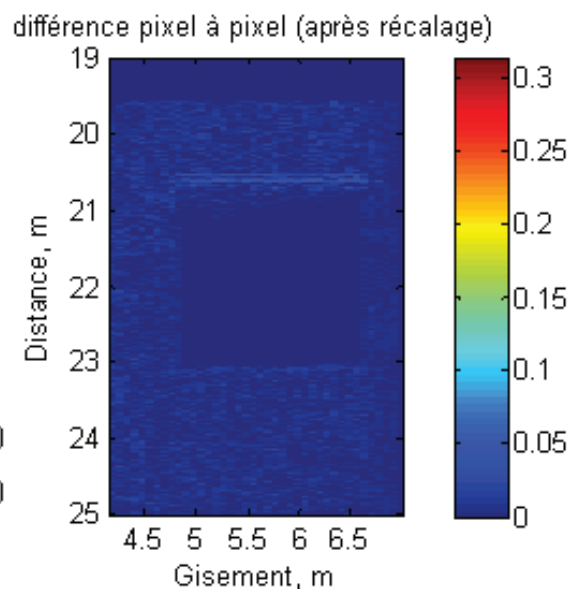


FIGURE 3.23: Différence pixel à pixel après recalage de deux images simulées à deux célérités différentes pour un cylindre droit

3.9 Comparaison des images simulées avec et sans prise en compte des trajets multiples

Les figures 3.24 et 3.25 présentent les images obtenues pour un cylindre, respectivement, droit et incliné, avec et sans effets des trajets multiples. Visuellement, on note que la réponse de la cible est amplifiée dans les deux figures, ce qui est dû à un second écho qui arrive un peu après le premier écho qui correspond au trajet direct. L'intensité du deuxième écho (qui correspond aux trajets multiples) est inférieure à l'intensité du premier car le temps de la propagation est plus élevé (la perte par propagation est plus importante). Bien que Groen [Gro06], par exemple, a déduit l'inverse en utilisant une méthode déterministe pour modéliser les trajets multiples (paragraphe 3.6.1.2).

Une double contribution du même chemin est peu probable dans notre cas en raison de l'utilisation d'une méthode stochastique pour sélectionner le type d'interaction (réflexion spéculaire ou diffuse) ainsi que les directions aléatoires de diffusion dans le cas de la réflexion diffuse et la diffraction rendent presque impossible d'avoir une intensité plus élevée que l'écho principal.

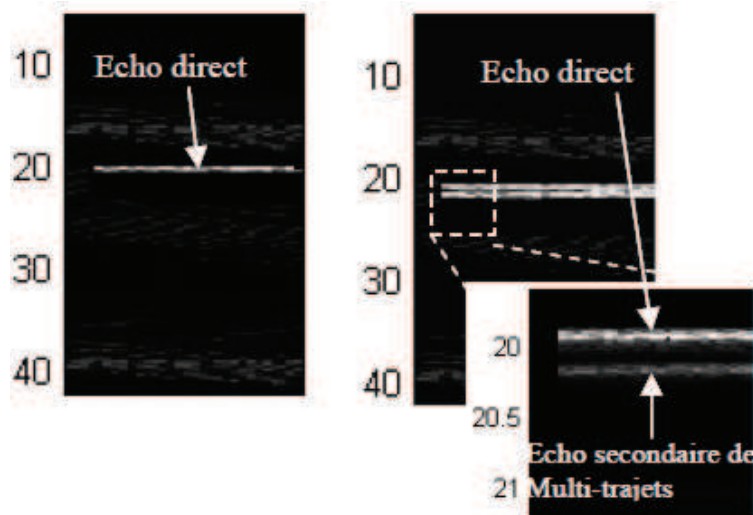


FIGURE 3.24: Cylindre (droit) sans (à gauche) et avec (à droite) effet de multi-trajets

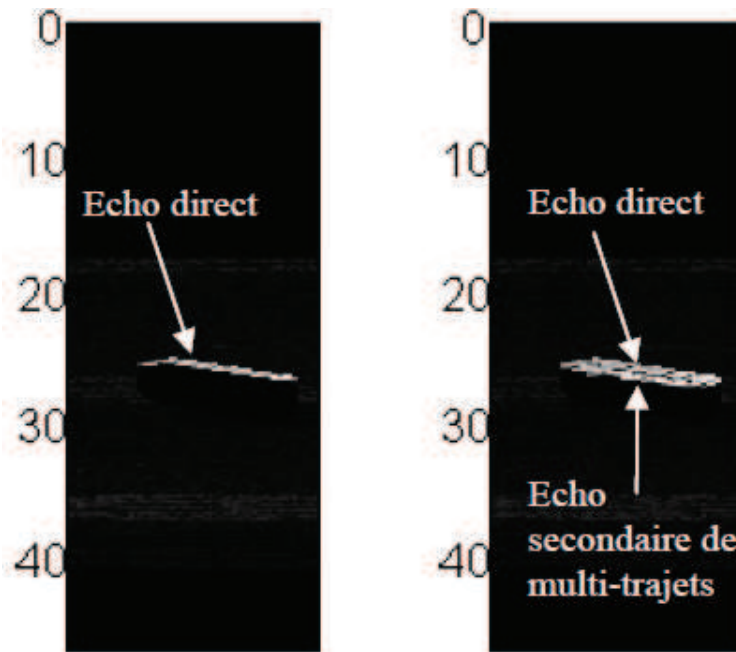


FIGURE 3.25: Cylindre (incliné) sans (à gauche) et avec (à droite) effet de multi-trajets

Une illustration de la réponse acoustique d'une cible cylindrique avec et sans prise en compte des multi-trajets est montrée dans la figure 3.26. La configuration de la scène est donnée par la figure 3.27. Sur la figure 3.26, l'écho principal est le même (avec et sans effet des multi-trajets). L'intensité du second écho a une valeur inférieure à celle de l'écho principal (de l'ordre de 4 dB en moins), et il est perçu à une distance de $0.3m$ à partir du premier. Il y a aussi un troisième écho c'est le dernier écho visible, parce que les trajets d'ordre supérieur sont rapidement atténués à cause des pertes par propagation. Les deux principaux échos se produisent au niveau de la ligne la plus proche de la surface du cylindre et celle qui se trouve au niveau de l'axe principal. En effet, la distance qui sépare les deux échos est égale au rayon du cylindre. Le dernier écho qui se produit à une distance égale à peu près $1.1m$ de l'écho principal correspond probablement au rayon qui a tapé le fond, suivant la droite qui est la projetée de l'axe principal du cylindre sur le fond (séparés de $0.5m$), puis la cible puis le fond avant de retourner à la source. En effet, le calcul de la distance aller-retour qui correspond à ce trajet (sonar-fond-cible-fond-sonar) donne $42.2m$. A partir de cette valeur, on retrouve la distance de $21.1m$ correspondante à l'instant d'arrivée du troisième écho.

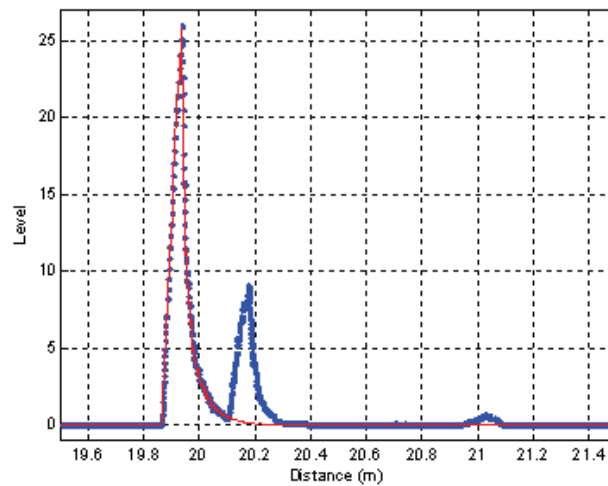


FIGURE 3.26: Réponse acoustique d'une cible cylindrique : avec et sans effets de multi-trajets, respectivement, en pointillé et en ligne continue

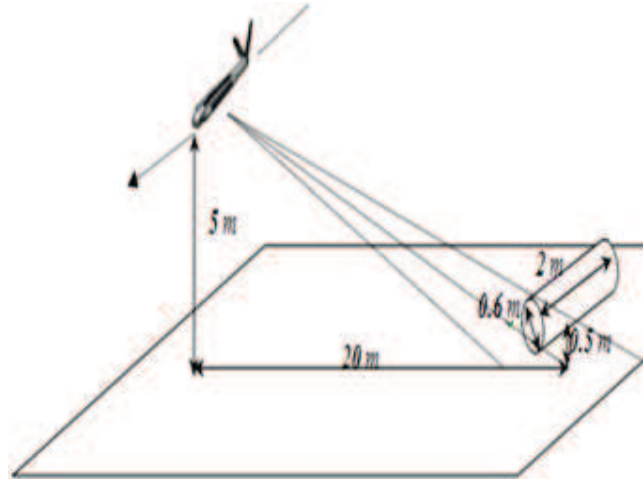


FIGURE 3.27: Configuration géométrique de la scène

Les figures 3.28 et 3.29 présentent les images obtenues pour une sphère, respectivement, avec et sans effets des trajets multiples. On peut apercevoir le second écho qui correspond aux trajets multiples. L'effet de multi-trajets est moins apparent sur l'image de la sphère par rapport à celle du cylindre du fait de leurs géométries respectives. En effet, la sphère a une géométrie symétrique qui renvoie les rayons directs qui arrivent proche de l'équateur sur les côtés loin de la direction du sonar (figure 3.30).

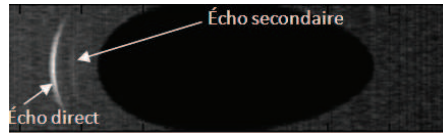


FIGURE 3.28: Sphère avec effets de multi-trajets



FIGURE 3.29: Sphère sans effets de multi-trajets

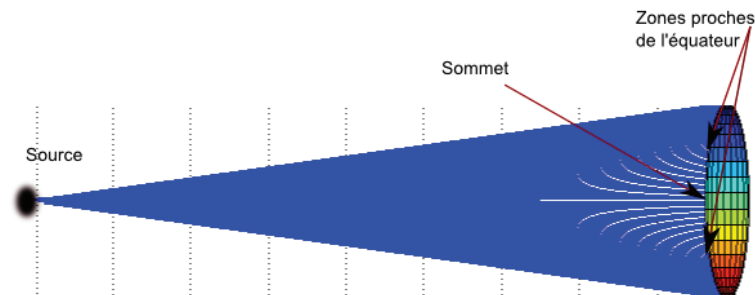


FIGURE 3.30: Les deux zones sur une surface sphérique (proche du sommet ou proche de l'équateur)

3.10 Conclusion

Le modèle que nous avons proposé, dans ce chapitre, est capable de modéliser le processus de formation des images sonar à l'aide des sous-modèles numériques. Ces sous-modèles reproduisent les phénomènes physiques qui donnent lieu à la formation des images réelles. Les images obtenues ont un aspect visuel réaliste et les réponses des cibles simples sont en adéquation avec la théorie. D'autre part, ce simulateur nous a permis d'avoir sous la main un outil d'apprentissage et d'acquisition d'expertise dans ce domaine. En effet, en combinant des paramètres physiques et en calculant leurs effets sur des images, ce simulateur aide à développer les compétences d'interprétation qu'il soit pour l'opérateur ou bien dans le cadre de la classification automatique.

Les réponses des objets présentées ici montrent que la modélisation des trajets multiples est importante puisqu'elle amplifie la réponse de la cible et permet une meilleure représentation de la signature acoustique qui est l'élément primordial pour réussir la classification automatique des cibles en utilisant l'écho. Généralement, les trajets multiples se composent principalement de trois trajets acoustiques.

En outre, l'avantage de la méthode stochastique proposée dans ce travail est le temps de calcul optimal. En effet, le coût d'exécution d'une simulation en considérant les trajets

multiples est 3 fois le coût requis pour la même simulation sans trajets multiples. Malgré la contribution des trajets qui arrivent relativement après une longue période (quand la cible est enfouie ou contient des cavités comme le récif artificiel), l'ombre reste contrastée et l'écho sera amplifié et étalé. Sur l'écho de l'épave du remorqueur (figure 3.31) on remarque des détails qui ne sont pas observables sur l'ombre d'où l'intérêt de combiner l'analyse sur ombre et sur écho.

L'objectif du modèle présenté, qui utilise le "Sonel Mapping" adapté, est d'avoir une simulation du monde acoustique en 3D avec un coût de calcul faible (condition nécessaire pour l'insertion du modèle dans le processus de classification). Les résultats de classification obtenus en se basant sur le modèle de simulation décrit dans ce chapitre seront présentés dans le chapitre suivant.



FIGURE 3.31: épave d'un remorqueur (C) GESMA&NURC

L'image de la figure 3.31 a été acquise par le sonar latéral Klein 5000 pendant la campagne OTAN - BP02 (Battlespace Preparation) menée entre les mois de Mai et Juin 2002 sur les régions de Cinque Terre et de Framura en Italie par le Groupe d'Etudes Sous-Marines d'Atlantique (GESMA) de la Direction Générale de l'Armement (DGA) et le CMRE (ex NURC).

Chapitre 4

Classification des mines sous marines

4.1 Introduction

La classification des cibles sous marines est aujourd'hui encore essentiellement basée sur l'analyse géométrique de l'ombre acoustique. La nouvelle génération des sonars fournit une description plus précise de l'onde acoustique rétrodiffusée par les objets. Grâce à cette capacité il est possible de combiner l'analyse d'ombres et d'échos qui semble une solution prometteuse pour améliorer la classification des objets immergés.

Plusieurs facteurs font de la classification des cibles sous marines à partir des images sonar un exercice complexe. Parmi ces facteurs, on cite la variation des conditions environnementales et opérationnelles et la présence de plusieurs sources de bruit. On trouve aussi différentes formes, compositions et orientations des cibles en plus de l'influence du fond qui est parfois formé de roches ou de rides. A tous ces facteurs s'ajoutent des phénomènes qui peuvent compliquer la détection des cibles tels que l'atténuation du signal dans la colonne d'eau, le problème des cibles enfouies ou semi-enfouies, l'indice de rétrodiffusion du fond parfois très fort qui risque de cacher les échos des cibles ainsi que les cibles qui sont recouvertes des dépôts d'algues et de coquillages après une longue durée dans l'eau [GSG11].

Dans les opérations de chasse aux mines, les sonars latéraux sont utilisés pour détecter, extraire et classifier les cibles en cherchant les signatures des mines connues dans l'ensemble des signaux rétrodiffusés. Tandis que plusieurs systèmes considèrent simplement la classification des cibles en mine ou non mine, l'analyse géométrique a été utilisée plus tard pour donner des informations sur la forme de l'objet détecté. En général, il existe

trois catégories de descripteurs qui sont utilisés : géométriques, énergétiques et statistiques.

Dans ce travail on s'intéresse à l'étape de classification des objets immergés. La détection de ces objets est supposée faite. L'objectif est d'exploiter la zone écho dans une image sonar afin d'atteindre une bonne classification des cibles sous marines. La méthode proposée est une méthode basée sur le modèle de simulation développé dans le chapitre 3 et rend une liste de classes ayant chacune un degré d'appartenance. Elle est aussi capable de fournir des informations sur le type et l'orientation éventuels de la cible.

Pour cela, nous utilisons une technique d'appariement de gabarits (Template Matching) où le gabarit désigne l'A-scan (paragraphe 2.4.2). Ce descripteur extrait du signal brut ou de la zone d'écho de l'image 2D, renferme bien des informations sur la répartition spatiale des pixels et leurs niveaux de gris qui représentent la quantité d'énergie rétro-diffusée. Ces deux informations suffisent pour extraire des informations géométriques et énergétiques de la zone écho. La technique d'appariement des A-scans est donc redéfinie. Par ailleurs, pour compléter ou valider le résultat de cette première classification, des nouveaux descripteurs sont calculés sur la zone écho (en 2D) et sur l'A-scan. Le processus de classification se déroule donc en deux phases : une phase 1 de filtrage adapté pour l'appariement des A-scans et une phase 2 de vérification et/ou de correction du résultat obtenu par la phase 1. La phase 2 (vérification/correction) est assurée grâce aux descripteurs introduits et/ou les nouveaux gabarits ajoutés selon le cas.

A faible résolution, il est prévu que cette méthode atteigne des performances meilleures que les techniques qui utilisent l'ombre grâce à la façon avec laquelle est défini l'A-scan.

4.2 État de l'art des systèmes de classification des mines sous-marines

Depuis l'émergence de sonar haute résolution, les scientifiques travaillent sur l'automatisation de la classification dans les opérations de chasse aux mines. Cette tâche était auparavant effectuée par des opérateurs humains, mais la quantité de données est devenue trop importante pour être traitée manuellement. L'automatisation n'est pas anodine en raison d'un niveau élevé de bruit inhérent aux images sonar et la grande variabilité des données sonar [RPB03][PRCB06].

Les premiers systèmes développés dans ce domaine étaient composés de sous-systèmes de détection et de classification afin de classer les objets détectés comme mine ou non mine sans davantage de détails à propos de la mine potentielle [CH00]. Ensuite, on s'est intéressé à identifier les mines à partir de leurs ombres portées en mono ou multi-vues qui renseignent sur leurs formes géométriques [Qui01][ZFH09][CMP⁺07]. Dans la plupart des cas la classification mono-vue des mines de formes simples (sphérique ou cylindrique)

grâce à leurs ombres était efficace, par contre elle s'avérait insuffisante pour classifier les formes plus complexes comme la forme asymétrique de la mine Rockan.

Plus tard avec l'apparition des systèmes très haute résolution, l'identification des mines ne se fait plus grâce à l'ombre uniquement mais plusieurs chercheurs ont essayé d'atteindre des meilleurs performances, même pour les formes complexes, en combinant des descripteurs issus de l'ombre et de l'écho. Cette approche n'a pas été utilisée auparavant à cause de la mauvaise résolution des images. De même pour cette dernière catégorie de classificateurs, des méthodes multi-vues ont été proposées [Mye10].

4.2.1 Classification Mine/Non Mine

Dès le début des années 90, des experts du centre CSS (Coastal Systems Station) en collaboration avec les chercheurs de l'université de Lockheed Martin et Raytheon de l'état de Colorado (US) se sont intéressés à l'automatisation de la détection et la classification des cibles sous marines (CAD/CAC). Une synthèse de ces travaux est présentée par Chapple [Cha08].

Les premières approches utilisées pour classer les cibles sous marines (mines ou non mines) consistent globalement à appliquer un prétraitement sur les images (un filtrage pour réduire le bruit, par exemple) et permettre ainsi au processus de classification de fonctionner dans des conditions optimales, ensuite extraire un ensemble de descripteurs puis finalement faire la classification en comparant les descripteurs de l'élément de test à ceux d'un ensemble de données d'apprentissage. Différentes méthodes ont été utilisées pour mesurer la similarité entre les descripteurs. On peut citer : la méthode Bayésienne (test des rapports de vraisemblance et filtres adaptés) [AFD97][AFD01], le filtre discriminant optimal de classification basé sur l'analyse linéaire discriminante (ALD) [DH⁺97] et le classificateur multi-niveaux basé sur le calcul des scores [CH00].

La classification des cibles en tant que mine ou non mine peut être faite aussi en comparant les signatures des cibles aux signatures connues des mines. Il existe différentes définitions des signatures qui sont utilisées pour identifier une cible. Par exemple, si la définition de la signature considère l'ensemble des paramètres calculés à partir d'un modèle, la cible peut avoir des signatures différentes en fonction du modèle de rétrodiffusion utilisé [TK11].

Outre l'identification des cibles à partir de l'image 2D, il existe d'autres approches qui utilisent les signaux bruts du sonar [PASS07][ASYHD00][BMKSP13][ZWAS09]. Un prétraitement (filtrage, réduction du bruit, etc.) est généralement appliqué au signal brut, ensuite les descripteurs sont extraits pour faire la classification.

Quelques travaux ont utilisé des approches non supervisées pour distinguer les mines des non-mines (Réseaux de neurones et ACP) [QKSD10]. Les techniques de classification non

supervisées sont génériques et peuvent être utilisées pour différents ensembles de données. Ces techniques ne sont pas optimisées pour un certain ensemble d'apprentissage. Les algorithmes utilisés ne donnent pas des résultats aussi bons que les algorithmes qui sont entraînés avec des données d'apprentissage. L'avantage de ces approches est la large applicabilité avec peu d'exigences [CMP⁺07].

La performance de ces systèmes a été considérablement améliorée par la fusion de leurs résultats [MCR⁺08][RRCP06][BPL⁺07]. Le principal atout de la fusion consiste à l'extraction des informations les plus importantes et les plus discriminantes à partir d'un ensemble fini de données d'apprentissage. Elle réduit ainsi le taux de fausses alarmes tout en maintenant un taux élevé de détection et de classification des mines [GSG11].

4.2.2 Identification des cibles

L'identification consiste à avoir des informations sur la cible autres que l'information mine ou non mine. Les informations telles que la forme et les dimensions de l'objet aident à identifier la mine et trouver le bon moyen pour neutraliser la menace [PPS⁺13]. Les systèmes classiques de reconnaissance automatique des cibles sont basés sur le calcul et l'extraction de différents descripteurs à partir de l'image. Ces descripteurs peuvent être groupés dans principalement trois catégories :

- Descripteurs géométriques : basés sur la forme et la répartition spatiale des pixels de la zone cible(longueur, aire,etc.)
- Descripteurs énergétiques : basés sur les caractéristiques spectrales et métriques de l'amplitude du signal rétrodiffusé par l'objet
- Descripteurs statistiques : basés sur la distribution des intensités dans l'image.

Dans la plupart des cas, ces systèmes combinent les descripteurs issus de plusieurs catégories. La zone d'écho et la zone intermédiaire (la zone délimitée par l'écho en haut et l'ombre en bas) contiennent des informations discriminantes pour l'identification des objets mais elle n'étaient pas ou peu exploitées jusqu'à ces dernières années à cause de la résolution insuffisante des images où l'écho se compose de quelques pixels uniquement.

4.2.2.1 Classificateurs basés sur l'ombre acoustique

Les méthodes supervisées basées sur l'extraction des descripteurs de l'ombre acoustique ont été largement exploitées [Qui01][MCPB00][DBL08][ZFH09]. Néanmoins, bien que l'ombre fonctionne bien pour la classification d'objets simples comme la sphère ou le cylindre, elle peut être insuffisante pour des objets naturels ou complexes en mono-vue. L'ombre du même objet peut varier selon la distance entre l'objet et le sonar et d'une

orientation à l'autre. Ceci est dû à la géométrie d'acquisition des données sonar et nécessite une normalisation en distance avant de faire la classification. Il y a des auteurs qui ont utilisé des modèles d'ombre déjà transformés mais avec cette méthode il n'est plus possible de déduire les dimensions de l'objet [Qui01].

Pour faire la classification et identifier les types des mines éventuelles ce sont les méthodes supervisées qui ont été généralement utilisées [DRVCGE09][KTN12]. L'étape clé dans toutes les méthodes supervisées est la formation d'une "bonne" base d'apprentissage qui doit représenter toutes les caractéristiques du problème examiné. La formation d'une base d'apprentissage exhaustive est impossible, spécifiquement dans le cas des cibles sous-marines qui peuvent être de formes très complexes et acquises dans des conditions très variées. Le résultat de la classification est généralement fonction de la phase d'apprentissage et peut être altéré si les éléments de celle-ci sont très différents des données de test. Il n'est pas garanti d'avoir de bonnes performances lorsque le fond marin ou la résolution par exemple sont tout à fait différents d'une condition typique pour laquelle le processus fonctionne bien [Cha08].

Idéalement, les données d'apprentissage contiennent des nombreuses combinaisons de fonds et des cibles placées à différentes distances et vues selon différents angles. Il n'est pas toujours facile de définir quand est-ce qu'un ensemble de données d'apprentissage est suffisamment grand. La base d'apprentissage doit être représentative de tous les types de fond et toutes les apparences et les orientations possibles des cibles qui peuvent se présenter. Une amélioration dans le résultat de classification a été observée en utilisant différents ensembles de données d'apprentissages pour différents scénarios au lieu d'utiliser une agrégation de données d'apprentissage qui couvrent tous les scénarios possibles [Cha08].

Puisqu'il est difficile d'obtenir suffisamment de données d'apprentissage adaptées à chaque situation, beaucoup de chercheurs ont généré synthétiquement leurs propres données [Faw01][RPB04][PPCB09][CMP+07][GCVE10]. Les mines et les ombres correspondantes sont générées en tenant compte de la distance, l'angle d'incidence et de la topographie du fond. Parmi les techniques utilisées on trouve la réalité augmentée qui consiste à introduire des MLOs (Mines Like Objects) dans des images sonar réelles. L'avantage de cette technique est la possibilité d'obtenir un grand ensemble de données contenant des cibles sans avoir besoin de simuler des fonds réels [PRCB06][CMP+07][MCR+08].

4.2.2.2 Classificateurs qui utilisent l'écho acoustique

Les algorithmes de classification des cibles qui utilisent les systèmes standards d'imagerie étaient principalement basés sur l'analyse de forme de l'ombre acoustique en 2D. Avec l'apparition des nouveaux sonars haute résolution, il est devenu possible d'analyser aussi

l'écho de l'objet au lieu de se baser uniquement sur l'analyse de l'ombre. En effet, l'écho, avec une meilleure résolution, contient des informations importantes qui peuvent être combinées à l'ombre pour avoir une information complète de la signature acoustique. Par exemple, Fawcett [Faw01] a utilisé les imagerie contenant des cibles comme des vecteurs de descripteurs en elles-mêmes et a utilisé l'analyse en composante principale (ACP) pour identifier les descripteurs les plus pertinents. Quelques années plus tard, la même technique a été appliquée sur un vecteur de descripteurs dérivés de l'écho et de l'ombre segmentés et cette combinaison donne de bons résultats [FCH⁺07].

Reed *et al.* [RPB04] ont utilisé les moments pour définir l'ellipse de l'écho et estimer ainsi le grand et le petit axe de l'objet. Ils se sont servis de ces informations pour déduire les différentes grandeurs des objets considérés (la longueur et le rayon du cylindre ainsi que les rayons de la sphère et de la mine Manta). La théorie de Dempster-Shafer est utilisée plus tard pour faire la fusion et l'analyse de classification en mono et en multi-vues.

L'objectif de notre travail est de montrer l'apport de l'écho dans l'identification des cibles sous marines. A ce jour, peu des travaux sont menés en ce sens.

Del Rio Vera a proposé une méthode supervisée basée sur l'extraction des descripteurs géométriques (à partir de l'écho, l'ombre et la zone entre les deux) [DRVCGE09]. Dans cette méthode l'angle d'incidence, la distance et l'orientation de l'objet par rapport au sonar sont inconnus. Les descripteurs sont calculés sur chacune des zones segmentées. La méthode utilisée pour déterminer la courbe qui approche le mieux la zone de l'écho fournit aussi la distribution des coins dans la zone correspondante. Au total, il a calculé 9 descripteurs sur la zone écho segmenté (La direction du premier axe obtenu par ACP par rapport à l'axe des gisements, les deux premières valeurs propres normalisées, le plus grand axe, le plus petit axe, l'élongation, l'excentricité de l'écho segmentée, l'excentricité des vecteurs propres, la circularité).

Del Rio Vera a testé sa méthode sur des données (majoritairement) simulées de 8 objets (cylindre, sphère, rocher, 2 roues de tailles différentes, etc.) posés sur différents types de fond (tous plats). Il a comparé les résultats de classification obtenus en utilisant les descripteurs de l'écho uniquement et a constaté que le résultat est peu influencé.

Dans son travail, Pailhas a étudié la résolution minimale qu'il faut atteindre pour que la classification à partir de l'écho uniquement puisse donner des bons résultats. Pour cela, il a simulé des données pour différentes résolutions et différentes valeurs du rapport signal sur bruit, SNR (Signal-Noise Ratio) [PPCB09]. Sa méthode consiste à utiliser l'ACP sur des données d'apprentissage converties en vecteurs centrés réduits pour réduire la dimension du problème. Il a pu déduire que le taux de la bonne classification en utilisant l'écho est faible (entre 50% et 80%) pour une résolution des pixels de l'ordre de 15 à 20 cm. Par contre pour une résolution de 5 cm et un SNR > 15 dB (qui sont les caractéristiques des sonars récents) ce taux atteint 95%. Pailhas a aussi remarqué que pour la mine Manta (forme symétrique) les résultats de classification étaient meilleurs

que pour les autres objets asymétriques et c'est à cause de la non robustesse de l'ACP par rapport à la rotation [PPCB09]. Nous allons utiliser les conclusions de ce travail sur la résolution optimale afin de bien exploiter l'écho dans notre méthode de classification.

4.2.3 Classificateurs basés modèle

De nombreux travaux ont utilisé des approches supervisées où intervient un modèle. Parmi ces travaux, on trouve le système de classification proposé par Reed *et al.* [RPB04] qui est basé sur un modèle d'ombre portée prenant en compte des informations sur la forme et la taille de l'objet. La physique sous-jacente au processus de formation de l'ombre acoustique est utilisée par le simulateur pour générer des réalisations synthétiques pour les différentes classes d'objets. Des gabarits d'ombres acoustiques sont générés à partir des objets dans différents scénarios (taille, orientation) puis comparés à ceux des objets réels. La résolution de l'image, l'altitude du sonar ainsi que la distance entre le sonar et l'objet sont déduites à partir de l'image réelle.

L'approche proposée par Coiras est aussi basée sur un modèle où l'apprentissage se fait à l'aide des données générées par la technique de la réalité augmentée [CMP⁺07]. En effet, des images synthétiques des cibles sont intégrées dans une image sonar réelle du fond (ou des fonds) dans le(s)quel(s) les données tests sont prises et en utilisant le(s) même(s) capteur(s). Il n'est pas évident de simuler un fond marin réel avec toute la diversité qu'il comporte (topologies, bruits, inhomogénéités de l'environnement, artefacts, etc.), c'est pourquoi les auteurs ont choisi cette technique [CMP⁺07]. La résolution du problème inverse qui consiste à obtenir les paramètres d'une scène à partir de l'image sonar correspondante est très complexe et nécessite l'utilisation des techniques d'optimisation statistique [CG09].

Un autre classificateur basé modèle était développé par Groen [GCVE10]. Il utilise l'appariement des images 2D pour faire la classification. Les gabarits (images 2D) sont générés par le simulateur SIGMAS (paragraphe 3.3.1). Le même simulateur a été utilisé pour générer des images de test réalistes. Nous présentons schématiquement, dans la figure 4.1, l'architecture d'un système basé modèle.

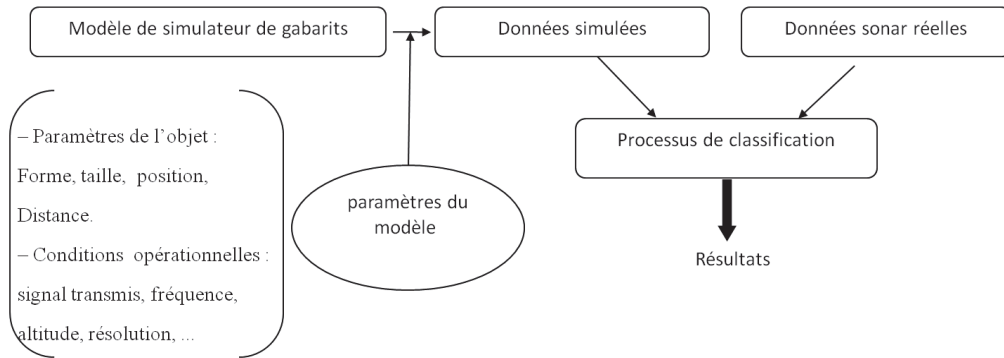


FIGURE 4.1: Architecture d'un système basé modèle

4.2.4 Appariement de gabarits

4.2.4.1 Principe

Parmi les méthodes supervisées qui ont été déployées récemment et qui ont prouvé leur robustesse par rapport aux problèmes liés à la classification des objets à partir des images sonar on trouve l'appariement de gabarits [DH⁺97][MM11][GCVE10][MF10][Faw03]. L'appariement de gabarits est basé sur la corrélation entre l'image 2D et les différents gabarits. La corrélation a été couramment utilisée, comme élément de classification, en imagerie sonar et aussi radar. L'avantage de la corrélation est la possibilité de prendre en compte tout décalage spatial possible entre l'image et le gabarit.

Dans cette méthode, les gabarits sont simulés dans différentes configurations en faisant varier les paramètres du simulateur. La signature de la cible à classifier sera ensuite comparée à l'ensemble des gabarits et affectée à la classe du gabarit ayant le score le plus élevé. Il est important que la mesure de similarité, utilisée pour comparer l'image aux gabarits, soit robuste par rapport aux quelques changements dans la signature de l'objet mais en même temps elle doit tenir compte des variations entre les objets de classes différentes.

Les deux problèmes qui se posent généralement dans la méthode d'appariement de gabarits concernent, d'une part, la base d'apprentissage et, d'autre part, le meilleur critère d'appariement.

4.2.4.2 Apprentissage

La question des gabarits à introduire dans la base d'apprentissage, se pose surtout pour les gabarits qui dépendent de l'orientation (cylindre, par exemple). Dans ce cas il faut définir un certain échantillonnage angulaire. Groen a étudié la sensibilité des performances

du classificateur basé sur la corrélation par rapport au choix du pas angulaire d'échantillonnage et a trouvé que l'espacement optimal entre les gabarits est égal à 10 degrés [GCVE10].

Il existe aussi d'autres types de variations qui peuvent être modélisées mais qui posent toujours cette même question. Par exemple, la proportion cachée de la taille totale de l'objet semi-enfoui ou bien les caractéristiques du fond qu'il faut modéliser.

4.2.4.3 Mesure de similarité

La mesure de similarité entre l'image et le gabarit peut être calculée selon différentes approches. Le but de la recherche d'un meilleur critère d'appariement est de bien exploiter l'information et traiter les images non idéales (écho faible ou absent, ombre absente, différence de taille entre image et gabarit, etc.).

Les approches de classification classiques nécessitent l'extraction de descripteurs invariants par rapport à certaines variations dans la signature au sein de la même classe d'objet. Il n'est pas possible d'avoir une signature typique des objets appartenant à la même classe puisque chaque signature dépend de la configuration unique de l'observation (paramètres de l'objet, l'environnement, le type du fond).

Parmi les mesures de similarité on trouve les coefficients de corrélation [FM05], les mesures de vraisemblance et les modèles probabilistes [GCVE10]. Certaines mesures nécessitent une segmentation de l'image en écho et ombre pour mesurer la similarité entre les zones segmentées. Cette dernière catégorie des mesures a l'avantage de ne pas introduire le fond. En général, le fond contient plus de pixels que l'ombre et l'écho et son score risque de dominer le score global. Mais l'inconvénient de cette mesure est sa dépendance de la qualité de segmentation qui est parfois affectée par les environnements complexes (rides, roche, etc.).

4.2.4.4 Différentes approches d'appariement

La technique d'appariement de gabarits a été utilisée par plusieurs auteurs sous différentes approches. Parmi ces approches on trouve celles qui comparent des grandeurs issues des niveaux d'amplitudes (énergies) des pixels et d'autres qui ignorent ces descripteurs énergétiques et utilise l'image segmentée : c'est l'approche adoptée par Fawcett et Myers [FM05]. En effet, ils ont utilisé plusieurs descripteurs pour mesurer la fraction des pixels de l'image test qui correspondent bien à ceux du gabarit. Reed *et al.* [RPB04], quant à eux, ont utilisé la distance de Hausdorff pour mesurer la plus grande distance qui sépare un pixel dans le périmètre de la zone d'ombre au plus proche voisin dans le périmètre de la zone d'ombre du gabarit. Ensuite, cette mesure est fusionnée avec des

informations supplémentaires obtenues à partir de l'écho (l'élongation) et la taille du gabarit qui a donné la meilleure mesure de similarité pour produire une fonction d'appartenance pour chacune des classes d'objets considérées. Groen [GCVE10] a utilisé une approche probabiliste sur des gabarits segmentés en 3 zones (écho, ombre et fond). Pour chaque pixel de l'image test, cette approche calcule la probabilité d'appartenance à un gabarit. Les distributions des pixels de l'écho et de la réverbération de fond sont supposées suivre une loi de Rayleigh. Le critère d'appartenance utilisé est basé sur le calcul de la probabilité moyenne dans la partie de l'image qui correspond à la cible (ombre et écho).

Myers [MF10] a proposé sa propre version d'appariement de gabarits qui commence par l'extraction de l'image test à partir d'une grande image sonar grâce à un algorithme de filtrage adapté. La méthode proposée implémente une généralisation de la corrélation basée sur le calcul d'un coefficient de corrélation normalisé entre chacune des zones écho et ombre de l'image et celles du gabarit. Cette méthode est basée sur un traitement séparé pour l'écho et l'ombre pour contrôler la contribution de chaque composante dans la mesure globale de la similitude surtout à grandes distances où la zone d'ombre devient beaucoup plus grande que l'écho.

En plus de la décision sur la classe la plus probable de la cible, cette méthode de classification a l'avantage de fournir la meilleure configuration (orientation) de la cible sélectionnée. Cette information est potentiellement très utile pour déterminer un ensemble de vues optimales pour mener une classification multi-vues en cas de doute [Mye10].

Dans ce travail [MF10], seulement trois cibles (Cylindre, Manta, Rockan) ont été considérées et ont été placées à plusieurs distances pour générer les gabarits correspondants. Les gabarits ont été générés pour des cibles posées sur un fond plat dans une position verticale avec prise en compte des rotations autour de l'axe de révolution de chacune d'elles. C'est un traitement qui risque de devenir lourd lorsqu'il s'agit de le répéter pour plusieurs cibles. L'utilisation de l'information fournie par le sonar sur la distance de la cible éventuelle permet de simplifier cette procédure [MM10].

Midelfart [MGM09] a comparé trois mesures de similarité (le coefficient de corrélation, l'appariement des segments et critère de l'espérance d'utilité (Bernouli)) et a conclu que la première mesure était la plus performante dans la plupart des cas surtout quand il tient compte de l'écho et de l'ombre uniquement en éliminant le fond. Il a aussi trouvé que l'utilisation de la moyenne de deux coefficients de corrélation obtenus pour l'écho et l'ombre séparément donne des résultats meilleurs. Par contre, cette stratégie peut échouer dans certaines conditions quand, par exemple, le contraste entre le fond et l'ombre est très faible pour que cette dernière soit extraite correctement. Ce problème est très récurrent spécifiquement en fin de portée et il peut être résolu en considérant uniquement la partie écho de la signature obtenue.

Dans ces travaux ultérieurs, Midelfart a proposé une méthode pour traiter ce problème ainsi que le problème des échos faibles ou inexistants [MM11]. En effet, un pixel de l'écho de la cible est la somme de tous les signaux rétrodiffusés à une certaine distance dans le plan vertical. Si l'indice de rétrodiffusion de la cible est faible par rapport à celui du fond, le pixel qui appartient à l'écho peut avoir la valeur rétrodiffusée à partir du fond qui l'entoure. La solution proposée consiste à utiliser une technique d'appariement de gabarits adaptée où les gabarits sont créés durant la classification au lieu d'utiliser une base de gabarits toute prête créée en supposant un fond plat. Cette solution nécessite un sonar calibré capable de mesurer et fournir l'indice de rétrodiffusion du fond. Cette valeur est ensuite utilisée pour simuler les gabarits sur le même type de fond [MM10]. La bonne identification des cibles dépend surtout de la topographie du fond et de la valeur du rapport signal à bruit. En effet, quand le fond est grossier les trajets multiples sont plus importants. Parmi les solutions proposées, on trouve l'ajout de nouveaux descripteurs géométriques [DRVCGE09] ou statistiques [CMP⁺07].

4.2.4.5 Choix de l'approche : motivations

Dans tous les travaux présentés dans le paragraphe 4.2.4.4, les corrélations ont été définies sur des images 2D, ce qui risque de rendre l'appariement très coûteux en temps de calcul et peu adapté aux missions de chasse aux mines. Parmi les solutions proposées, on peut citer la sélection d'un sous ensemble de gabarits [GCVE10].

Nous proposons, dans ce travail, une méthode de classification basée sur l'amplitude du signal rétrodiffusé appelé A-scan. C'est une définition de la signature acoustique d'une cible obtenue à partir du signal brut ou l'image 2D. Ce descripteur est une réduction de l'écho de la cible en un signal 1D. Cette approche consiste à faire l'appariement sur les A-scans en 1D. L'information majeure que renferme ce descripteur issu de l'écho est l'agencement temporel des échos rétrodiffusés retardés dans le temps et atténués en amplitude. Un autre avantage du traitement basé sur l'A-scan par rapport à l'image 2D, est la possibilité de travailler même avec une faible résolution où l'écho se présente comme un ensemble de pixels éparpillés. En effet, l'A-scan va regrouper la contribution de ces pixels dans un vecteur 1D tout en gardant l'information sur leur répartition spatiale.

Cette méthode est basée sur un modèle (paragraphe 3.6) comme cela a été fait pour l'ombre acoustique dans [RPB04]. Nous utilisons l'appariement (paragraphe 4.2.4) en 1D, inspiré des méthodes proposées dans [MM10][MF10], connu sous le nom du filtrage adapté. Afin de maximiser la performance de notre classificateur, nous allons nous baser sur les résultats d'une étude menée par Midelfart [MGM09][MM10] pour ce qui concerne l'approche d'appariement et le choix de la mesure de similarité la plus adéquate.

Dans notre classificateur, la distance et l'angle d'incidence sont fournis avec l'image test.

En effet, les techniques basées modèle doivent disposer de la résolution exacte de l'image ainsi que la distance entre le sonar et l'objet afin de pouvoir extraire les dimensions exactes en mètre [MM10].

En utilisant une approche probabiliste, Groen [GCVE10] a constaté une confusion entre la classe Manta (cône tronqué) et la classe sphère. De même, Quidu [Qui01] a constaté une confusion entre le cylindre et la sphère, d'une part, et la mine Rockan et la mine Manta, d'autre part, (pour certaines configurations) en utilisant l'ombre acoustique en mono-vue. D'autre part, dans la plupart des travaux qui ont utilisé la corrélation en 2D, les résultats de classification de la mine Rockan ont été souvent mauvais [QSB⁺10][CFMD08].

Par ailleurs, la possibilité de détecter des objets manufacturés (qui ne sont pas des mines), durant les opérations de chasse aux mines, justifie la modélisation d'autres formes complexes afin de prendre en compte cette situation (récifs artificiels, par exemple).

En se basant sur les études citées [GCVE10][Qui01][QSB⁺10][CFMD08], il sera donc primordial d'évaluer la méthode proposée sur ces cibles (Sphère, Cylindre, Cône tronqué, mine Rockan, Récif artificiel). En plus, d'un côté, dans la réalité il est probable que certaines configurations simples (fond plat, rotation uniquement autour de l'axe de révolution) ne soient pas réunies, et de l'autre côté, la génération de gabarits pour chaque cas particulier risque de rendre la méthode très complexe et très lente. Un compromis peut être trouvé lorsqu'on connaît la distance qui sépare le sonar de la cible. Dans ce cas, les simulations seront focalisées sur les autres paramètres (orientation, type de fond, etc.). Le problème de classification à partir des images sonar (surtout en mono-vue) ne peut pas avoir un résultat parfait. La meilleure solution est de chercher les ambiguïtés et les traiter à l'aide d'autres informations (fusion, ajout de descripteurs, etc.). Dans notre méthode, nous proposons deux alternatives pour gérer les ambiguïtés : l'ajout de descripteurs calculés sur l'écho en 2D et l'enrichissement de la base d'apprentissage en fonction des cas d'ambiguïté .

En plus de la classe la plus probable (le type de l'objet), cette méthode fournit aussi la configuration de la cible éventuelle (l'orientation la plus probable).

4.3 Sélection des attributs

Les images sonar sont des images basées sur le calcul des distances mais à haute résolution elles apparaissent visuellement comme des images optiques. Avec ces images haute résolution les algorithmes classiques développés pour le traitement d'images optiques deviennent applicables.

4.3.1 Motivation

La sélection des attributs à partir d'un ensemble d'observations (images ou signaux) peut être étudiée pour deux applications : la projection des données et la classification. La première application a pour but de visualiser les données dans un espace réduit (bi ou tri-dimensionnel) alors que la deuxième application nécessite généralement plus que deux ou trois attributs donc le choix de la méthode de sélection d'attribut(s) dépend de l'application. Les méthodes utilisées pour réduire l'espace ne sont pas adaptées pour la classification et vice-versa [GSG11].

Il est couramment admis que la sélection des attributs dépend des connaissances de l'opérateur et de son expérience avec le processus étudié. Mais il existe d'autres critères pour sélectionner le (ou les) meilleur(s) attribut(s) pour un problème donné. En général, il faut que ces attributs : décrivent bien les différences et les similitudes qui existent entre la plupart des individus, soient robustes aux mesures et peu nombreux.

Il est connu d'après la théorie de décision statistique que la probabilité d'erreur en classification diminue lorsque des nouvelles mesures sont prises en compte. Cette règle est vraie pour un ensemble infini d'échantillons d'apprentissage pour lequel l'estimation d'erreur des paramètres du système est négligeable. Par contre, davantage d'attributs correspondent à plus de paramètres à estimer par le système de classification (des degrés de liberté) et par conséquent dans le cas d'un ensemble fini d'échantillons d'apprentissage ceci augmente l'erreur d'estimation.

La sélection des attributs est donc indispensable pour choisir le sous-ensemble qui renferme la majorité de l'information efficace. Les informations redondantes et non pertinentes qui peuvent avoir un effet néfaste sur la classification seront enlevées. Un vecteur d'attributs dans un espace de dimension inférieure sera extrait à partir de l'espace initial des attributs.

4.3.2 Méthodes de sélection d'attributs

Les fonctions les plus classiques de sélection d'attributs sont l'Analyse en Composante Principale (ACP) et l'Analyse Factorielle Discriminante (AFD).

Le but de l'ACP est de capturer la variation dans un groupe d'individus et d'utiliser cette information pour décrire chaque individu (en termes mathématiques : trouver les vecteurs propres de la matrice de covariance de l'ensemble des individus). Le nombre de vecteurs possibles peut être approximé en utilisant seulement les meilleurs vecteurs propres qui correspondent aux plus grandes valeurs propres.

L'objectif de l'AFD est de maximiser la discrimination entre les classes, alors que l'ACP cherche à réduire l'espace de représentation en quelques composantes principales. L'AFD

produit autant de fonctions linéaires qu'il y a de classes, alors que l'ACP produit autant de fonctions linéaires qu'il y a de variables d'origine.

En d'autres termes, l'AFD consiste à déterminer la (les) combinaison(s) linéaire(s) des variables (facteur(s)) qui maximise(ent) la variance inter-classes et minimise la variance intra-classes. Ces facteurs sont dits discriminants lorsqu'ils prennent des valeurs les plus proches possibles pour des éléments de la même classe, et les plus éloignées possibles entre les éléments de classes différentes [RS99].

C'est exactement le critère qui nous permet de dissocier les cibles de classes différentes et de grouper celles qui sont de la même classe. L'AFD est une méthode simple de sélection d'attributs et adaptée à notre contexte.

4.4 Méthode proposée pour la classification des mines sous-marines

Il est connu que l'écho peut être variable et dépend fortement des conditions d'acquisition (environnement, signal transmis, etc.), mais il fournit des informations pertinentes qui peuvent être utilisées comme des éléments de classification fiables [PPCB09][DRVCGE09]. L'aspect général de la signature acoustique d'une cible varie légèrement ou considérablement en fonction des conditions environnementales et opérationnelles. Mais si les conditions d'acquisition sont fixes, l'ensemble des paramètres représentatifs devient limité. Généralement, le type du sonar et les paramètres spécifiques (fréquence, durée et bande passante de l'impulsion, fréquence d'échantillonnage, angle de rasance, altitude du porteur, etc.) sont connus ou peuvent être déduits à partir de l'image sonar. En pratique, le problème de la classification des cibles sous-marines dépend uniquement de la forme de la cible, sa taille, son orientation par rapport à la trajectoire du sonar, sa position par rapport au fond (posée sur le fond, enfouie ou suspendue dans la colonne d'eau) et du type du fond marin.

4.4.1 Appariement d'A-scans

Des gabarits (A-scans) sont créés au cours du processus de la classification en utilisant les informations qui sont obtenues à partir de l'image à classifier et des conditions opérationnelles. Les paramètres fournis contiennent la distance, l'altitude du sonar et la résolution de l'image.

Ces gabarits sont créés en considérant 5 types de fond (sable, rides, vase, argile et roche) et 5 tailles différentes dans le cas où les objets aient des dimensions variables ainsi que des rotations autour de l'axe vertical. Par souci de simplicité et afin de modéliser toutes

les interactions possibles entre le fond et la cible, nous avons généré des scènes 3D à partir des MNTs (Modèle Numérique de Terrain) de différents types de fond (paragraphe 3.6.3).

Pour extraire la région d'intérêt (ROI : Region of Interest) sur l'image 2D, nous avons inclus dans le simulateur SIS un masque afin de sauvegarder les frontières correspondant à chacune des régions : fond marin, cible (écho et ombre). Pour les images réelles, nous avons extrait la ROI en utilisant les mêmes limites pour des images simulées dans les mêmes conditions que celles-ci. En effet, ayant la ROI en 2D (image) sous forme de lignes où chacune correspond à une réponse impulsionnelle sur la cible, nous obtenons l'A-scan en appliquant la procédure décrite dans le paragraphe 2.4.2. Pour être sûr de ne pas tronquer l'A-scan, la ROI comprend une partie du fond avant et après la position exacte de l'écho et de l'ombre acoustique correspondants à la cible en question (figure 4.2).

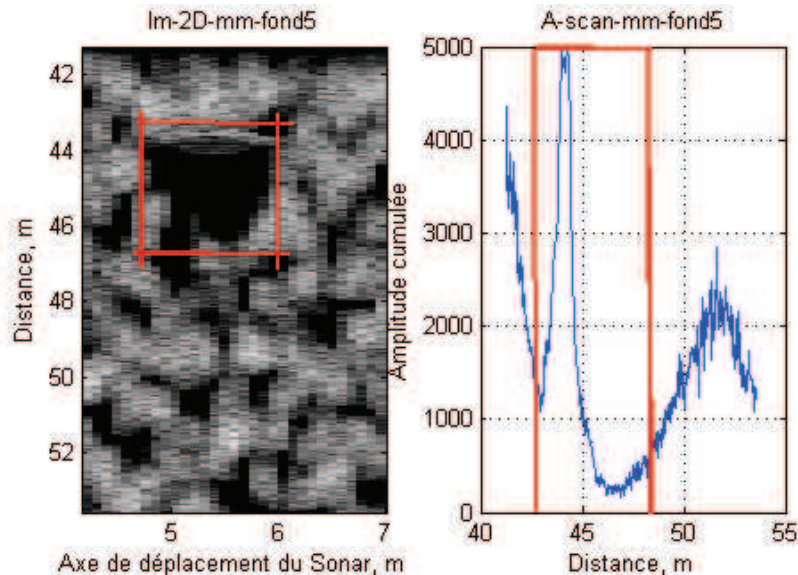


FIGURE 4.2: Extraction de la région d'intérêt (écho) dans une image sonar

Etant donné que les signatures des cibles sont simulées pour différents types de fonds plus ou moins complexes, la réponse exacte de la cible sera affectée par la contribution du fond si on calcule l'A-scan sans segmenter l'image. Nous avons utilisé une méthode de seuillage afin d'enlever le fond dans les images. Les A-scans de test et les gabarits seront ensuite calculés sur les pixels de la zone de l'image originale étiquetés "écho" après segmentation. L'effet de la segmentation des images avant de calculer l'A-scan est illustré par la figure 4.3.

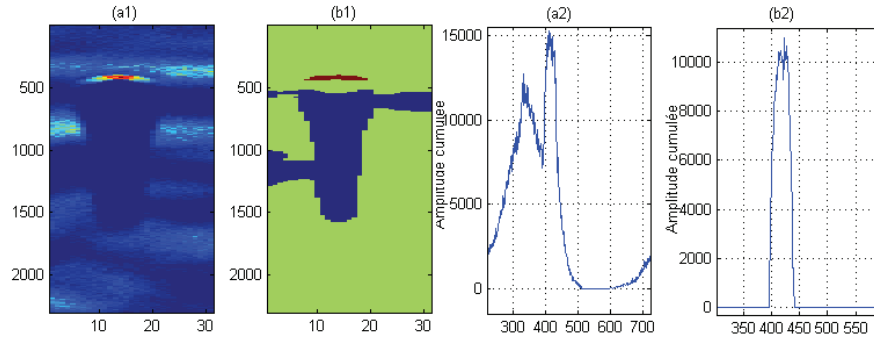


FIGURE 4.3: Effet de la segmentation sur la qualité de l'A-scan. (a1) et (a2) sont, respectivement, l'image 2D non segmentée et l'A-scan calculé à partir de celle-ci. (b1) et (b2) sont, respectivement, le masque de segmentation de l'image (a1) et l'A-scan associé à la seule zone écho de cette image

La méthode de seuillage utilisée est basée sur l'hypothèse que les échos voulus ne représentent qu'un très petit pourcentage du nombre total des pixels dans l'image. Par conséquent, l'histogramme calculé correspond principalement à la contribution du fond. Deux seuils sont ensuite fixés : un seuil ombre-fond et un seuil écho-fond.

Une fois le seuil écho-fond est calculé, l'écho est identifié par les pixels au-dessus de ce seuil.

Pendant la classification, l'A-scan test est comparé à plusieurs gabarits de chaque classe et est affecté à la classe à laquelle le gabarit de score maximum appartient. La mesure de similarité que nous utilisons est le coefficient de corrélation L_{xy} calculé à partir de la fonction de corrélation C_{xy} . Pour deux A-scans x et y de N échantillons, la fonction de corrélation est donnée par l'équation 4.1 et le coefficient de corrélation est défini par l'équation 4.2 :

$$C_{xy}(m) = \sum_{n=0}^N x_n y_{m+n}^*, \forall m \quad (4.1)$$

$$L_{xy} = \max(C_{xy}/(E_x \cdot E_y)) \quad (4.2)$$

avec E_x et E_y sont, respectivement, les énergies cumulées des A-scans x et y (4.3).

$$E_x = \sum_{n=0}^N \text{abs}(x)^2 \quad (4.3)$$

La valeur maximale L_{xy} correspond au meilleur alignement entre les deux A-scans et elle définit le degré d'appartenance de l'A-scan testé (x) à la classe de l'A-scan (y).

4.4.2 Phase 1 de la classification : Filtrage adapté

Le filtrage adapté est utilisé pour corrélérer l'A-scan inconnu avec plusieurs A-scans connus (gabarits). Ces gabarits sont simulés par le simulateur SIS pour chaque classe d'objets dans différentes orientations et pour différentes tailles en opérant dans les mêmes conditions d'acquisition que l'objet détecté [EBQZS13b].

Soit $\{C_i\}_{i \in \{1..N_c\}}$ tel que $C_i = \{G_{li}\}_{l \in \{1..N_i\}}$ l'ensemble de classes d'objets où chacune de classes est formée par un ensemble des gabarits G_{li} et N_i et N_c sont, respectivement, le nombre de gabarits de la classe C_i et le nombre totale de classes. A chaque classe C_i on associe un degré d'appartenance L_i qui est le coefficient de maximum de corrélation. La sortie du filtre adapté L_i est le critère utilisé pour faire la classification. Lorsque le degré d'appartenance L_i dépasse un seuil empirique T , une hypothèse h_i est créée et le poids L_i lui est associée sinon l'hypothèse est rejetée.

L'hypothèse h_i est "l'objet détecté appartient à la classe C_i ".

Les poids L_i seront ordonnés et l'hypothèse ayant le poids le plus élevé permet de connaître la classe la plus probable C_1 et son degré d'appartenance L_1 .

Pour chaque élément de la base de test, le résultat de la phase 1 est une liste ordonnée de classes C_i selon leurs degrés d'appartenance L_i . Ce résultat non binaire aide à prévoir les ambiguïtés quand elles existent. Pour détecter les cas d'ambiguïté, nous vérifions si la différence $|L_1 - L_2|$ est supérieure à un seuil S . Si cette condition est vérifiée, on se contente du résultat de la phase 1 qui consiste à garder la classe la plus probable C_1 avec son degré d'appartenance L_1 . Dans le cas inverse, la fiabilité du résultat préliminaire obtenu par la phase 1 de l'algorithme est mis en cause, et une seconde phase est proposée.

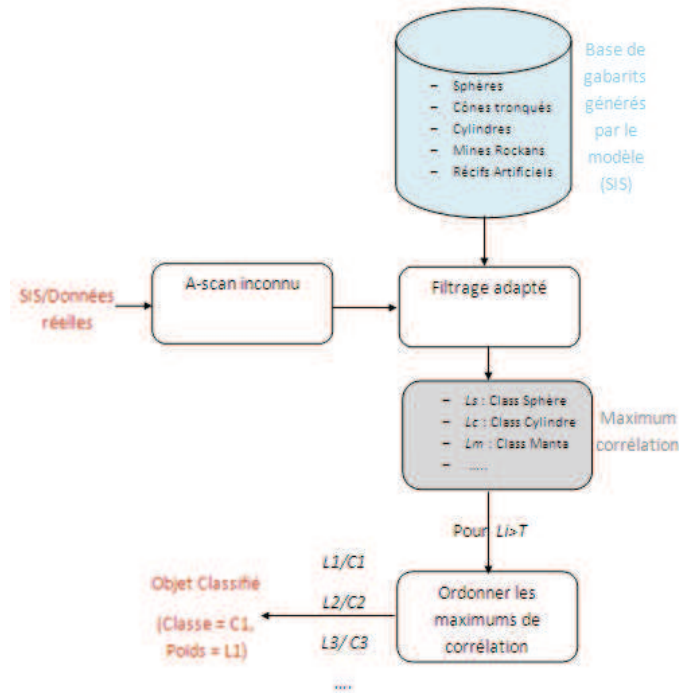


FIGURE 4.4: Filtrage adapté : phase 1

On définit un critère ζ par la condition suivante : $|L_1 - L_i|_{i \in \{2..N_c\}} \succ S$.

Un cas d'ambiguïté signifie que dans l'ensemble ordonné $\{C_i\}_{i \in \{2..N_c\}}$ il existe des classes qui ne vérifient pas le critère ζ . Ces classes seront regroupées dans un ensemble de classes ambiguës $A_i = \{C_i / |L_1 - L_i| \leq S\}$.

Les deux seuils T et S sont fixés d'une façon empirique et leurs valeurs respectives sont 0.6 et 0.05. Le diagramme en bloc de l'algorithme de la phase 1 est donné par la figure 4.4.

4.4.3 Phase 2 de la classification : gestion des ambiguïtés

4.4.3.1 Ajout de nouveaux descripteurs

Pour traiter les ambiguïtés il faut chercher d'autres informations, de préférence, décorréliées des premières. L'A-scan, comme il est défini ici, est un descripteur énergétique qui a un pouvoir discriminant non négligeable. Cependant, pour exploiter toute l'information que renferme l'écho nous avons calculé d'autres descripteurs 2D (géométriques et statistiques).

Calcul des descripteurs de l'écho en 1D et en 2D :

Des descripteurs de forme comme le périmètre, la surface et l'élongation de la silhouette de la zone écho d'une image sont parfois utilisés. Pour faire la sélection, nous nous sommes inspirés des descripteurs qui ont prouvé leur pouvoir de discrimination lors des études

précédentes [RPB04][CMP⁺07][RC97].

Le tableau 4.1 présente les descripteurs qui ont été retenus.

<i>Descripteurs de l'A-scan</i>	
Nombre des pics	le nombre de crêtes qui dépassent un seuil calculé en fonction de la valeur de l'énergie maximale ($\text{Seuil} \times \text{Max}$)
Max	la valeur de l'énergie maximale qui correspond au pic principal
Etalement (E)	la distance (temps) sur laquelle s'étale la réponse totale de la cible
Range	le temps interpolé correspondant à la moitié de l'énergie du pic principal
Aire 1D	la surface sous le pic principal calculée sur la période "Range", c'est la moitié de l'énergie du pic principal
Variance du pic principal	la variance d'énergie sur la période "Range"
Pente	la pente de l'A-scan calculée au pic principal
Intégrale inversée (int_inversé)	la différence entre la surface sous le pic principal avant et après la valeur maximale calculée à la moitié de l'énergie de ce pic
Sum_hist	le nombre d'éléments dans le dix premiers conteneurs qui forment l'histogramme de l'A-scan

<i>Descripteurs de forme 2D de la zone écho</i>	
Aire 2D	le nombre de pixels qui forment l'écho multiplié par la résolution de l'image
Périmètre	la longueur des bords de l'écho
<i>Descripteurs morphométriques 2D de la zone écho</i>	
Diamètre de Feret Max (F_max)	la distance maximale entre deux tangentes parallèles à des côtés opposés de la région écho en considérant toutes les directions
Diamètre de Feret Min (F_min)	la distance minimale entre deux tangentes parallèles à des côtés opposés de la région écho en considérant toutes les directions
Longueur Feret (F_1)	diamètre de Feret calculé dans la direction perpendiculaire à celle du diamètre de Feret Min
élongation (E_1)	le rapport du longueur Feret sur le diamètre de Feret Min. L'élongation ici est définie égal à 1 pour un disque
Rectangularité (R)	le rapport de l'aire de l'écho sur l'aire du rectangle Feret (c'est un facteur de compacité)
Convexité (C)	le rapport de l'aire de l'écho sur l'aire de son enveloppe convexe
Rinscrit	le rayon du plus grand cercle qui peut être inscrit à l'intérieur de l'écho
Rcirconscrit	le rayon du plus petit cercle qui entoure complètement l'écho
Sphéricité (S)	le rapport du rayon circonscrit sur le rayon inscrit
<i>Descripteurs statistiques 2D de la zone écho</i>	
Moyenne	le niveau d'énergie moyen
Variance 2D	la variance des niveaux d'énergie autour de la moyenne
Etendu	la différence entre la plus grande et la plus petite valeur d'énergie dans les pixels de l'écho

TABLE 4.1: Définitions des descripteurs utilisés

Les descripteurs morphométriques (ou morphologiques) n'étaient pas appliqués auparavant dans le cadre de la classification des cibles sous marines mais plutôt utilisés dans la phytotechnie. En effet, le traitement d'image est couramment utilisé dans les sciences agronomiques et la phytotechnie pour décrire les populations de particules individuelles. Les particules d'intérêt peuvent être des feuilles, des fleurs, des cellules, des céréales, des racines, des fruits, etc. Les descripteurs morphométriques ont été définis pour quantifier

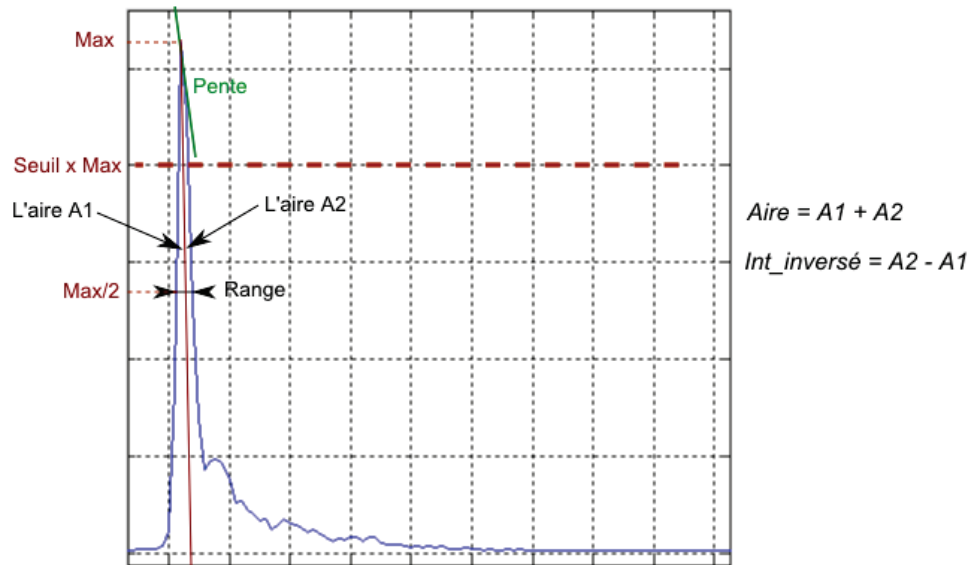
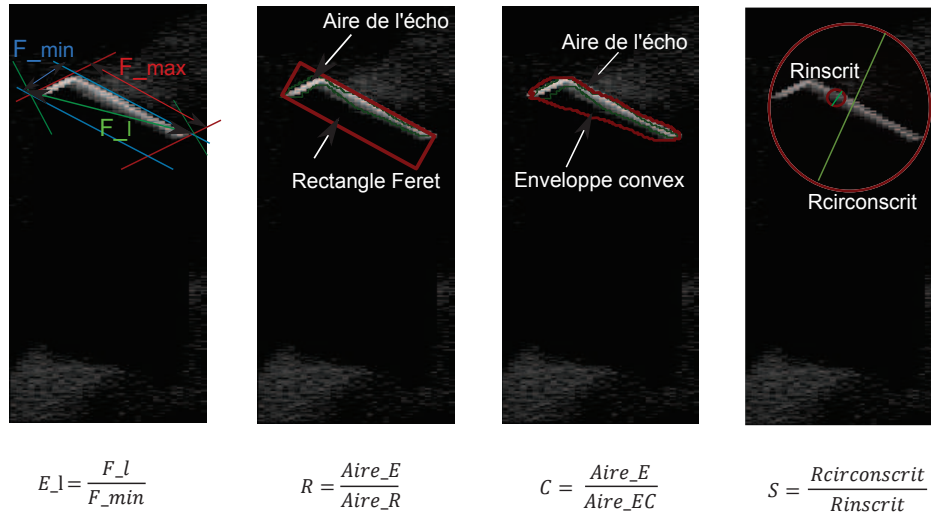


FIGURE 4.5: Représentation schématique de quelques descripteurs morphométriques et d'autres calculés sur l'A-scan

la taille et la forme de chaque particule [LB13].

Nous illustrons le calcul des descripteurs morphométriques et ceux calculés sur l'A-scan schématiquement par la figure 4.5.

Il semble que la sélection de descripteurs est d'autant moins performante que le nombre de classes est grand. Dans notre travail, la sélection de descripteurs à partir de l'ensemble de toutes les classes n'a pas donné des résultats concluants. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'utiliser une stratégie hiérarchique qui permet, à chaque itération (une ou plusieurs itérations), de faire la sélection entre la classe la plus probable C_1 et une des classes de l'ensemble A_i (paragraphe 5.3.2.4).

Pour chaque couple de classes ambiguës $(C_1, C_j)_{C_j \in A_i}$ les descripteurs les plus pertinents sont sélectionnés par AFD. Ensuite, nous utilisons un classificateur qui cherche le plus proche voisin (KNN tel que $K = 1$) et sélectionne une classe C_a . Ce classificateur renvoie une proportion L_a qui correspond à la classe la plus vraisemblable C_a . La classification est basée sur la mesure de la distance euclidienne entre les descripteurs centrés et réduits de l'individu inconnu et les descripteurs des individus de deux classes C_1 et C_j .

A ce stade nous disposons, d'une part, du résultat préliminaire (C_1, L_1) et, d'autre part, du résultat du KNN (C_a, L_a) . Puisque notre objectif est la vérification du résultat préliminaire par le résultat du KNN, la décision sera donc le couple $(C_1, 1)$ lorsque $C_a == C_1$. Sachant que le nombre de classes ambiguës peut dépasser deux classes, il faut donc définir une stratégie de fusion de différents résultats quand ce cas de figure survient.

Stratégie de fusion : plus de deux classes ambiguës :

Pour chaque test effectué sur les différents couples (C_1, C_j) , le classificateur KNN sélectionne une classe C_{aj} .

Pour fusionner ces différents résultats deux cas de figure se présentent :

1^{er} cas : $\forall j C_{aj} == C_1$

La décision finale est la classe C_1 après sa vérification par le classificateur KNN.

2^{ème} cas : $\exists j \text{ telque } C_{aj} \neq C_1$

Ce cas signifie que l'ambiguïté persiste.

Nous passons, dans ce cas, à l'enrichissement de la base d'apprentissage par des nouveaux gabarits.

4.4.3.2 Enrichissement de la base d'apprentissage

Cette approche consiste à corriger les ambiguïtés en ajoutant d'autres gabarits à l'ensemble de classes $C_1 \cup A_i$ [EBQZS13a]. Pour chaque classe, la stratégie d'ajout des gabarits dépend de deux facteurs : la symétrie de la forme de la classe et la configuration du gabarit G_{li} sélectionné pendant la phase 1.

Pour chaque classe de l'ensemble $C_1 \cup A_i$ nous vérifions si elle est à symétrie radiale. Dans ce cas, des gabarits sont générés pour différentes tailles dans un intervalle centré sur la taille du G_{li} . Dans le cas inverse, en plus de gabarits générés pour différentes tailles, d'autres seront générés pour différentes orientations dans un intervalle centré sur l'orientation du G_{li} .

Dans les deux cas, ces gabarits sont intégrés dans la base d'apprentissage et le filtrage adapté sera répété en se basant sur cette nouvelle base. Cette approche est intuitive, puisque tout gabarit supplémentaire ne fait qu'augmenter la probabilité de trouver la bonne classe. En fait, dans l'ensemble des gabarits ajoutés, le classificateur cherche celui

qui donne un coefficient de corrélation suffisamment plus élevé (au sens du même seuil S) et permet ainsi la discrimination entre les classes ambiguës (figure 4.6).

Algorithme d'ajout de gabarits

iteration = 0

While ($|L1 - Li| < S$) ou (*iteration* < 3)

If ($C1$ (ou Ci) est à symétrie radiale)

Intégrer des A-scans de la classe $C1$ (ou Ci) (pour différentes tailles dans un intervalle centré sur la présente taille).

Else

Intégrer des A-scans de la classe $C1$ (ou Ci) (pour différentes tailles et/ou orientations dans un intervalle centré sur la présente taille et/ou orientation).

End

Réappliquer le filtrage adapté

If ($|L1 - Li| \geq S$)

Classe = $C1$, Poids = $L1$

End

iteration = iteration + 1

End (de While)

FIGURE 4.6: Algorithme de la phase 2 : ajout de gabarits

Toutefois, cette approche n'est pas trop pratique du fait que l'algorithme est récursif et risque de ne pas converger. C'est la raison pour laquelle nous avons laissé l'ajout des nouveaux gabarits comme dernier recours après l'ajout de descripteurs.

La figure 4.7 illustre les deux phases de l'algorithme de classification : la phase 1 et l'amélioration par la phase 2 (ajout de descripteurs et enrichissement de la base d'apprentissage).

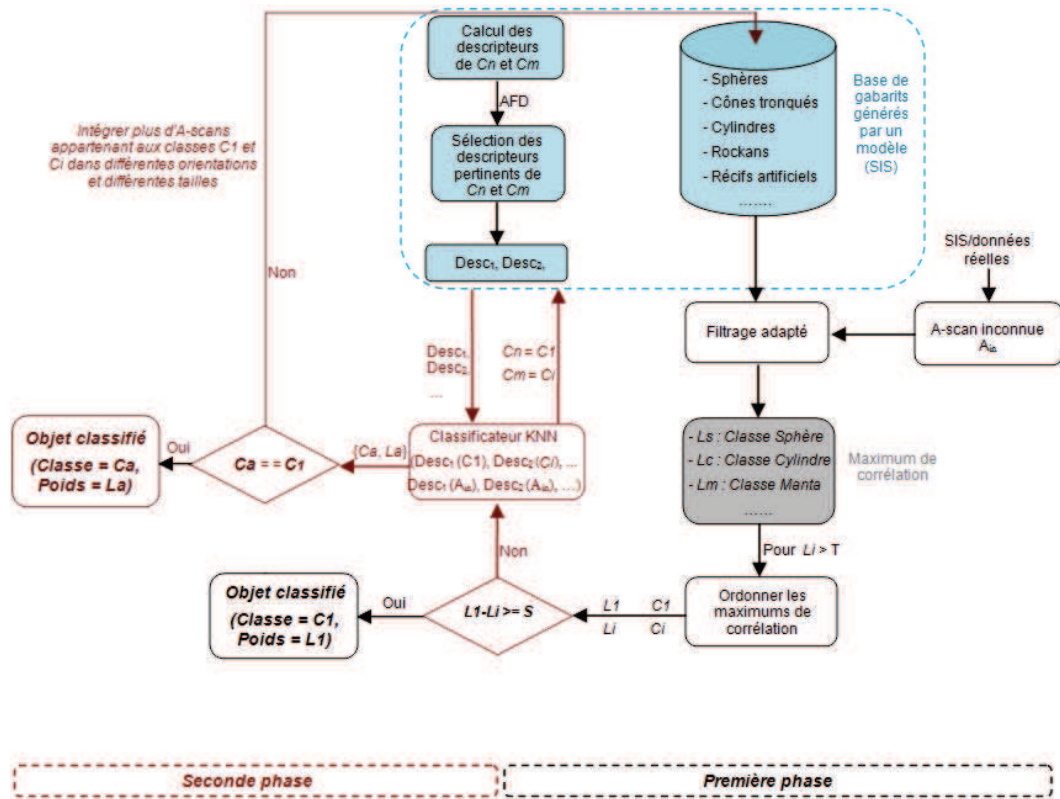


FIGURE 4.7: Diagramme de classification à 2 phases (Cas de deux classes ambiguës)

A_{in} est l'A-scan inconnu et le couple (C_n, C_m) désigne n'importe quel couple de classes dans la base d'apprentissage pour lequel une liste de descripteurs pertinents $Desc$ est sélectionnée au préalable par l'AFD afin de l'utiliser en cas d'ambiguïté entre la classe C_n et C_m .

Dans le cas où le nombre de classes ambiguës est supérieur à 2 (en général ne dépasse pas 3 classes), l'algorithme utilisé pour traiter les ambiguïtés est hiérarchique. En effet, si nous avons 3 classes ambiguës C_1 , C_2 et C_3 nous commençons par le couple (C_1, C_2) pour lequel nous appliquons l'algorithme KNN. Dans la suite, la même procédure est répétée pour le couple (C_1, C_3) . Il suffit qu'une des classes sélectionnées par le KNN soit différente de $C - 1$ pour que nous passons à l'ajout de gabarits en considérant l'ensemble initial de classes ambiguës.

4.5 Conclusion

La partie écho de la signature acoustique de cible a été concrètement utilisée dans une méthode de classification basée sur un modèle. Deux grandes phases forment ce classificateur : une phase de filtrage adapté et une phase de gestion d'ambiguïtés pour permettre une classification souple et assurer un maximum de fiabilité sur le résultat fourni. Le

résultat de classification obtenu est sous forme d'une liste ordonnée de classes avec un degré d'appartenance à chacune des classes.

L'utilisation de l'A-scan est un atout majeur qui renferme à la fois des informations géométriques et énergétiques de l'écho. Cependant, le bon déroulement de cette méthode est conditionné par la connaissance exacte des conditions opérationnelles dans lesquelles les images ont été acquises.

Les résultats d'expérimentation de cette méthode ainsi que quelques études des performances vont être présentées sur deux images sonar réelles et d'autres simulées dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Expérimentations et résultats

5.1 Introduction

La classification en se basant sur un modèle a un avantage majeur qui consiste à maîtriser tous les paramètres du problème. C'est, évidemment, un avantage quand on connaît les conditions opérationnelles avec précision mais aussi un inconvénient dans le cas contraire. Pour cette raison, les résultats et les remarques que nous allons présenter dans ce chapitre nécessitent certaines connaissances a priori (la distance entre l'objet et le sonar, la résolution de l'image et les paramètres opérationnels du sonar utilisé). Il s'agit donc d'une classification au cours de l'acquisition. Le filtrage adapté, ayant comme entrée les A-scans des différentes cibles, constitue la base de ce classificateur et ne rend pas un résultat binaire (0 ou 1). Cette approche, permet un résultat de classification plus souple qui peut être analysé par différents moyens.

Nous avons généré des A-scans synthétiques d'objets manufacturés pour former la base des gabarits du classificateur, certains d'entre eux ayant des formes complexes (mine Rockan, récifs artificiels).

Nous avons proposé, dans une seconde phase, deux moyens de lever les ambiguïtés éventuelles du premier résultat du filtrage adapté. Cette phase est basée, en premier lieu, sur des descripteurs et, en second lieu, sur l'enrichissement de la base d'apprentissage. Nous avons analysé l'apport de chacune de ces phases, dans le résultat final, pour deux échantillons pris dans deux configurations différentes.

5.2 Résultats de simulations

La scène est modélisée par un parallélépipède de 100m de longueur (axe des distances) et 10m de largeur (axe des gisements) et 30m de hauteur. La hauteur de l'eau égale à 30m

et la célérité est constante $c = 1500ms^{-1}$. Considérant un repère orthonormé $R(Oxyz)$, le sonar maintient une hauteur constante au-dessus du fond marin.

La géométrie de la scène a été donnée par la figure 3.19 dans le chapitre 3. Au total, 12 cibles sont modélisées (8 mines et 4 autres objets). Toutes les mines ont été modélisées en acier ($Cr = 0.96$), le cube et le récif en béton ($Cr = 0.68$) et le tore et l'ellipsoïde en caoutchouc ($Cr = 0.08$). Les cibles ont été placées à deux distances 20m et 43m. Les modèles géométriques des cibles utilisées dans ce travail sont présentés dans l'annexe A. Les dimensions des mines ont été obtenues à partir de la base Jane's [Jan]. Dans le reste de ce document les classes d'objets sont abrégées comme suit : mine sphérique (MS), mine cylindrique (MC), mine Manta (MM), mine Rockan (MR), récif artificiel (RA), mine Sigeel400 (SI), mine Rigeel (RI), mine Limpet (ML), mine Sepia (SE), le tore (TO), l'ellipsoïde (EL) et le cube (CU).

Cinq types de fond sont modélisés en utilisant cinq valeurs de $BS0$ (table 5.1) tirées des données empiriques de McKinney et Anderson [MA64].

La rétrodiffusion à partir de la surface de la mer, située à plus de 20m au-dessus de la source, peut être négligée car sa contribution sera extrêmement atténuée par les pertes de propagation.

5.2.1 Paramètres de configuration

Types de fonds :

	fond1	fond2	fond3	fond4	fond5
Sédiments	sable fin	rides de sable	vase	argile	roche
$BS0$ (en dB)	-23	-23	-27	-32	-15

TABLE 5.1: Types de fonds simulés

Tailles :

Cible (dimension)	size1	size2	size3	size4
MS (rayon r en m)	0.35	0.4	0.45	0.5
MC (longueur l en m)	1.06	1.32	1.85	2.1
RA (côté du cube c en m)	0.53	0.57	0.47	0.44

TABLE 5.2: Tailles des cibles

Orientations :

Rotation/Orientations	1	10	11	2	22	3	33	4	44	5	0
Autour de l'axe X (en rad)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	π
Autour de l'axe Y (en rad)	0	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0
Autour de l'axe Z (en rad)	0	0	0	$\frac{\pi}{6}$	$-\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$-\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	0

TABLE 5.3: Orientations des cibles

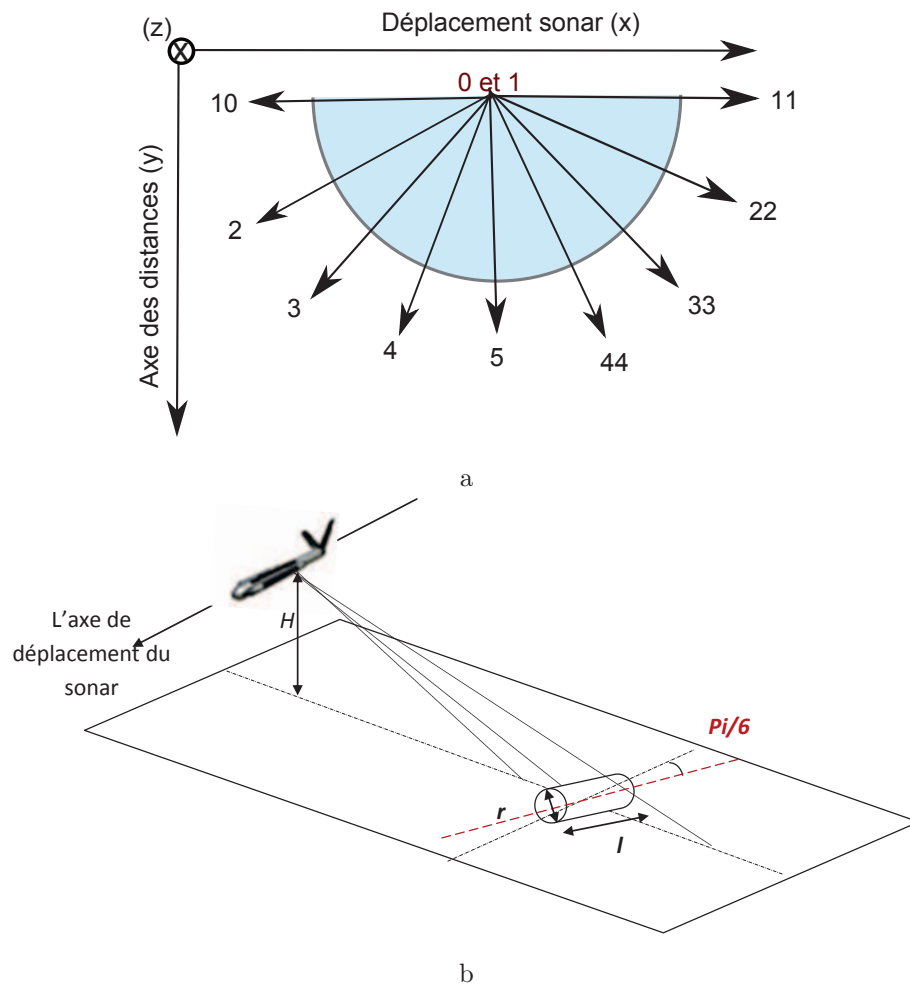


FIGURE 5.1: Représentations schématiques : (a) du cercle d'orientations en vue de dessus et (b) d'une mine cylindrique de rayon r et de longueur l dans l'orientation22 (mc-orientation22)

Paramètres opérationnelles du S3000 [JA] :

Durée de pulse : = $0.1ms$.

Fréquence centrale : $f_0 = 100kHz$.

Bande : $B = 60kHz$.

Résolution en distance : $\delta D = 0.07m$.

Résolution angulaire : $\delta = 0.5^\circ$.

La configuration de base de chaque cible suppose un fond sableux (fond1), une taille donnée par size1 et l'orientation1. Dans la suite si l'un de ces paramètres (type de fond, la taille ou l'orientation) n'est pas spécifié explicitement, c'est la configuration avec le paramètre de base (fond1, size1 et orientation1) qui est désignée.

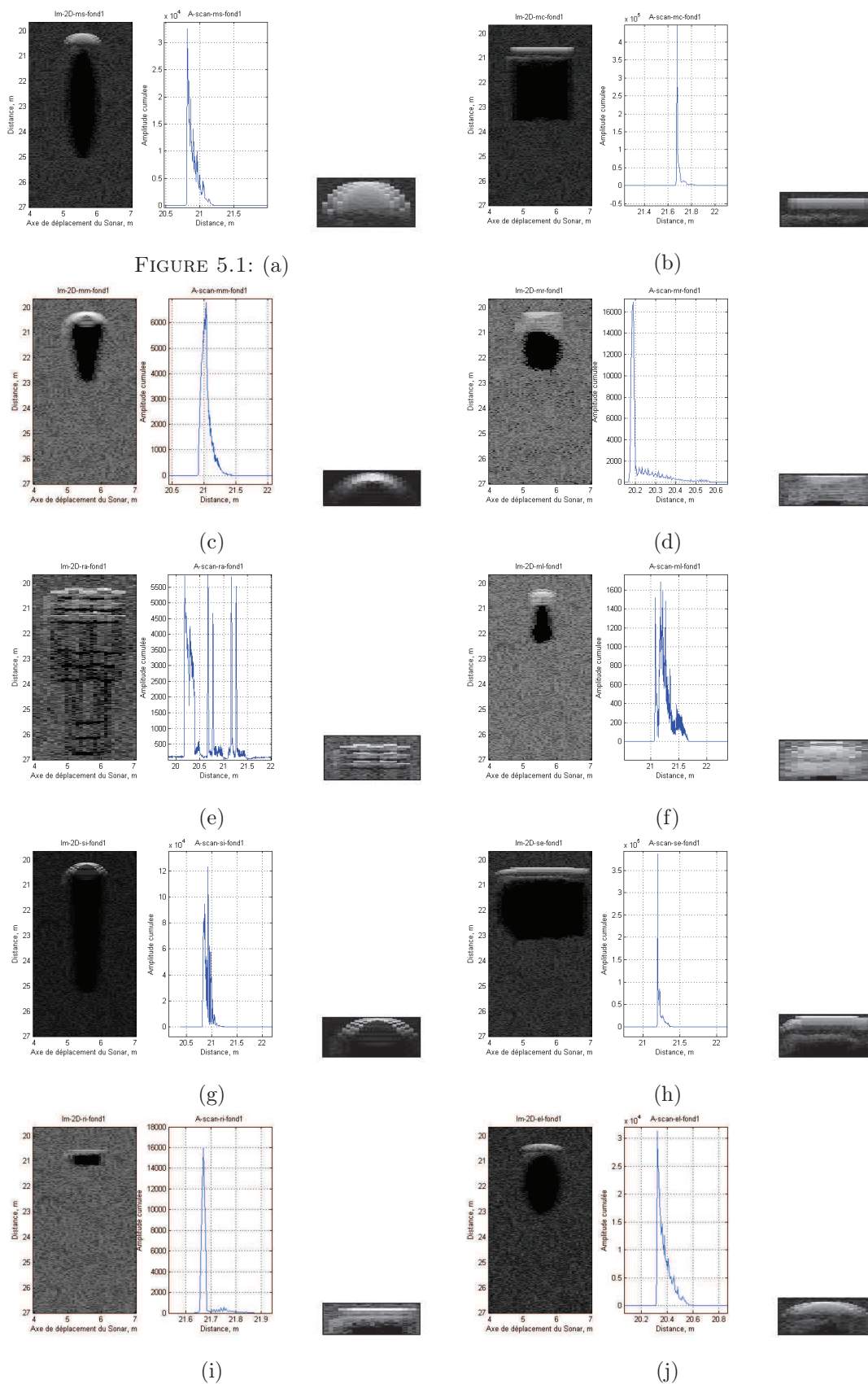
Le pas d'échantillonnage angulaire (les orientations du tableau 5.3) est plus grand que la valeur optimale donnée par l'étude faite par Groen (10°) [GCVE10]. Cet écart sera compensé par la phase 2 de la méthode de classification (paragraphe 4.4.3.2). En effet, pour les cibles non symétriques c'est principalement l'orientation qui va être variée en cas d'ambiguïté. Dans ce cas, le pas d'échantillonnage autour de la configuration ambiguë va être égal ou inférieur à 10° . De cette manière on garantit une classification rapide grâce à la phase 1 uniquement et une analyse plus approfondie, mais aussi plus lente, en cas d'ambiguïté (phase 2).

5.2.2 Modélisation des cibles

La dynamique des images 2D a été ajustée puisqu'en valeurs naturelles les réponses des cibles sont très élevées par rapport à celles du fond. L'amplitude cumulée est bien calculée à partir des données brutes mais les images 2D présentées ici sont en échelle logarithmique après avoir subi un ajustement de la dynamique. L'amplitude cumulée est en Watt.m^{-2} . En effet, c'est l'énergie en valeurs naturelles qui est cumulée avant d'appliquer les traitements décrits. La dynamique réelle de chaque réponse de cible est donnée à gauche de celle-ci, dans la figure 5.2.

Parmi les objets qui ont des formes géométriques complexes, on trouve le RA (type 2) composé d'un amas de cubes troués. La présence des trous rend à la fois la segmentation et la gestion des trajets multiples plus difficiles. Ceci s'est répercuté sur l'A-scan qui, contrairement à toutes les autres cibles modélisées dans ce travail, contient plusieurs pics au lieu d'un seul pic.

Certaines cibles présentées dans la figure 5.2 ont des formes géométriques plus ou moins similaires. Ceci est visible aussi bien sur les images 2D que sur leurs A-scans. Par exemple, les figures 5.2 (a) et 5.2 (j) correspondent, respectivement, à une sphère d'un rayon $0.435m$ et un ellipsoïde allongé dont les axes mesures $1.06m$ et $0.53m$. Ce dernier est placé tel que l'axe principal est parallèle à l'axe des gisements. Ces deux objets sont placés quasiment à la même distance (leurs centres sont exactement dans le même point), ce qui explique que la valeur maximale d'énergie cumulée sur les deux A-scans est la même. La différence entre le petit axe de l'ellipsoïde (selon l'axe des distances) et le diamètre de



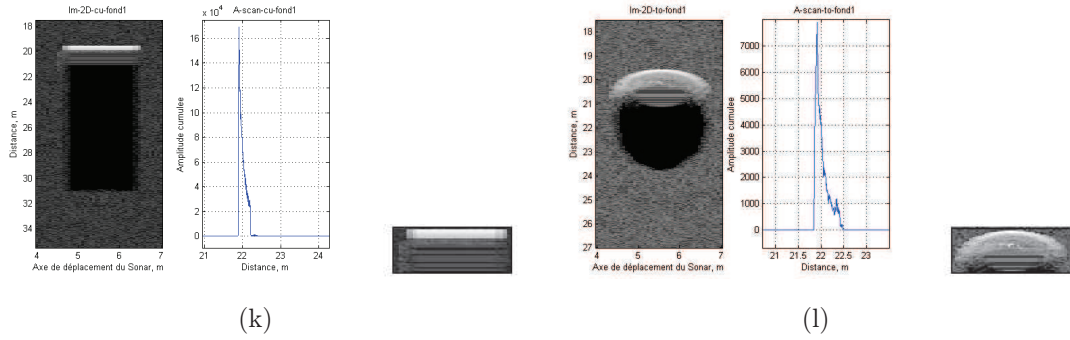


FIGURE 5.2: Images 2D et leurs A-scans simulés sur un fond sableux (altitude du sonar est $6m$ et la distance entre l'objet et le sonar est $20m$) pour : MS (a), MC (b), MM (c), MR (d), RA (e), ML (f), SI (g), SE (h), RI (i), EL (j), CU (k), TO (l)

la sphère peut être déduit à partir de l'A-scan. En effet, on a défini dans le paragraphe 4.4.3.1 (table 4.1) l'étalement de l'A-scan E . Sur l'A-scan de la sphère $E_{MS} = 0.46m$ et sur l'A-scan de l'ellipsoïde $E_{EL} = 0.29m$. Théoriquement, les valeurs de E_{MS} et E_{EL} doivent être égales, respectivement, au rayon de la sphère $0.435m$ et à la demi longueur du petit axe de l'ellipsoïde $0.265m$. La légère déviation de ces valeurs par rapport aux valeurs théoriques est due à la contribution des trajets multiples. Ce même descripteur peut être calculé sur d'autres A-scans d'objets de forme simples tels que la mine Manta (cône tronqué) ou la mine Rigeel (parallélépipède) où l'étalement est égal, respectivement, à $0.5m$ et $0.08m$. Ces deux valeurs donnent une idée sur le rayon du cône tronqué et la hauteur du parallélépipède (voir Annexe A).

5.2.3 Modélisation des fonds

Pour chaque type de fond est associé un indice de rétrodiffusion $BS0$ du sédiment qui le compose. Quand la variance des pixels de la zone du fond est grande, l'image 2D aura un aspect plus bruité (granulaires) qui correspond au bruit de Rayleigh (speckle) qui est généré au cours de la formation de l'image par interférences entre les réponses des micro-diffuseurs (facettes dont l'aire est très petit par rapport à la longueur d'onde).

Nous avons choisi d'illustrer l'effet du type de fond sur une cible cylindrique vue par le travers (figure 5.4) puisqu'elle a généralement une réponse très simple dans des conditions optimales (fond plat, objet non enfoui).

En effet, l'effet du type de fond sur la réponse de la cible se résume dans deux effets : les trajets multiples (dépendent à la fois des reliefs du fond, de la position de l'objet par rapport à celui-ci et de son indice de rétrodiffusion) et la complexité de segmentation en cas des fonds complexes (figure 5.3).

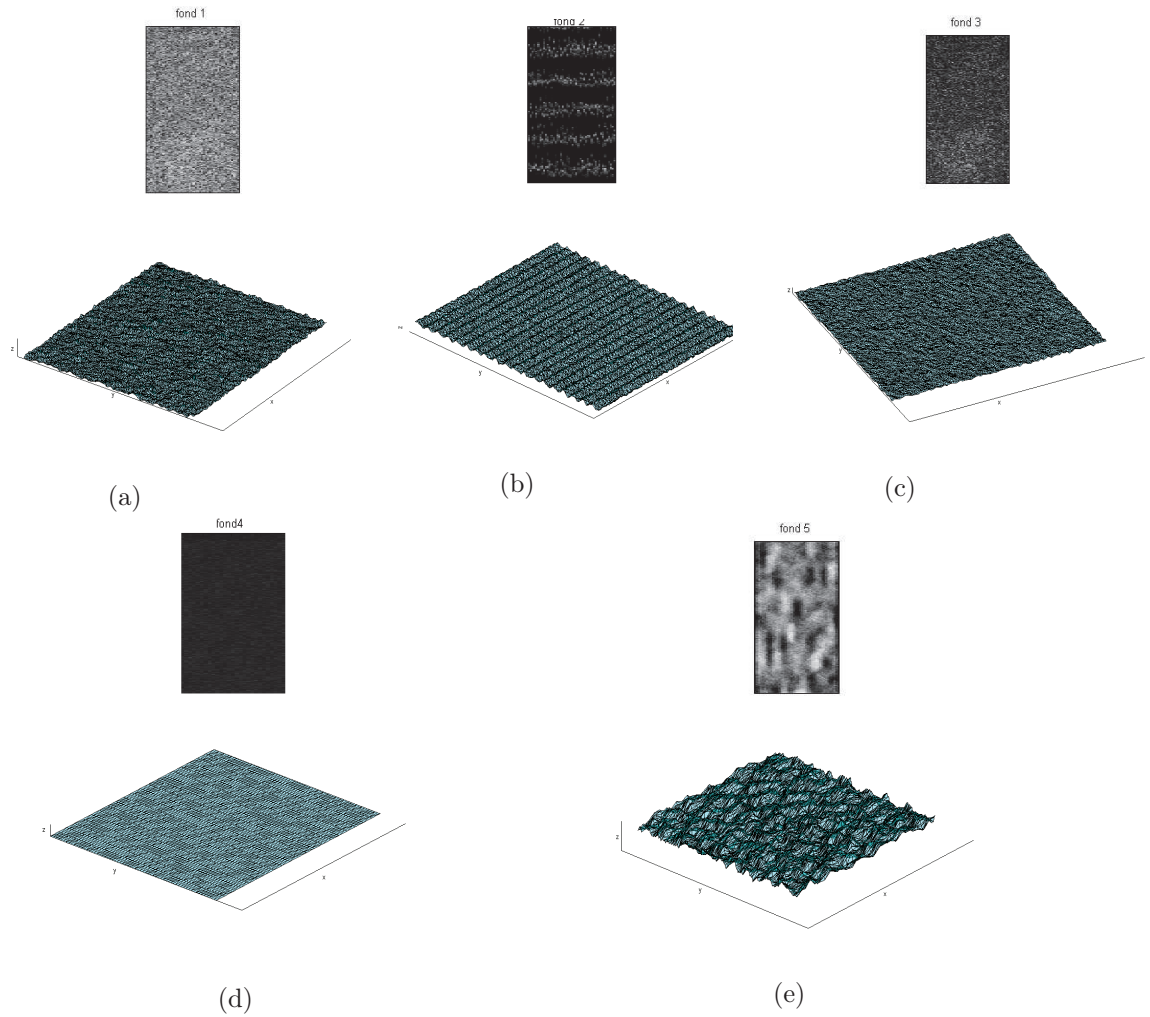


FIGURE 5.3: Exemples de simulation de différents types de fonds et leurs représentations 3D respectifs : Sable (a), Rides de sable (b), Vase (c), Argile (d), Roche(e)

5.2.4 Prise en compte de l'orientation

Pour illustrer l'effet de l'orientation sur l'A-scan, nous nous sommes placés dans les mêmes conditions décrites ci-dessus (une cible cylindrique vue par le travers, fond plat, objet non enfoui). Dans la figure 5.5, il existe des A-scans du cylindre très différents les uns des autres en fonction de l'orientation de celui-ci. Les plus simples correspondent à l'orientation1 (vue de travers) et 5 (vue par l'extrémité). Pour les autres orientations, l'arrivée des pics secondaires décalés dans le temps complexifie la réponse du cylindre.

5.3 Résultats de la classification

Dans la partie classification nous allons considérer seulement 5 objets manufacturés pour valider notre méthode de classification. Les 5 objets sont 4 mines (MS, MC, MR et MM)

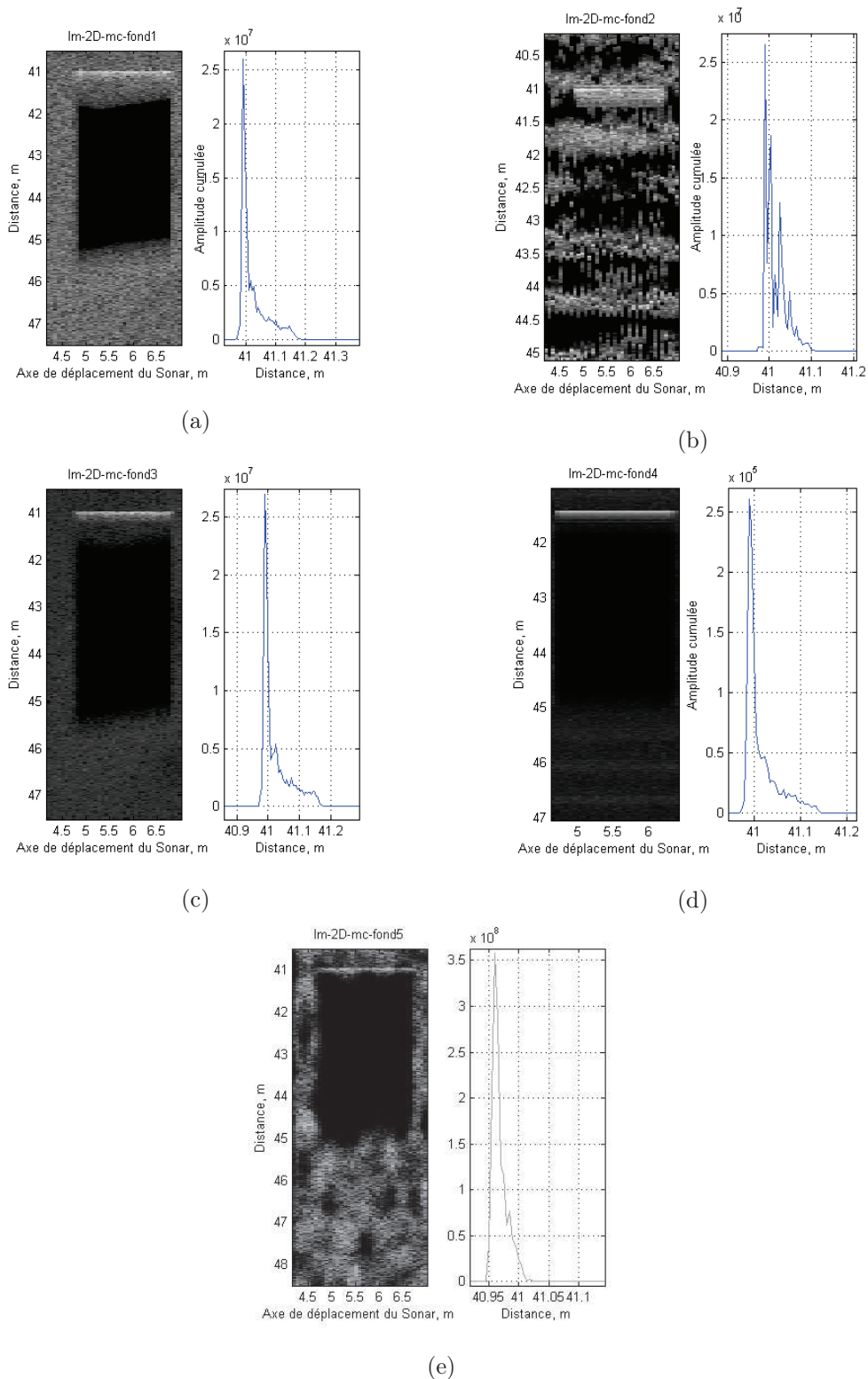


FIGURE 5.4: Effets du type de fond sur les images 2D et A-scans simulés d'un cylindre (diamètre=0.53, longueur=1.6 m) à une distance égale à 42m : Sable (a), Rides de sable (b), Vase (c), Argile (d), Roche (e)

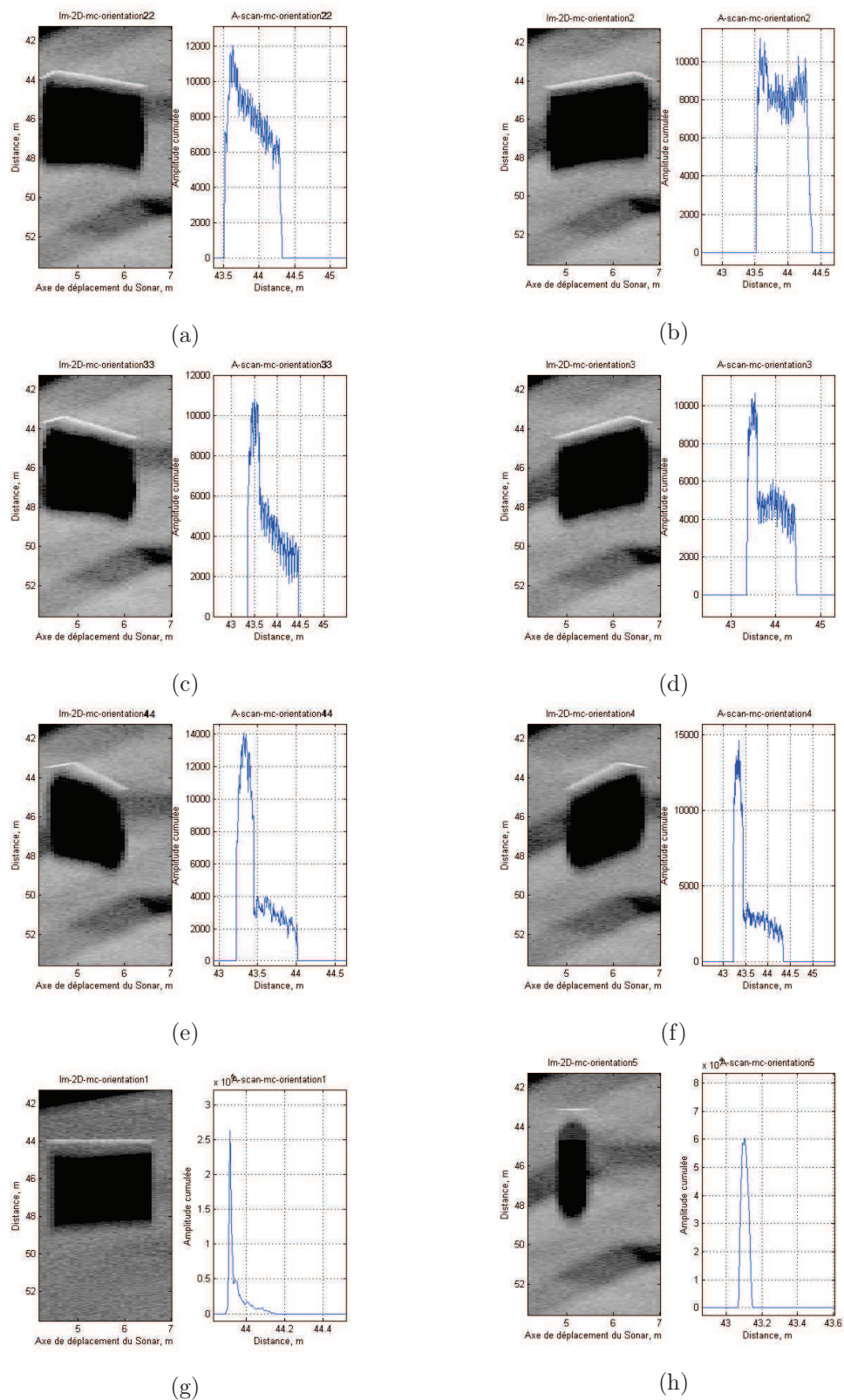


FIGURE 5.5: Effets de l'orientation de la cible par rapport au sens de déplacement de sonar sur les images 2D et A-scans simulés d'un cylindre (diamètre=0.53, longueur=1.6 m) à une distance de 45m : orientation22 (a), orientation2 (b), orientation33 (c), orientation3 (d), orientation44 (e), orientation4 (f), orientation1 (g), orientation5 (h)

et un objet non mine (RA)(figure 5.6).

Nous disposons d'un total de 100 images sonar (2 réelles et 98 simulées). 20 scénarios (5 types de fond et 4 tailles différentes) pour la MS, 10 scénarios (5 types de fond et 2 orientations) pour la MM.

Afin que les effectifs de classes soient proches les uns des autres, pour la MC, la MR et le RA, nous n'avons gardé que les scénarios où on fait varier un seul paramètre à la fois (le type de fond ou la taille ou l'orientation) en partant d'une configuration de base. Les configurations de base sont les suivantes : la MC de longueur $l = 1.56m$ sur le fond1 et dans l'orientation1, la MR sur le fond1 et dans l'orientation1 et le RA de côté $c = 0.5m$, sur le fond1 et dans l'orientation1. Par conséquent, nous aurons 17 scénarios pour la MC (5 types de fond, 4 longueurs et 8 orientations différentes), 23 scénarios pour la MR (5 types de fond et 18 orientations) et 27 scénarios pour le RA (5 types de fond, 4 tailles et 18 orientations). Tous les gabarits simulés sont deux à deux distincts. C'est à dire pour deux scénarios de la même classe, il y a une différence ou bien dans le type de fond ou bien la taille ou bien l'orientation de la cible.

La plupart des données de test utilisées pour cette évaluation sont simulées, mais nous allons montrer aussi quelques résultats sur deux images réelles contenant une mine sphérique et une mine Rockan.

Les données réelles sont la propriété du GESMA et ont été obtenues lors d'une opération commune entre GESMA et DERA faite sur un rail près de Lanvéoc (France) en 1998 [SGH⁺03].

Le système utilisé était monté sur un rail légèrement incliné vers le bas (6°). Le signal émis est un LFM (impulsion à modulation de fréquence linéaire), la durée d'impulsion est de 4 ms, et la largeur de la bande est 60 kHz allant de 120 kHz à 180 kHz.

Ayant la résolution des pixels de ces images (1pixel = 4cm) et la fauchée (entre 40m et 60m) nous avons pu déduire la distance qui sépare les cibles du sonar qui est égal à 45m.

5.3.1 Résultats de la corrélation (phase 1 de l'algorithme) sur des images réelles

Pour simuler les gabarits nous avons reproduit les informations opérationnelles par notre simulateur SIS et nous avons placé les différents modèles d'objets à la distance exacte en faisant varier le type de fond, la taille et éventuellement l'orientation (selon l'objet). Les images sonar sélectionnées par le classificateur sont, respectivement, le sphère de rayon 0.5m et la Rockan dont l'axe majeur est perpendiculaire à l'axe des gisements (orientation5).

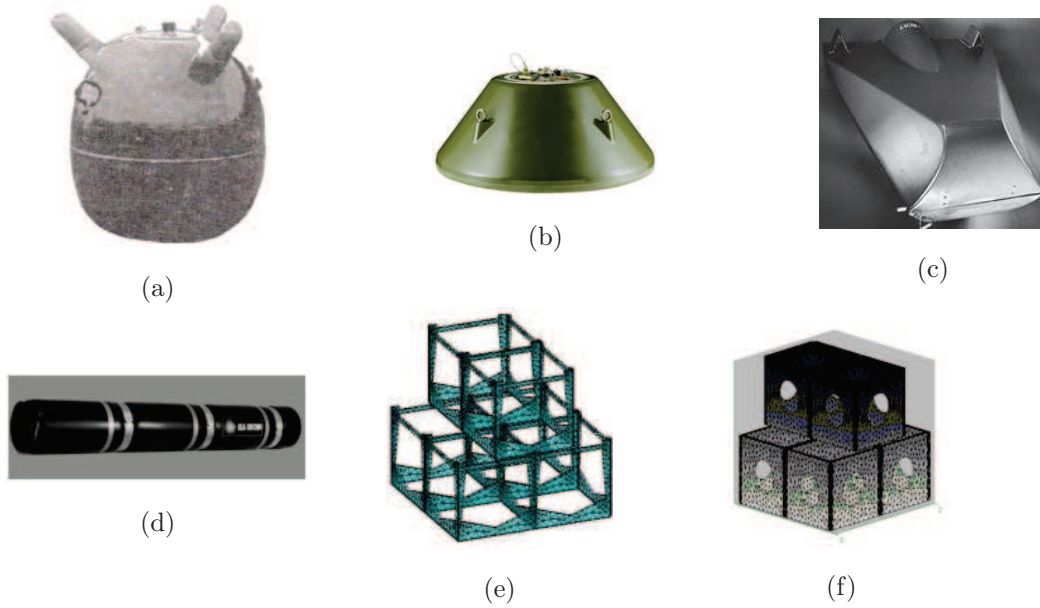


FIGURE 5.6: Ensemble des cibles de la classification : (a) Mine sphérique, (b) Mine Manta, (c) Mine Rockan, (d) Mine cylindrique, (e) Récif Artificiel (type 1), (f) Récif artificiel (type 2)

Classes / Poids	Rang1	Rang2	Rang3	Rang4	Rang5
Mine sphérique	MS/0.76	MC/0.71	MM/0.71	MR/0.7	RA/0.6
Mine Rockan	MR/0.86	MM/0.73	MC/0.71	MS/0.65	RA/0.64

TABLE 5.4: Résultats de classification des données réelles GESMA/DERA

Nous montrons sur les figures 5.7 et 5.9 les images réelles en 2D (a) et leurs A-scans correspondants (b) et sur les figures 5.8 et 5.10 ceux sélectionnés par le classificateur . Ces données réelles sont correctement classifiées, en utilisant uniquement la phase 1 de l'algorithme, mais leur nombre insuffisant ne permet pas de donner un taux moyen de bonne classification. Ce bon résultat est dû à la connaissance de la plupart des conditions opérationnelles dans lesquelles ces images ont été acquises. Ce sont les hypothèses que nous avons fixées pour le bon fonctionnement de notre méthode.

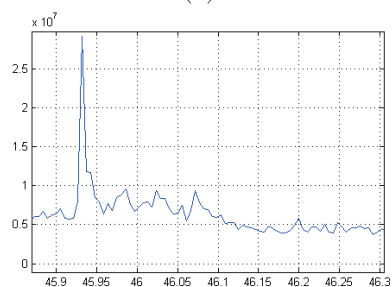
5.3.2 Résultats de la corrélation sur des images simulées (phase 1 de l'algorithme)

5.3.2.1 Configurations des données

Les deux configurations (1) et (2) ont des paramètres en commun qui sont les paramètres opérationnels du sonar S3000 (paragraphe 5.2.1) et ne diffèrent que par la géométrie de



(a)

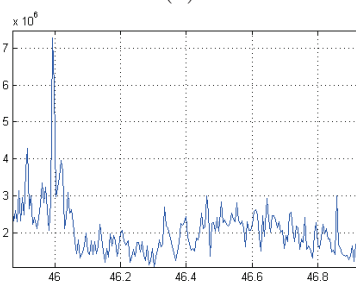


(b)

FIGURE 5.7: Image sonar réelle d'une cible sphérique : (a) image 2D, (b) A-scan

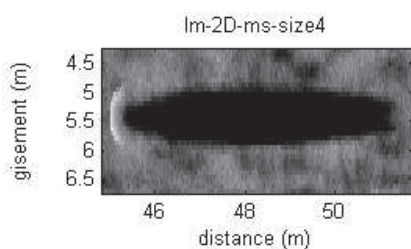


(a)

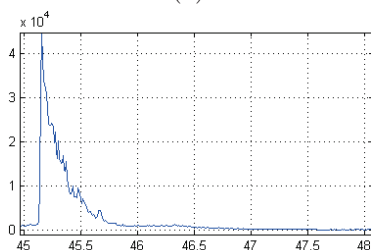


(b)

FIGURE 5.8: Image sonar réelle d'une mine Rockan : (a) image 2D, (b) A-scan

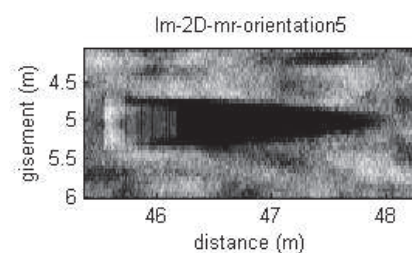


(a)

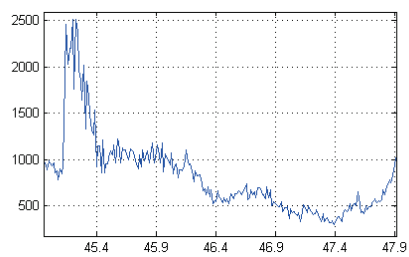


(b)

FIGURE 5.9: Image de le sphère sélectionnée : (a) image 2D, (b) A-scan



(a)



(b)

FIGURE 5.10: Image de la mine Rockan sélectionnée : (a) image 2D, (b) A-scan

deux scènes.

– **Configuration (1)**

Altitude du sonar : $H = 5\text{m}$.

Distance Sonar-Objet : $D = 20\text{m}$.

Début de portée : $d_{\min} = 10\text{m}$.

Fin de portée : $d_{\max} = 50\text{m}$.

– **Configuration (2)**

Altitude du sonar : $H = 6\text{m}$.

Distance Sonar-Objet : $D = 43\text{m}$.

Début de portée : $d_{\min} = 40\text{m}$.

Fin de portée : $d_{\max} = 60\text{m}$.

5.3.2.2 Définitions des états possibles de l'algorithme

Le processus de classification (figure 4.7) présente 6 scénarios possibles où chacun correspond à une sortie décrite par les états suivants :

- Etat -1 : Une mauvaise classification suite à la phase 1 de l'algorithme. La non détection d'ambiguïté n'autorise pas le passage à la phase 2.
- Etat 0 : Détection d'ambiguïté dans le résultat de la phase 1.
- Etat 1 : Une bonne classification suite à la phase 1.
- Etat 2 : Une ambiguïté levée par les descripteurs introduits dans la phase 2.
- Etat 3 : Une ambiguïté qui n'a pu être levée que par l'ajout de nouveaux gabarits.
- Etat 4 : Une ambiguïté qui n'a pas pu être levée et donne lieu à une mauvaise classification à la fin de la phase 2.

Nous avons testé 2 ensembles d'images à 2 distances différentes (configurations (1) et (2)).

5.3.2.3 Résultats à courte distance

Nous présentons dans le tableau 5.5 les résultats de la classification pour un échantillon (ECH1) des données de test simulées dans la configuration (1). Pour chaque élément, une liste ordonnée de classes et leurs poids sont fournis. Nous avons sélectionné un sous-échantillon de l'échantillon ECH1 de telle manière que les résultats présentés dans le tableau 5.5 illustrent les différents états (objet bien classifié, objet mal classifié, ambiguïtés levées ou non levées).

L'objet de la ligne 6 du tableau 5.5 ne présente pas d'ambiguïté à l'issue de la phase 1

Classes / Poids	Rang1	Rang2	Rang3	Rang4	Rang5
Etat 1					
1 Sphère (size1)	MS/0.97	RA/0.9	MC/0.89	MM/0.83	MR/0.76
1 Manta (fond1)	MM/0.99	MC/0.93	RA/0.92	MS/0.86	MR/0.85
1 Cylindre (orientation2)	MC/0.99	MR/0.87	RA/0.83	MM/0.74	MS/0.54
1 Rockan (orientation33)	MR/0.98	RA/0.92	MC/0.85	MM/0.68	MS/0.53
1 Récif artificiel (orientation4)	RA/0.99	MR/0.93	MC/0.83	MM/0.82	MS/0.53
Etat -1					
1 Manta (orientation0)	MR/0.9	MC/0.84	RA/0.82	MM/0.82	MS/0.65
Etat 0 (ambiguïtés)					
1 Rockan (orientation3)	MR/0.98	RA/0.94	MM/0.89	MC/0.81	MS/0.61
1 Récif artificiel (orientation3)	RA/0.86	MR/0.83	MC/0.82	MM/0.8	MS/0.63
1 Cylindre (orientation44)	MM/0.93	MR/0.9	MC/0.9	RA/0.89	MS/0.84
1 Rockan (fond2)	RA/0.93	MM/0.89	MC/0.87	MR/0.84	MS/0.78

TABLE 5.5: Phase 1 de classification pour un échantillon (ECH1) des données simulées

de l'algorithme de classification au sens du seuil S . En fait, cet objet était mal classifiée puisque c'est une configuration un peu exceptionnelle : mine Manta renversée (figure 5.11). En effet, les images introduites au classificateur sont uniques (deux à deux disjointes), on ne peut jamais trouver deux images, exactement, avec les mêmes paramètres et la même configuration dans l'ensemble de test et celui d'apprentissage. Deux solutions peuvent être proposées pour ce cas. La première est d'augmenter le seuil S pour pouvoir accéder à la phases 2 de l'algorithme. Cette solution n'a pas été retenue puisque le seuil S a été fixé d'une manière empirique qui dépend de la majorité des configurations et dans le but de voir la contribution de chaque phase à part (filtrage adapté, ajout des descripteurs et enrichissement de la base d'apprentissage). La deuxième solution consiste à simuler davantage d'images pour ces configurations (orientations) mais en respectant toujours l'unicité des images introduites c'est-à-dire simuler d'autres images dans la même orientation mais avec des dimensions différentes ou sur d'autres types de fond. Cette solution est privilégiée puisqu'elle ne dépend que de la configuration en question et aura un apport certain grâce à l'enrichissement de la base d'apprentissage.

Après l'ajout de gabarits cette situation n'est plus présente et l'état de la ligne 6 est passé de -1 à 1. Les 4 dernières lignes du tableau 5.5 (Etat 0) montrent de très faibles différences entre les deux (lignes 7, 8 et 10) ou les trois (ligne 9) premiers coefficients de corrélation les plus élevés et mettent en cause la fiabilité du résultat proposé. Ces ambiguïtés correspondent aux configurations suivantes :

1^{er} Cas : il y a une concurrence entre les deux classes MR et RA. Les deux éléments de deux classes ont la même orientation (orientation4).

2^{ème} Cas : il y a une concurrence entre les deux classes MR et RA. Les configurations se diffèrent par leurs orientations (orientation44) et (orientation4).

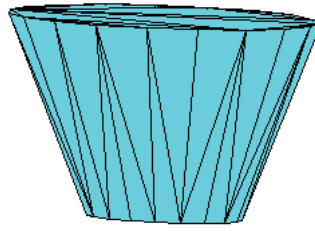


FIGURE 5.11: Un modèle d'une mine Manta renversée

Etats 1, 2, 3 et 4					
(0->2)1 Rockan (orientation3)	MR/0.98	RA/0.94	MM/0.89	MC/0.81	MS/0.61
(0->2)1 Récif artificiel (orientation3)	RA/0.99	MR/0.88	MC/0.82	MM/0.8	MS/0.63
(0->3)1 Cylindre (orientation44)	MC/0.99	MM/0.93	MR/0.9	RA/0.89	MS/0.84
(0->4)1 Rockan (fond2)	MM/0.99	RA/0.93	MC/0.87	MR/0.84	MS/0.78

TABLE 5.6: Phase 2 de classification pour l'échantillon (ECH1) des données simulées

3^{ème} Cas : il y a une concurrence entre les trois classes MM, MR et MC. Les configurations sont respectivement (fond2), (orientation5) et (orientation4).

4^{ème} Cas : il y a une concurrence entre les deux classes RA et MM. Les configurations sont respectivement (size2) et (fond2).

Pour ces 4 cas d'ambiguïté, nous présentons, dans le tableau 5.6, l'état de chaque cas après la phase 2.

Dans le 1^{er} et le 2^{ème} cas, la deuxième classe plus probable est la classe RA et la différence entre les coefficients de corrélation (L1-L2 dans le tableau 5.5) est égale à 0.05 et 0.02, respectivement, dans le 1^{er} et le 2^{ème} cas. Par conséquent, nous avons proposé d'intégrer la seconde phase afin de confirmer ou d'infirmer le choix fait par la première phase de l'algorithme.

Dans le 3^{ème} cas, la deuxième et la troisième classes plus probables sont la classe MR et la classe MC qui ont le même coefficients de corrélation. La différence entre leurs coefficients respectives (L2 et L3), d'une part, et le coefficient le plus élevé L1, d'autre part, est égale à 0.03 (tableau 5.5).

L'ajout de gabarits corrige la mauvaise classification du Cylindre (dans le 3^{ème} cas). En fait, dans l'ensemble des gabarits ajoutés, le classificateur trouve la bonne orientation du cylindre qui donne un coefficient de corrélation suffisamment plus élevé (tableau 5.6) et permet ainsi la discrimination entre la classe MC d'un côté et la MM ou la MR de l'autre côté.

Le tableau 5.6 montre l'apport de l'intégration de cette phase pour les mêmes entrées que le tableau 5.5.

Dans la suite, nous illustrons ces différents scénarios sur les images sonar simulées de l'échantillons (ECH1).

– Exemples de bonnes et de mauvaises classifications

Dans le cas de bonne classification dès la phase 1 (Etat 1), nous présentons les images tests et leurs A-scans correspondants par rapport à ceux sélectionnés par le classificateur (figure 5.12).

La figure 5.13 montre les exemples de la mauvaise classification dans l'échantillon ECH1 (Etat 4).

Dans le cas d'une ambiguïté qui a été levée soit par l'ajout des descripteurs ou bien par l'enrichissement de la base d'apprentissage (Etats 2 et 3), nous présentons le processus qui a permis de distinguer les classes et d'aboutir au final à une bonne classification, respectivement, dans les figures 5.14 et 5.15.

5.3.2.4 Apport de la deuxième phase à courte distance

En total, lors de la première phase, 29 cas d'ambiguïté ont été détecté. La plupart des ambiguïtés ont été enregistrées entre les couples : MR/RA (12 cas), MM/MR (6 cas) puis MM/MC (5 cas). 19 cas (65% des cas d'ambiguïtés) ont gardé la décision initiale de l'algorithme qui a été validée par le classificateur KNN basé sur les descripteurs définis dans le paragraphe 4.4.3.1.

– Apport des descripteurs

Toutes les ambiguïtés MR/RA ont passé de l'Etat 0 à l'Etat 2 grâce à l'ajout des descripteurs. Pour les deux autres couples (MM/MR et MM/MC) 5 cas ont été vérifiés (Etat 0 -> Etat 2) grâce à l'ajout des descripteurs.

Pour ces 3 couples de classes, les descripteurs qui ont été sélectionnés (dits pertinents dans la figure 5.14) grâce à l'AFD (paragraphe 4.4.3) sur l'ensemble des descripteurs sont les suivants :

– MR/RA :

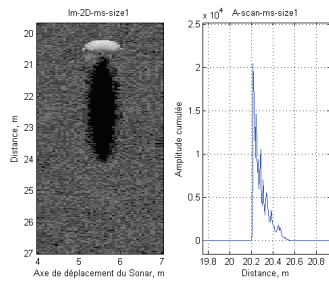
1. Sum_hist
2. Range
3. F_max

– MM/MR :

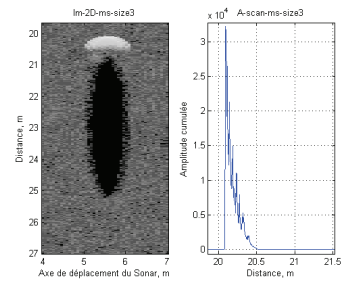
1. Range
2. Sum_hist
3. Perimeter
4. F_max

– MM/MC :

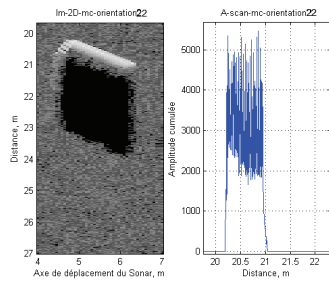
1. Aire 1D
2. Variance 2D
3. Int_inversé
4. Pente



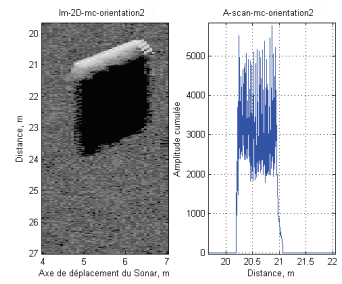
(a1)



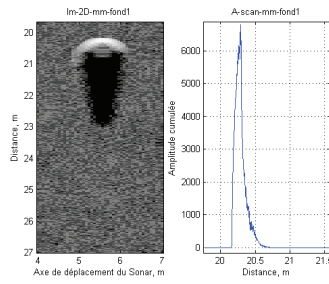
(b1)



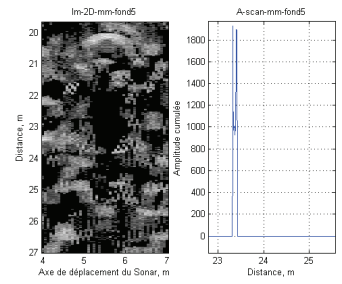
(a2)



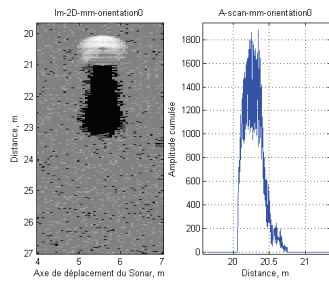
(b2)



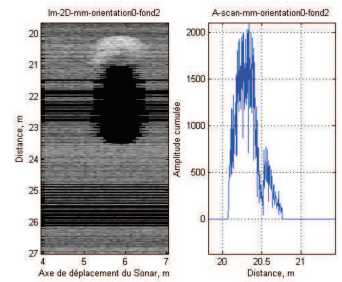
(a3)



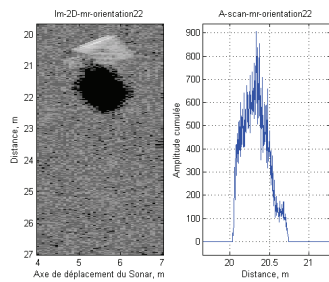
(b3)



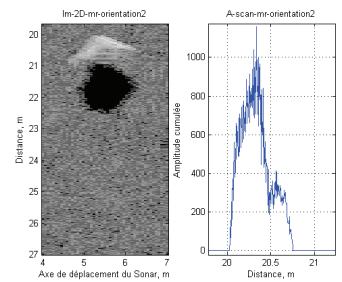
(a4)



(b4)



(a5)



(b5)

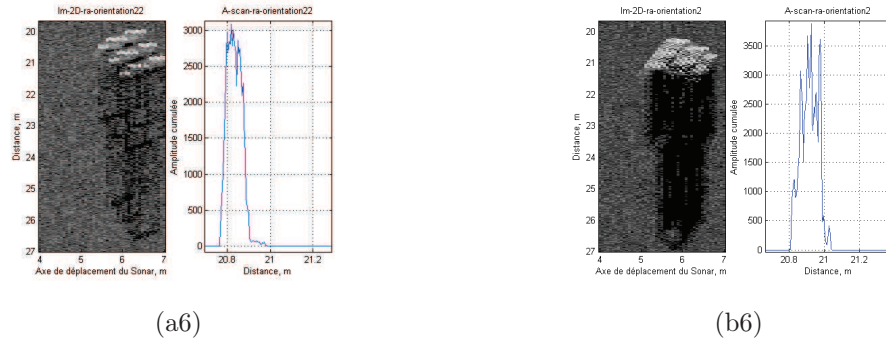


FIGURE 5.12: images tests (a) et images sélectionnées (b) (ainsi que leurs A-scans) à une distance objet-sonar égale à $20m$. (1) Sphère, (2) Cylindre incliné, (3) Manta, (4) Manta renversée, (5) Rockan, (6) Récif artificiel incliné.

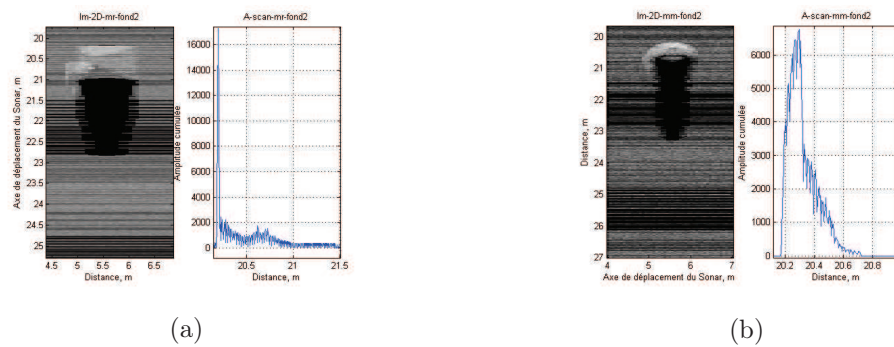


FIGURE 5.13: Cas d'une mauvaise classification : (a) mine rockan (fond2) et (b) l'image sélectionnée est celle d'une mine Manta (fond 2).

En se basant sur cette liste de descripteurs, nous avons pu remarquer que pour la plupart des cas d'ambiguïtés, les descripteurs calculés sur l'A-scan (Sum_hist, Range, et Aire 1D) ont un pouvoir plus discriminants pour distinguer ces 3 couples de classes.

– Apport des nouveaux gabarits

24% (7 cas) ont été corrigés grâce à l'ajout de nouveaux gabarits. En effet, c'est le cas quand les classes confondues sont MM/MR ou MM/MC. Ceci est dû à la non efficacité des descripteurs pour distinguer entre la classe MM, d'une part, et les classes MC ou MR, d'autre part. Par contre, les nouveaux gabarits pour ces classes vont enrichir la base d'apprentissage en variant surtout les orientations (pour la MC et la MR ayant des formes géométriques non symétriques tous les deux).

Au final, 90% des ambiguïtés ont été levées grâce à la phase 2 mais il reste 10% (3 cas) dans l'état 4. La cause de la mauvaise classification, pour quelques unes (mine Rockan sur un fond de type 2), était liée à des problèmes de segmentation.

5.3.2.5 Résultats à plus grande distance

Dans ce paragraphe, nous allons montrer quelques résultats de classification pour la même échantillon (ECH1) dans la configuration (2). Dans la suite, cet échantillon sera

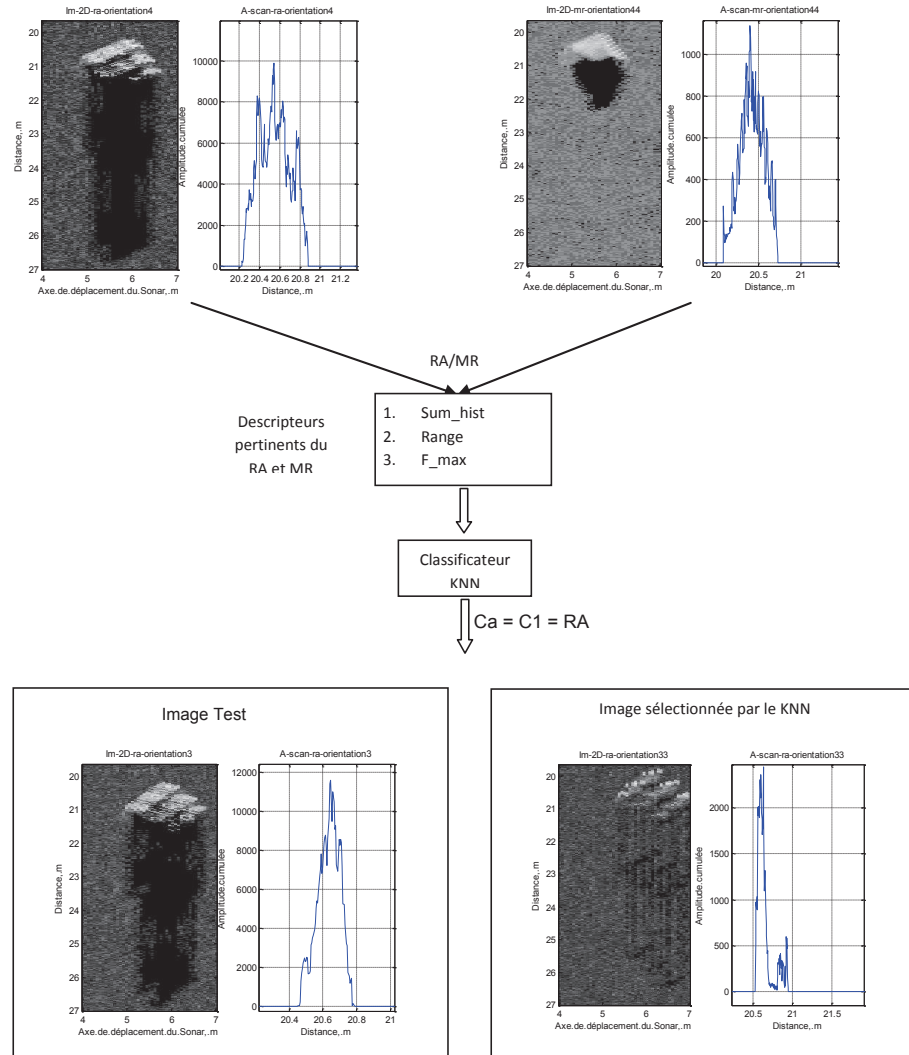


FIGURE 5.14: Processus de correction d’une ambiguïté dans ECH1 (Etat 0 -> Etat 2) : 2^{ème} cas

désigné par ECH2. Puisque que notre objectif consiste à comparer les résultats à 2 distances différentes afin d’essayer de généraliser nos observations à d’autres distances, nous allons insister sur les différences et les similitudes entre ces deux cas.

Nous n’allons pas refaire toute l’analyse mais nous nous limiterons à l’analyse des ambiguïtés et la contribution de chacune des phases de l’algorithme de classification.

5.3.2.6 Apport de la deuxième phase à grande distance

– Cas d’ambiguïtés et descripteurs discriminants

29 cas d’ambiguïté ont été détectés pour ECH2 aussi (exactement comme pour ECH1 à 20m). Par contre, la plupart des ambiguïtés ont été enregistrées entre les couples : MR/MC (14 cas), MM/MC (7 cas) puis MR/MM (4 cas). 17 cas ont gardé la décision initiale de l’algorithme (Etat 0 -> Etat 2) après la vérification du résultat par les descripteurs sélectionnés.

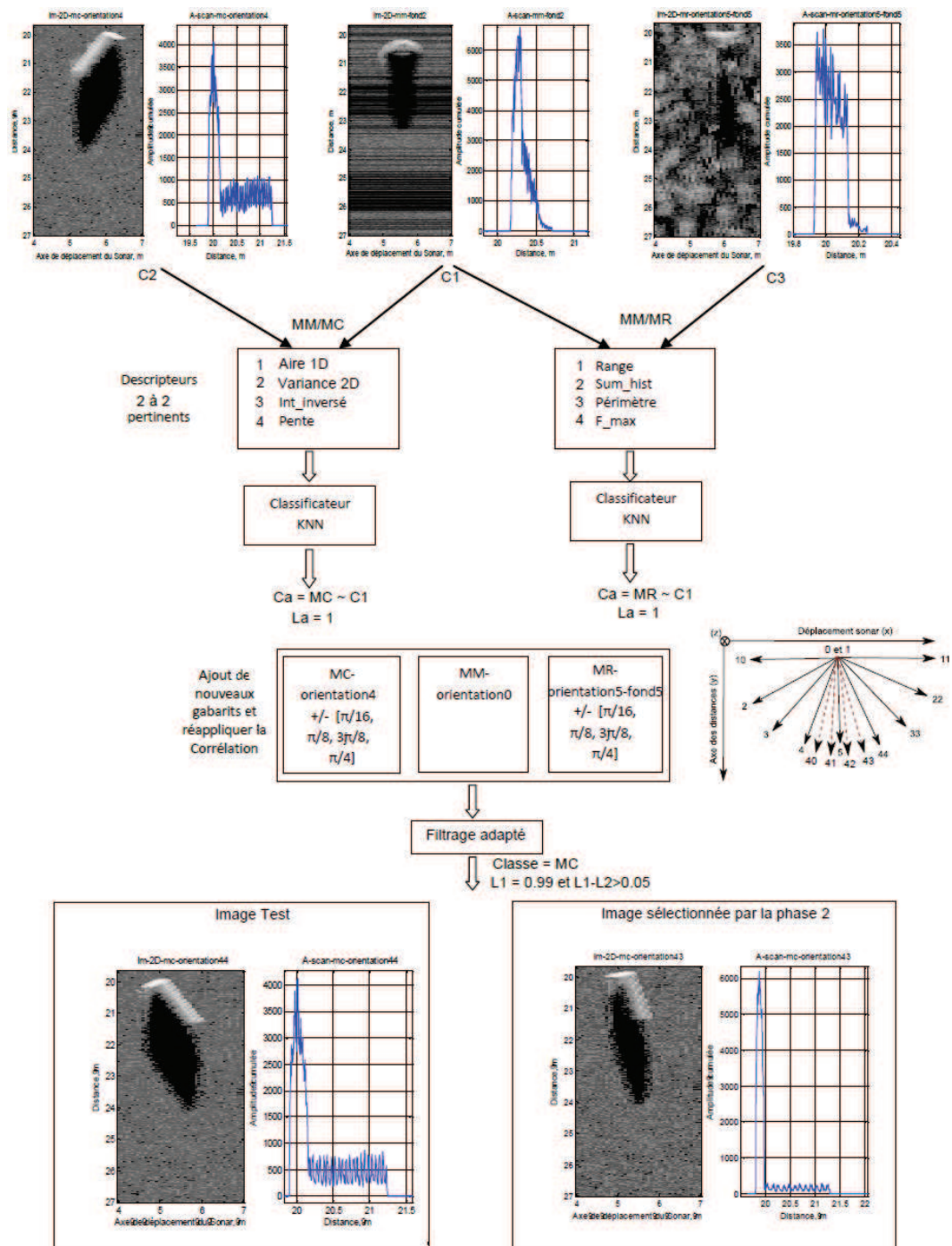


FIGURE 5.15: Processus de correction d’une ambiguïté dans ECH1 (Etat 0 -> Etat 3) : 3^{ème} cas.

– **Apport des descripteurs**

Toutes les ambiguïtés MR/MM et la majorité des ambiguïtés MM/MC, ont passé de l'Etat 0 à l'Etat 2 grâce à l'ajout des descripteurs. En revanche, 8 parmi 14 ont passé de l'Etat 0 à l'Etat 2 pour le couple MR/MC. L'ajout des descripteurs a été efficace pour 60% des cas d'ambiguïtés qui sont passés de l'Etat 0 à l'Etat 2.

Pour les 3 couples de classes, les descripteurs sélectionnés par AFD sont les suivants :

- MR/MC :
 1. Etendu
 2. Variance 2D
- MM/MC :
 1. Etendu
- MR/MM :
 1. Range
 2. Sum_hist

En analysant les résultats de la classification après l'ajout des descripteurs sur les deux couples MR/MM et MM/MC, nous remarquons que les deux descripteurs (Range et Sum_hist) sélectionnés pour le couple MR/MM (en premier lieu) et l'Etendu sélectionné pour le couple MM/MC (en second lieu) ont un pouvoir plus discriminant que les autres descripteurs. En effet, la même remarque a été soulignée à 20m puisque les descripteurs calculés sur l'A-scan avaient aussi un pouvoir plus discriminant que ceux calculés sur l'image 2D.

– **Apport des nouveaux gabarits**

20% des cas (6 cas) ont été corrigés grâce à l'ajout de nouveaux gabarits. En effet, c'est le cas quand les classes confondues sont MR/MC ou MM/MC. Ceci est dû à la non efficacité des descripteurs pour distinguer entre la classe MR et la classe MC.

Cette fois-ci, 80% des ambiguïtés ont été levées grâce à la seconde phase et 20% (6 cas) sont restés dans l'Etat 4.

5.3.3 Performances du classificateur

La performance du classificateur a été estimée par validation croisée. En effet, l'ensemble total de données était réparti sur n groupes. A chaque itération, un groupe formera la base de test et les $n - 1$ autres groupes seront dans la base d'apprentissage. Cette méthode permet de garantir que toutes les images passent au moins une fois en test et en apprentissage.

5.3.3.1 Matrice de confusion 1 (pour ECH1)

	MS	MC	MM	MR	RA
20 Sphère	1	0	0	0	0
18 Cylindre	0	0.9	0.1	0	0
10 Manta	0	0	1	0	0
23 Rockan	0	0	0.07	0.93	0
27 Récif artificiel	0.037	0	0	0.037	0.925

TABLE 5.7: Matrice de confusion de l'échantillon (ECH1)

Lors de l'utilisation de la phase 1 du classificateur, le taux moyen de bonne classification à 20m est égal à 87%. En intégrant la phase 2, environ 95% d'objets (MLOs et non MLOs) ont été correctement classifiés soit un gain de près de 8% grâce à l'utilisation de deux phases.

Le tableau 5.7 donne la matrice de confusion de ECH1 (après la phase 2). Le plus haut taux de confusion est pour le cylindre classé comme une mine Manta pour certaines orientations. Dans la 3^{ème} ligne la mine Manta ne se confond pas avec le cylindre. Ce n'est pas contradictoire avec la 2^{ème} ligne puisque la mine Manta est un objet à symétrie radiale tandis que le cylindre ne l'est pas. La confusion se produit, en fait, que dans le cas particulier où l'image de test est un cylindre incliné dans une orientation spécifique non représentée exactement dans l'ensemble des gabarits.

5.3.3.2 Matrice de confusion 2 (pour ECH2)

	MS	MC	MM	MR	RA
20 Sphère	1	0	0	0	0
18 Cylindre	0	1	0	0	0
10 Manta	0	0.1	0.7	0.1	0.1
23 Rockan	0	0.13	0.043	0.83	0
27 Récif artificiel	0	0.05	0	0	0.95

TABLE 5.8: Matrice de confusion de l'échantillon (ECH2)

Le taux moyen de bonne classification à 43m est 86% en utilisant uniquement la phase 1 de l'algorithme. Avec les deux phases 1 et 2, 93% d'objets ont été correctement classifiés soit un gain légèrement inférieur (7%) qu'à 20m grâce à l'intégration de la phase 2.

La classe MM est la classe qui présente le plus de confusions avec les autres classe à 43m. En effet, c'est dû, d'une part, au petit nombre d'échantillons de cette classe

puisque c'est une classe qui est symétrique et qui a une taille fixe : sachant que toutes les images sont disjointes on ne peut faire varier que le type de fond et 2 orientations (mine renversée ou non). Dans cette condition une erreur aura un poids plus important. L'autre cause est la mauvaise segmentation de la mine Manta dans certaines configurations : cette difficulté est due à l'absence de l'écho de la MM pour quelques images simulées sur des fond ayant des indices de rétrodiffusion plus élevés.

5.3.3.3 Comparaison des résultats aux 2 distances : 20m et 43m

L'avantage de la stratégie que nous avons suivie est la possibilité de confirmer le résultat de la phase 1 (le filtrage adapté) même après avoir détecté une ambiguïté. En effet, pour les deux ensembles ECH1 et ECH2, respectivement, dans 65% et 60% des ambiguïtés détectées la classe $C1$ sélectionnée par la phase 1 et la classe la plus vraisemblable Ca obtenue par le classificateur KNN sont les mêmes (exemple, $C1 = Ca = MR$ dans la ligne 1 du 5.6). Toutefois, il reste des ambiguïtés qui ne seront pas corrigées par cette méthode. En effet, le 4^{ème} cas (la ligne 4 du 5.6) reste non corrigé, car les deux classes les plus probables (dans la phase 1) $C1$ et $C2$ sont RA et MM (différentes de la classe réellement recherchée MR) d'où l'incapacité de la phase 2 à corriger le résultat préliminaire.

D'autre part, dans cette approche basée sur l'écho, les ambiguïtés détectées portent sur d'autres configurations que les ambiguïtés classiques détectées dans le cas du traitement basé sur l'ombre [Qui01] d'où un potentiel réel de fusion de deux approches (paragraphe 5.3.4.1).

La faible dégradation en fonction de la distance, de la qualité de la classification (-2%), est due, d'une part, à la dégradation de la résolution latérale à grandes distances due à l'élargissement de la cellule de résolution (paragraphe 2.3.3), et d'autre part, à la diminution du rapport signal à bruit. Cette dégradation a été souvent constatée aussi bien pour l'écho que pour l'ombre acoustique. Par ailleurs, en menant une analyse fine classe par classe, nous avons pu constater qu'un autre facteur a aussi influencé le résultat de la classification de ECH2 par rapport à ECH1. Il s'agit d'utiliser les imagerie non segmentée dans la configuration (2) et l'écho segmenté dans la configuration (1). En effet, dans certains cas, nous avons obtenu des imagerie avec un écho absent quand l'indice de rétrodiffusion du fond est supérieur à celui de la cible (par exemple, la figure 5.16). Pour cela nous étions obligé de garder toute la zone écho (y compris le fond qui l'entoure) pour calculer l'A-scan. La segmentation a échoué aussi pour d'autres cas (fond complexe et/ou cible complexe), d'où le choix de calculer toutes les A-scans de ECH2 sur des imagerie non segmentées afin de garantir des conditions optimales pour la technique d'appariement. Le problème de l'écho absent était signalé aussi par Midelfart [MM11] qui a proposé une solution qui consiste à définir un coefficient de

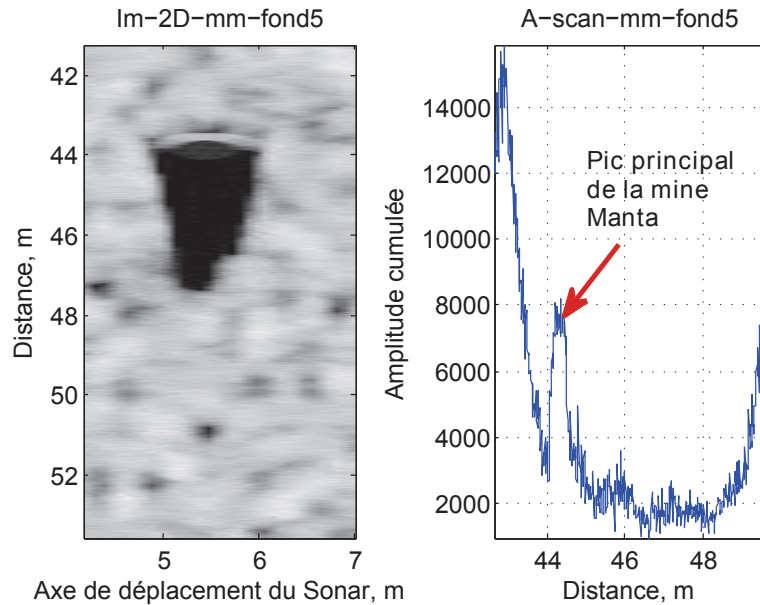


FIGURE 5.16: Image 2D et A-scan correspondant pour une mine Manta sur un fond rocheux à 43m.

corrélation sur l'écho et un autre coefficient sur l'ombre et à combiner leurs résultats en fonction du problème rencontré (écho ou ombre absent).

Cette comparaison de deux résultats à seulement deux distances ne permet pas de tirer une généralisation sur l'effet de la distance mais a été présentée ici pour rendre compte des points faibles de la méthodes dans deux configurations ayant des similarités et des différences.

5.3.4 Apport de l'utilisation de l'A-scan pour l'identification

L'avantage de l'A-scan par rapport à l'analyse de la forme de l'ombre à grande distance, est la capacité de l'A-scan à représenter l'écho de la cible, même à faible résolution, en regroupant ces pixels et en gardant une information sur l'agencement temporel et l'atténuation des signaux retournés. Par ailleurs, l'ombre acoustique subit un allongement suivant l'axe des distances et un rétrécissement suivant l'axe des gisements qui rend difficile son identification par les méthodes classiques de reconnaissance de forme.

5.3.4.1 Ambiguïtés levées

Deux ambiguïtés ont été levées en utilisant la partie écho de l'image sonar. La première ambiguïté concerne la confusion entre la mine cylindrique et la mine sphérique et la deuxième concerne la mine Rockan qui était confondue avec la mine Manta dans les configurations données par la figure 5.17. D'après l'étude que nous avons faite plus haut, l'ombre d'un cylindre vu par son extrémité était très proche de l'ombre d'une sphère (figure 5.18) mais leurs échos ne se confondent pas. En effet, en utilisant la

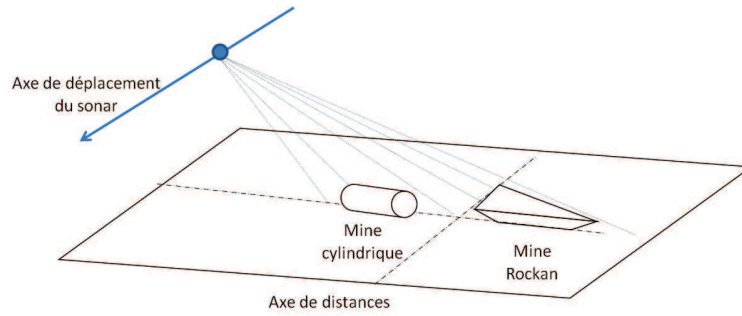


FIGURE 5.17: Deux configurations ambiguës : (à gauche) le cylindre vue par l'extrémité et (à droite) la mine Rockan dont l'axe majeur est perpendiculaire à l'axe des gisements.

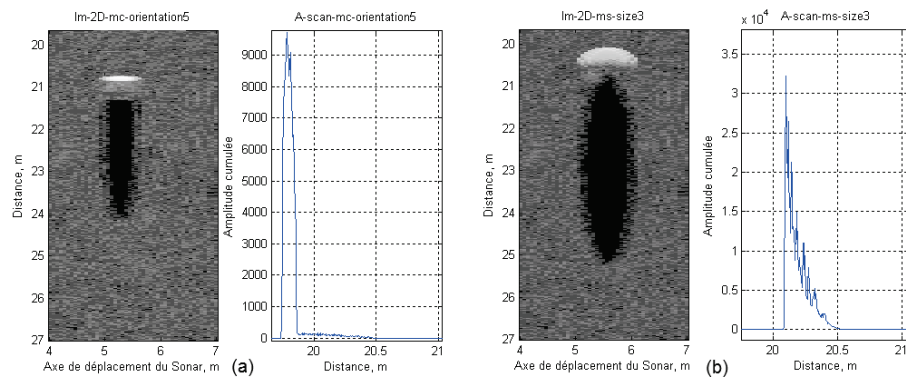


FIGURE 5.18: Image 2D et A-scan correspondant pour (a) un cylindre vue par son extrémité et (b) une sphère sur un fond sableux.

différence des énergies des A-scans (recalés) dans la figure 5.19, nous remarquons que la distance intra-classes pour chacune de deux classes est inférieure à la distance inter-classes.

Pour la deuxième ambiguïté, l'ombre de la mine Rockan dont l'axe majeur est perpendiculaire à l'axe des gisements est semblable à celui d'une mine Manta mais leurs A-scans sont moins corrélés (figure 5.20). Cette constatation a été vérifiée sur l'image réelle d'une mine Rockan(GESMA/DERA) qui n'a pas été confondue avec une mine Manta (5.4).

5.3.4.2 Objets de formes complexes

Un autre avantage de la méthode proposée est la possibilité de modéliser des réponses des cibles de formes complexes ou dans des conditions atypiques. Par exemple, généralement, une mine Manta est modélisée par un cône tronqué mais celle-ci peut tomber renversée (figure 5.21). Il sera difficile, dans ce cas, de l'identifier par les méthodes classiques basées sur l'ombre.

Pour les cibles de formes complexes, tel que le récif artificiel, l'ombre n'est pas représentatif de la forme géométrique qui renferme des trous et des cavités. Dans les figures

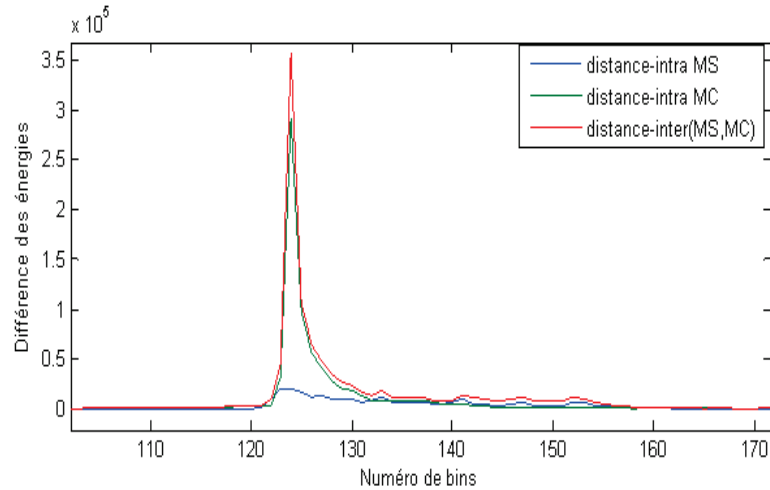


FIGURE 5.19: Comparaison des classes MS/MC : distance intra (bleu (MS),vert (MC))/inter (rouge) classes.

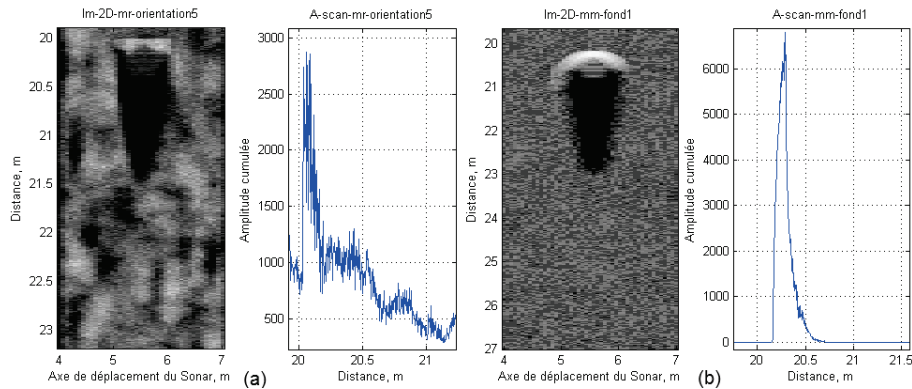


FIGURE 5.20: Image 2D et A-scan correspondant pour (a) une mine Rockan (orientation5) et (b) une mine Manta sur un fond sableux.

5.22 et 5.23, nous montrons deux configurations différentes du même RA (Type 1). En comparant les ombres ainsi que les images 2D deux à deux d'une manière qualitative nous ne constatons pas une ressemblance claire entre ces deux cibles. Par contre, leurs A-scans sont très corrélés.

5.3.5 Robustesse du classificateur en fonction du type de fond

La qualité de la classification dépend du type de fond puisque la réponse de la cible est influencée par (paragraphe 5.2.3) : les trajets multiples, la qualité de la segmentation et le rapport entre l'indice de cible et l'indice de rétrodiffusion du fond.

Lorsque le fond est rugueux par rapport à la longueur d'onde (paragraphe 3.2.6.1), l'amplitude du signal associée suit une loi de Rayleigh de paramètre σ qui modélise le phénomène de réverbération dans les images sonar (paragraphe 2.3.5) [Qui01]. Par conséquent, les intensité des pixels $x(i, j)$ de coordonnées (i, j) sont distribuées selon

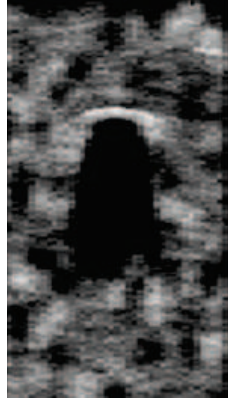


FIGURE 5.21: Configuration atypique : une mine Manta renversée

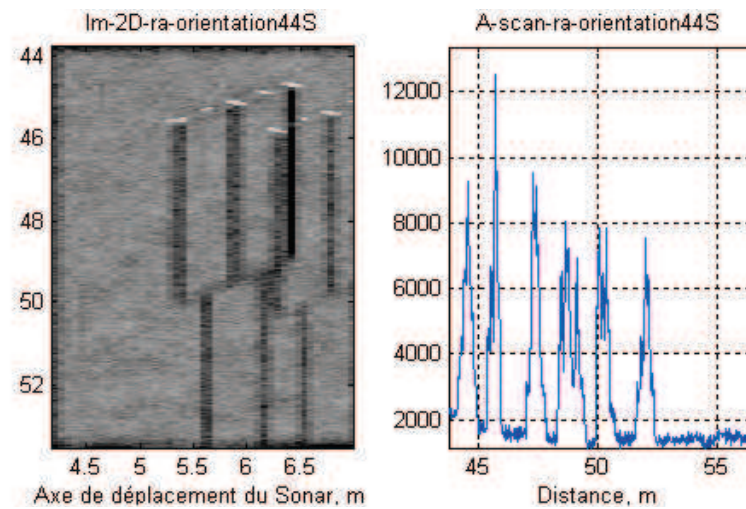


FIGURE 5.22: Image 2D et A-scan correspondant pour un Récif artificiel (orientation44)

Type de fond	fond 1	fond 2	fond 3	fond 4	fond 5
$\hat{\sigma}$	0.26	0.3	0.06	0.08	0.1

TABLE 5.9: Estimation du paramètre $\hat{\sigma}$ pour chaque type de fond simulé

la loi (5.1).

$$f(x(i, j), \sigma) = \frac{x(i, j)}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-x(i, j)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.1)$$

A partir de la moyenne de N pixels d'une zone du fond, qui entoure la cible, on peut estimer le paramètre σ de la distribution de Rayleigh que suit l'image. Un estimateur de maximum de vraisemblance (5.2) a été utilisé pour estimer ce paramètre $\hat{\sigma}$ [Qui01].

$$\hat{\sigma} = \text{sqrt}\left(\frac{\sum x(i, j)^2}{2N}\right) \quad (5.2)$$

Pour étudier l'effet du fond sur le résultat de la classification dans notre méthode, nous avons formé cinq bases de tests contenant chacune des images des cibles sur un seul type de fond parmi les cinq. Pour chaque base de test, on associe une base

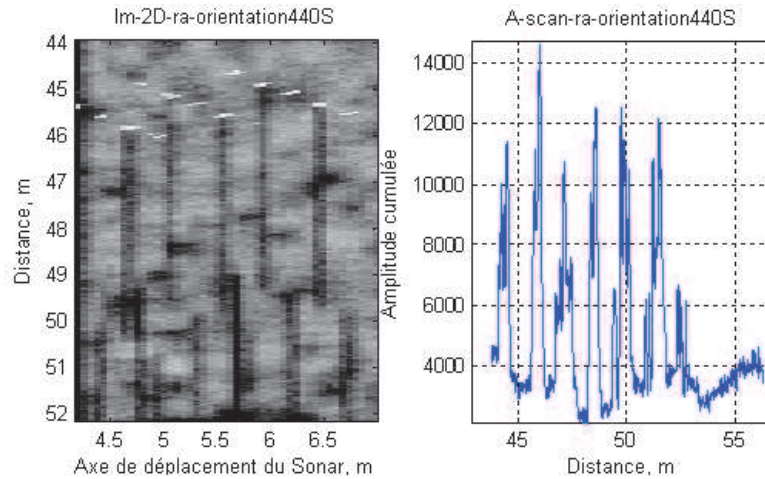


FIGURE 5.23: Image 2D et A-scan correspondant pour un Récif artificiel (orientation440)

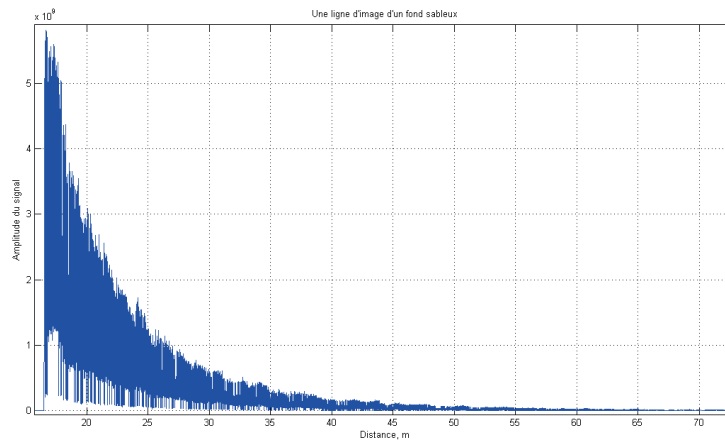


FIGURE 5.24: Distribution de Rayleigh du fond 1

d'apprentissage qui regroupe l'ensemble des images qui ne vérifient pas la condition définie pour sélectionner les éléments de cette base de test. La base d'apprentissage associée à une base de test pour un certain type i de fond ne contient que des images des cibles sur des fonds j tel que $j \in \{1..5\} \neq i$.

Nous présentons, dans le tableau 5.9, les valeurs de $\hat{\sigma}$ estimées pour les fonds que nous avons simulés, et dans la figure 5.25, le taux de bonne classification pour chaque type de fond. Il y a une disparité entre les taux de bonne classification en fonction du type de fond. En effet, le plus faible taux est associé au fond 5 (roche) et le plus élevé est associé au fond 3 (vase) où la totalité de l'ensemble de test était classifiée avec succès. En contrepartie, il semble qu'il n'y a pas une relation directe entre le taux de bonne classification et le paramètre de Rayleigh qui caractérise le speckle. La formation du speckle est un phénomène aléatoire qui dépend de plusieurs paramètres autre que l'indice de rétrodiffusion du fond ou la taille des grains.

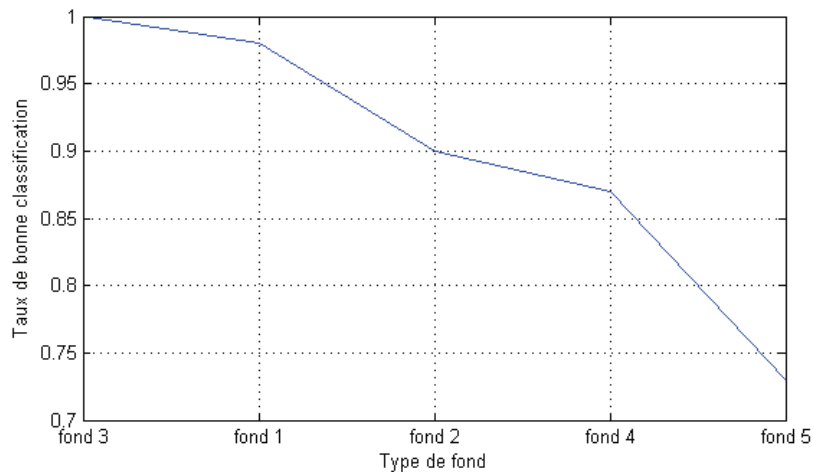


FIGURE 5.25: Evolution du taux de bonne classification en fonction du type de fond

5.4 Conclusion

Une étude de la potentialité de l'écho dans les images sonar à classifier les cibles sous marines a été effectuée dans ce chapitre. Le taux moyen de bonne classification, même légèrement influencé par la distance, dépasse le 90% répartis entre les phases comme suit : 67% est l'apport du filtrage adapté, 17% est l'apport de l'ajout de descripteurs (vérification) et 7% grâce à l'ajout de gabarits (correction).

Même si, l'A-scan est calculé sur les données brutes et non pas l'image 2D, la complexité du type de fond a influencé négativement la classification menant parfois à un masquage de l'écho. La seconde phase de l'algorithme avait un apport non négligeable, que ce soit pour corriger les confusions du filtrage adapté ou pour confirmer le résultat de celui-ci. En plus de ce résultat, les ambiguïtés rencontrées par cette méthode sont différentes de celles rencontrées dans le travail de Quidu [Qui01] qui était basé sur l'ombre acoustique. C'est parmi les objectifs visés et atteint par cette méthode qui exploite l'A-scan.

Chapitre 6

Conclusion générale

Le cadre général, dans lequel s'inscrit ce travail de thèse, est l'utilisation de la partie écho de la signature acoustique en vue d'améliorer la classification des cibles sous-marines généralement basée sur leurs seules ombres portées.

Quelques ambiguïtés sont encore non levées avec les méthodes classiques basées sur l'analyse de l'ombre. Ces configurations concernent, par exemple, la mine cylindrique vue par son extrémité et la mine sphérique.

Généralement, l'écho est la plus petite partie dans la signature acoustique de la cible visible sur l'image sonar. Ceci a longtemps limité l'usage de cette zone qui, en fait, renferme une information pertinente directement liée à la forme et à la matière qui compose la cible par conséquent à son indice de cible. L'objectif était, donc, d'étudier la potentialité de l'information que renferme la zone écho dans une image sonar afin d'atteindre une meilleure classification des cibles sous marines.

Pour cela, l'approche proposée était fondée autour de deux grands axes : la simulation et la classification. Le travail réalisé ainsi que les possibilités d'évolution sont résumés dans les deux sections suivantes.

6.1 Bilan

- L'interprétation des images sonar nécessite une expertise et de bonnes connaissances de l'acoustique. Il n'est pas évident pour un non acousticien de voir les phénomènes qui sont responsables de chaque détail dans l'image. C'est la raison pour laquelle nous avons consacré un premier chapitre à définir toutes les notions de base liées à la formation des images sonar ainsi que les spécificités de celles obtenues à l'aide d'un sonar latéral.
- L'un des axes de cette thèse est la formation d'un modèle de simulation des images sonar en tenant compte de la plupart des phénomènes prépondérants dans le mécanisme de formation de l'écho. Le modèle proposé est basé sur la technique de lancer

de rayons pour modéliser la propagation des ondes acoustiques en hautes fréquences. Deux modèles de rétrodiffusion ont été utilisés pour la rétrodiffusion à partir du fond et des cibles. La loi de Lambert était utilisée pour le fond et le modèle de kirchhoff pour les cibles supposées rigides.

- Parmi les phénomènes complexes visibles sur les images sonar on trouve le phénomène de trajets multiples. Nous avons modélisé ce phénomène grâce à la technique du “Sonel Mapping” utilisée jusqu’à présent dans l’acoustique en salle. Cette technique nous a permis de prendre en compte concrètement l’effet de ce phénomène sur les réponses des cibles. La méthode proposée est basée sur une technique stochastique pour choisir le type de l’interaction à garder à chaque intersection entre le rayon et la scène ce qui lui permet un temps de calcul relativement faible par rapport aux méthodes déterministes.
- L’aboutissement de la première partie consiste principalement à l’adaptation de l’A-scan (utilisé dans le médical) pour notre contexte. Cet A-scan est l’élément clé pour identifier les cibles sous-marines.
- La deuxième partie de ce travail concerne le développement d’un classificateur de cibles sous-marines. Notre classificateur est basé sur le modèle de simulation et l’A-scan proposés dans la première partie. L’approche utilisée est l’appariement de gabarits où les gabarits sont les A-scans. Cette approche a été utilisée de manière hiérarchique afin de permettre la validation ou la révision du résultat préliminaire du filtrage adapté à l’aide d’autres descripteurs et des nouveaux gabarits simulés en fonction du cas d’ambiguïté à traiter. Le résultat final de classification est une liste ordonnée de classes donnant : le type, la taille et l’orientation des cibles les plus proches.
- La corrections de certaines confusions qui subsistaient en utilisant l’ombre acoustique en mono-vue et la possibilité de modéliser des cibles de formes complexes et/ou dans des configurations atypiques. Cette amélioration de la classification a été atteinte grâce à l’utilisation de l’A-scan calculé sur la zone écho de l’image.

6.2 Perspectives

Plusieurs perspectives sont envisageables pour poursuivre ce travail. Ces perspectives peuvent être divisées en deux parties :

1. Perspectives liées au modèle de simulation des images sonar

- Prendre en compte plus de paramètres liées à l’architecture du sonar : les hypothèse de simplification du modèle peuvent être revisités en vue de proposer

une version plus complète en intégrant, par exemple, une antenne étendue, le diagramme de directivité, la modélisation des réverbérations du volume et de surface.

- Modéliser divers fonds par la technique de fractales : cette technique est connue pour sa capacité à générer des modèles de fond réalistes. La génération des plusieurs types de fond avec des reliefs très variés sera, donc, plus accessible que la génération d'une surface à partir des MNTs réels.
- Utiliser un modèle du fond basé physiquement sur la rugosité et l'angle de rasance, par exemple le modèle de Jackson [JWI86]. En effet, la rétrodiffusion à partir du fond est très complexe et fait intervenir plusieurs paramètres et le modèle hybride de Jackson était le modèle qui donne les résultats les plus proches des modèles empiriques pour une gamme de fréquences allant de 10 à 100 kHz. Ce modèle est composé de deux sous-modèles, selon l'angle de rasance, qui sont l'approximation de Kirchhoff (angles de rasance supérieurs à 70 degrés) et le modèle de rugosité composée (angles de rasance inférieurs à 70 degrés).
- Implémenter la technique de lancer de rayons et le module de gestion des trajets multiples sur une station doté d'un GPU (*Graphical Processor Unity*) afin d'améliorer le temps d'exécution.

2. Perspectives liées à la classification des cibles sous-marines

- Etude de performance du classificateur en fonction de la distance et la résolution : la comparaison des résultats de deux distances ne nous a pas permis de tirer de conclusion générale sur l'effet de la distance et, par conséquent, de la résolution sur la classification. Faute du temps, ce test n'a pas pu être effectué puisqu'il nécessite un grand nombre de simulations pour chaque distance.
- Module de segmentation de la zone écho plus robuste : il existe des méthodes plus adaptées à la segmentation des images sonar. Parmi ces méthodes, on trouve les contours actifs.
- Tester la méthode sur d'autres images réelles en utilisant la technique de réalité augmentée pour reproduire l'environnement (le fond) qui entoure la cible. Le besoin de la connaissance exacte des conditions opérationnelles d'acquisition des images sur lesquelles nous devons travailler, a limité la possibilité de trouver des images exploitables.
- La possibilité d'extraire d'autres descripteurs à partir de l'A-scan : l'A-scan est un signal 1D et il renferme une multitude de paramètres qui peuvent être testés (par exemple, les paramètres spectraux). Dans notre travail, nous avons pré-sélectionné les paramètres qui nous semblent représentatifs de la forme, l'orientation, la taille et l'indice de cible.
- Calculer le B-scan (connu en imagerie médicale) afin de compléter l'information apportée par l'A-scan sur la première dimension de l'image (les lignes) par celle

de la deuxième dimension (les colonnes). Des premiers résultats en considérant le B-scan en plus de l'A-scan seront présentés dans l'Annexe B.

- Combiner la classification sur ombre et sur écho en fusionnant les résultats de notre méthode avec les résultats d'autres méthodes basées sur l'analyse de la forme géométrique de l'ombre. Nous avons montré que certaines ambiguïtés non levées par l'ombre peuvent être levées grâce à l'A-scan et de même les limites de notre méthodes (écho masqué, par exemple) sont susceptibles d'être corrigées en analysant la forme de l'ombre acoustique.
- Comparer les résultats de la méthode proposée avec les résultats des méthodes basées sur l'ombre pour les mêmes images en entrée. Deux alternatives se posent pour valider cette méthode : ou bien se disposer des images sur lesquelles les ambiguïtés ont été détectées auxquelles nous appliquons notre méthode ou bien appliquer une méthode de classification basée sur l'ombre sur nos images simulées.

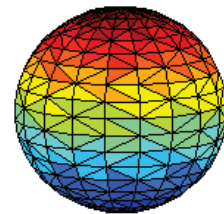
Annexe A

Annexe A

A.1 Modèles géométriques des mines simulées



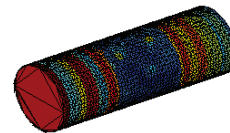
Diamètre $\in \{0.53m..1.09m\}$.



(a)



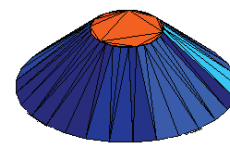
Diamètre = 0.53m.
Longueur $\in \{1.56m..2.06m\}$.



(b)



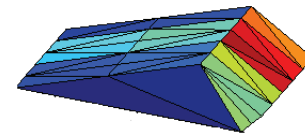
Diamètre (bas) = 0.98m.
Diamètre (haut) = 0.49m.
Hauteur = 0.44m.



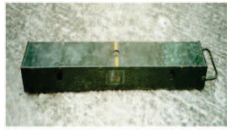
(c)



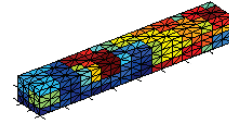
Longueur = 1.015m.
Largeur = 0.8m.
Hauteur = 0.385m.



(d)



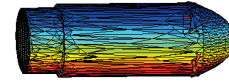
Longueur = 0.8m.
Largeur = 0.12m.
Hauteur = 0.095m.



(e)



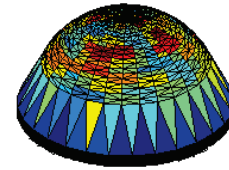
Diamètre = 0.53m.
Longueur = 1.56m.



(f)



Rayon = 0.31m.



(g)



Diamètre (bas) = 0.98m.
Diamètre (haut) = 0.7m.
Hauteur = 0.85m.



(h)

FIGURE A.1: Mines réelles, leurs dimensions et les modèles géométriques simulés : (a) Mine sphérique, (b) Mine cylindrique, (c) Mine Manta, (d) Mine Rockan, (e) Mine Rigeel, (f) Mine Sepia, (g) Mine Limpet, (h) Mine Sigeeel400

A.2 Autres objets

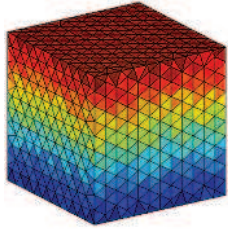


FIGURE A.1: (a)

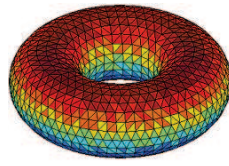


FIGURE A.1: (b)

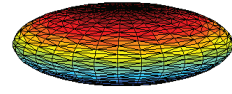
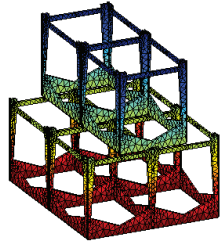
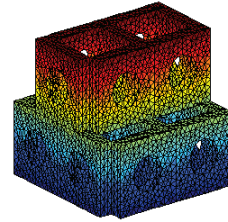


FIGURE A.1: (c)



(d)



(e)

FIGURE A.2: Quelques modèles géométriques d'objets simulés : (a) Cube, (b) Torus, (c) Ellipsoïde, (d) Récif artificiel (type 1) et (e) Récif artificiel (type 2)

Annexe B

Annexe B

B.1 Le B-scan

– **Définition**

Un vecteur 1D qui est la somme des colonnes de l'image qui renferment une partie de la réponse de la cible.

– **Objectif**

Enrichir l'A-scan par une information supplémentaire sur la deuxième dimension

B.2 Combinaison du traitement sur A-scan et B-scan

B.2.1 Limites de la corrélation 1D : Cas de l'ambiguïté MC/MM

La corrélation des A-scans en 1D peut avoir des limites qu'on a pu constater sur une ambiguïté entre la MC inclinée et la MM (3^{ème} cas d'ambiguïté (Ligne 3 du Tab 5.6)). Nous rappelons dans la figure B.2 les résultats du filtrage adapté pour la configuration du cylindre schématisée en haut de la figure.

En utilisant l'A-scan uniquement, nous étions obligés d'aller jusqu'à l'ajout de nouveaux gabarits pour corriger cette ambiguïté. C'est un traitement conséquent puisqu'il est récursif et fait recours à la simulation.

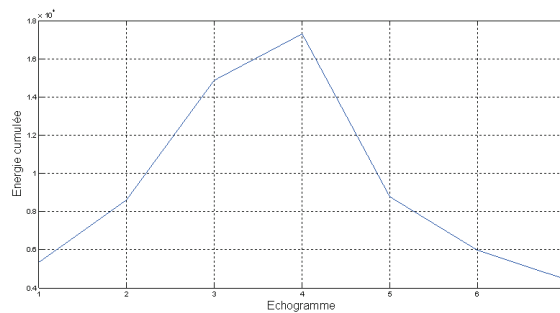


FIGURE B.1: B-scan d'une sphère de rayon $a = 0.5\text{m}$

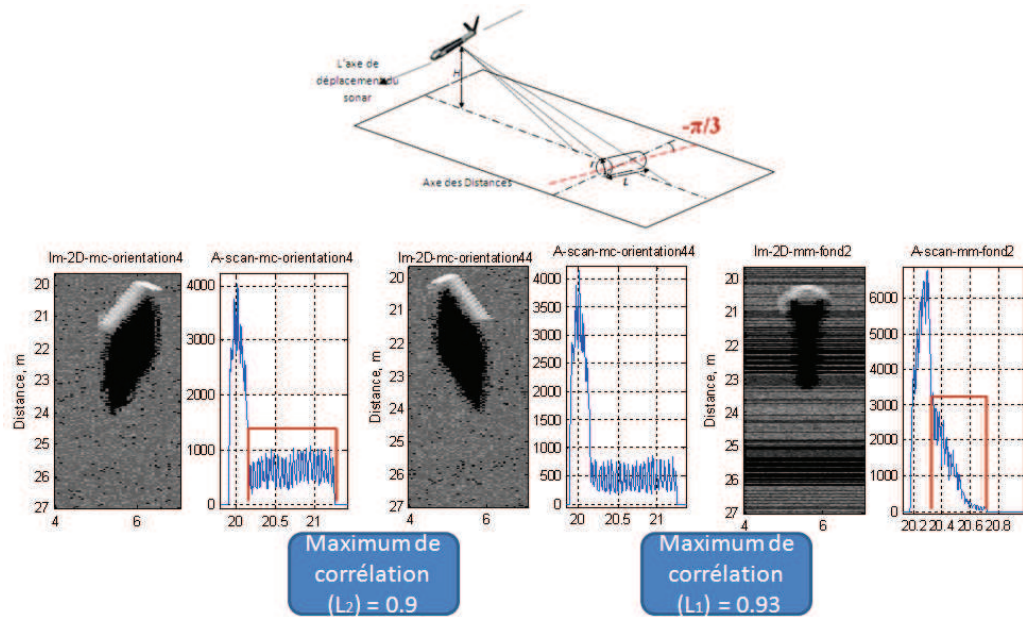


FIGURE B.2: Résultat du filtrage adapté appliqué à l'A-scan test (au milieu) : L_1 le maximum de corrélation de la classe la plus probable (à droite) et L_2 est celui de la classe suivante (à gauche)

En revanche, nous remarquons que le B-scan calculée sur la deuxième dimension a beaucoup de chance de départager la MC de la MM.

Pour vérifier ceci, nous avons ajouté un coefficient de corrélation calculé sur les B-scans.

B.2.2 Apport de la fusion A-scan/B-scan

En plus du filtrage adapté appliqué dans la phase 1 sur les A-scans, nous appliquons de nouveau un filtrage adapté entre le B-scan test et chacun des B-scans ambigus. Nous prenons ensuite la moyenne de ces deux coefficients.

La procédure complète est donnée par les figures B.3 et B.4.

Le nouveaux critère qui est la moyenne des coefficients de corrélation a bien résolu l'ambiguïté sans avoir besoin de passe par toutes les phases de gestion d'ambiguïté.

Ces premiers résultats obtenus en combinant l'A-scan et le B-scan méritent d'être étudiés davantage en vue de généraliser l'apport de cette fusion.

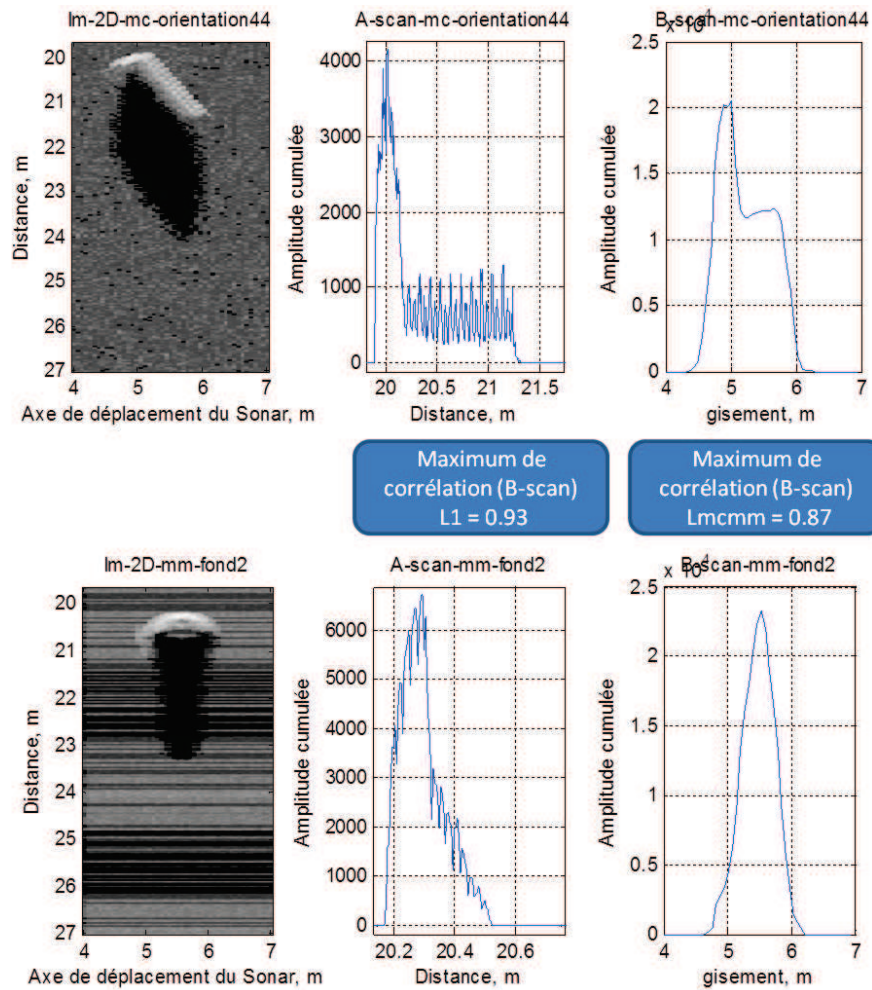


FIGURE B.3: Résultat du filtrage adapté appliqué entre les B-scans (dernière colonne). En haut : le B-scan test et en bas : celui de la configuration initialement plus probable (mine Manta)

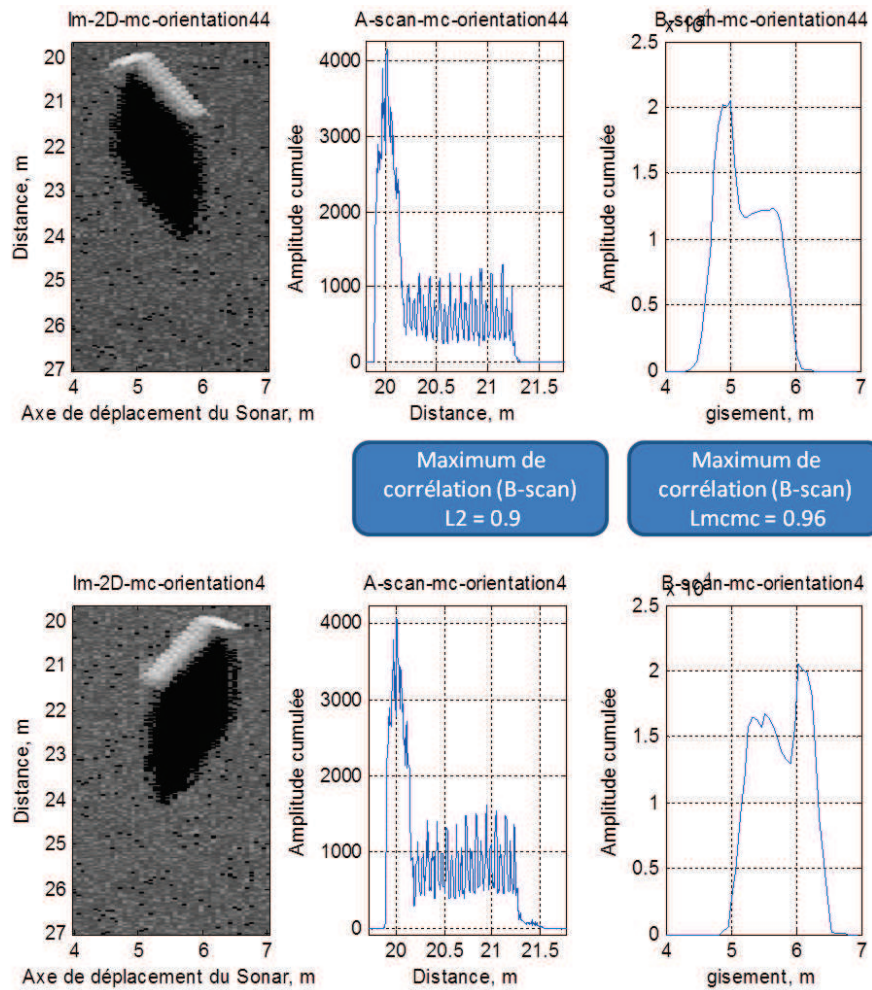


FIGURE B.4: Résultat du filtrage adapté appliqué entre les B-scans (dernière colonne). En haut : le B-scan test et en bas : celui de la configuration initialement moins probable (mine cylindrique)

Bibliographie

- [AFD97] Tom Aridgides, Manuel Frenandez, and Gerald Dobeck. Adaptive 3d dimensional range-crossrange-frequency filter processing string for sea mine classification in side-scan sonar imagery. In *SPIE Proc*, volume 3079, 1997.
- [AFD01] Tom Aridgides, M Fernandez, and G Dobeck. Fusion of adaptive algorithms for the classification of sea mines using high resolution side scan sonar in very shallow water. In *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 1, pages 135–142. IEEE, 2001.
- [ASYHD00] Mahmood R Azimi-Sadjadi, De Yao, Qiang Huang, and Gerald J Dobeck. Underwater target classification using wavelet packets and neural networks. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 11(3) :784–794, 2000.
- [Bel95] Judith M Bell. *A model for the simulation of sidescan sonar*. PhD thesis, Heriot-Watt University, 1995.
- [Ben12] Yacine Bennani. *Signature Electromagnétique Bistatique d’une cible complexe intégrée dans son environnement. Application à l’imagerie ISAR d’une scène maritime*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2012.
- [Ber08] Cécile Berron. *Potentialités de l’inversion géoacoustique de données multicapteurs de sonars cartographiques pour la caractérisation des fonds marins*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2008.
- [BL97] Judith M Bell and LM Linnett. Simulation and analysis of synthetic sidescan sonar images. *Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings-*, 144(4) :219–226, 1997.
- [BMHM12] Richard Brind, Patrick Macey, David Hardie, and Jen Muggleton. Modelling the scattering of interface waves by mines in the surf zone. In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 17, page 070047, 2012.

- [BMKSP13] T Binesh, M. H Mohankumar Ksupriya, and P.R. Saseendran Pillai. Underwater target classifier using a modified transform based feature set. *International Journal of Electronics and Communication Engineering (IJECE)*, 2(3) :21–32, 2013.
- [Bou92] Michel Bouvet. *Traitements des signaux pour les systèmes sonar*. Masson, 1992.
- [Bou06] Géraldine Bouchage. *Modélisation de la propagation basse fréquence par petits fonds : prise en compte de la réverbération et influence des ondes internes*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2006.
- [BPL⁺07] J Bell, Y Petillot, K Lebart, PY Mignotte, E Coiras, and H Rohou. Adaptive fusion architecture for context aware detection and classification. In *OCEANS 2007-Europe*, pages 1–6. IEEE, 2007.
- [BT97] Shira Lynn Broschat and Eric I Thorsos. An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces. part ii. numerical studies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101 :2615, 1997.
- [BU68] JP Buckley and RJ Urick. Backscattering from the deep sea bed at small grazing angles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 44 :648, 1968.
- [Buc92] Michael J Buckingham. Ocean-acoustic propagation models. *J. Acoustique*, 3 :223–287, 1992.
- [Bur82] J Burczynski. *Introduction à l'utilisation des systèmes SONAR dans l'estimation de la biomasse en poissons : Rév. 1*, volume 191. FAO, 1982.
- [Cat12] A.T Catherall. High frequency target echo strength prediction using combined kirchhoff and ray tracing methods. *ECUA 2012*, 2012.
- [CFMD08] M Couillard, JA Fawcett, V Myers, and M Davison. Support vector machines for classification of underwater targets in sidescan sonar imagery. *Defence R&D Canada Atlantic, Halifax, NS, Canada, Tech. Memo. TM*, 190 :2008, 2008.
- [CG09] E. Coiras and J. Groen. Simulation and 3d reconstruction of side-looking sonar images nato undersea research centre (nurc). *Advances in Sonar Technology, Sergio Rui Silva (Ed.), ISBN : 978-3-902613-48-6, InTech, DOI : 10.5772/39406.*, 2009.

- [CH62] RP Chapman and JH Harris. Surface backscattering strengths measured with explosive sound sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34 :1592, 1962.
- [CH00] Charles M Ciany and Jim Huang. Computer aided detection/computer aided classification and data fusion algorithms for automated detection and classification of underwater mines. In *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 1, pages 277–284. IEEE, 2000.
- [Cha08] Philip Chapple. Automated detection and classification in high-resolution sonar imagery for autonomous underwater vehicle operations. Technical report, DTIC Document, 2008.
- [CJL⁺06] Vincent Creuze, Bruno Jouvencel, Lionel Lapierre, et al. Analyse des échos de signaux acoustiques diffractés pour le suivi de fond des véhicules autonomes sous-marins. In *IEEE CIFA'06 : Conférence Internationale Francophone d'Automatique*, pages 150–155, 2006.
- [CM77] CS Clay and H Medwin. *Acoustical oceanography*, 544, 1977.
- [CMP⁺07] E Coiras, P-Y Mignotte, Y Petillot, J Bell, and K Lebart. Supervised target detection and classification by training on augmented reality data. *Radar, Sonar & Navigation, IET*, 1(1) :83–90, 2007.
- [CN93] J.W Caruthers and J.C Novarini. Acoustic classification and mapping of the seabed. In *Proc. of the Institute of Acoustics*, pages 261–270, 1993.
- [CPC84] Robert L Cook, Thomas Porter, and Loren Carpenter. Distributed ray tracing. 18(3) :137–145, 1984.
- [DBL08] Esther Dura, Judith Bell, and Dave Lane. Superellipse fitting for the recovery and classification of mine-like shapes in sidescan sonar images. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 33(4) :434–444, 2008.
- [Dey02] Nicolas Dey. *Etude de la formation de l'image d'un objet microscopique 3D translucide : application à la microscopie optique*. PhD thesis, Université de Nice - Sophia Antipolis, 2002.
- [DG74] Vincent A Del Grosso. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56 :1084, 1974.

- [DGM98] Sylvie Daniel, Didier Gueriot, and Eric P Maillard. Underwater environment restitution through sonar images and swath bathymetry rendering. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on*, volume 5, pages 4417–4422. IEEE, 1998.
- [DH67] K Jerome Diercks and Robert Hickling. Echoes from hollow aluminum spheres in water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 41 :380, 1967.
- [DH⁺97] Gerald J Dobeck, John C Hyland, et al. Automated detection and classification of sea mines in sonar imagery. In *AeroSense'97*, pages 90–110. International Society for Optics and Photonics, 1997.
- [Don94] David L. Donoho. De-noising by soft-thresholding, 1994.
- [DRVCGE09] J. Del Rio Vera, E. Coiras, J. Groen, and B. Evans. Automatic target recognition in synthetic aperture sonar images based on geometrical feature extraction. *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 2009, January 2009.
- [Dut01] Philip Dutré. Global illumination compendium. *Cornell University*, 2001.
- [EB98] GR Elston and JM Bell. Using finite-difference time-domain methods to model sonar data in complex environment. *Proc. of the Institute Of Acoustics*, pages 69–76, 1998.
- [EBQZS13a] Ayda El Bergui, Isabelle Quidu, Benoit Zerr, and Basel Solaiman. Amélioration d’une méthode de classification de mines sous-marines utilisant l’écho acoustique dans des images sonar latéral. In *TAIMA '13*, pages 1 – 10, 2013.
- [EBQZS13b] Ayda El Bergui, Isabelle Quidu, Benoit Zerr, and Basel Solaiman. Model based classification of mine-like objects in sidescan sonar using the high-light information. In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 17, page 070072, 2013.
- [Ehr03] A Ehrhold. L’application du sonar à balayage latéral (sbl) pour la cartographie des habitats marins en domaine subtidal. *REBENT, Cartographie des peuplements macro-benthiques par les méthodes acoustiques en domaine subtidal*, 2003.
- [EQZ⁺11] Ayda Elbergui, Isabelle Quidu, Benoit Zerr, et al. Model based target classification for high frequency–high resolution imaging sonar. *Proc. 4th UAM, Kos, Greece*, 2011.

- [Ett12] Paul C Etter. Advanced applications for underwater acoustic modeling. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012, 2012.
- [Faw01] JA Fawcett. Modeling of high-frequency scattering from objects using a hybrid kirchhoff/diffraction approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109 :1312, 2001.
- [Faw03] John A Fawcett. Computer-aided detection and classification of minelike objects using template-based features. In *OCEANS 2003. Proceedings*, volume 3, pages 1395–1401. IEEE, 2003.
- [FCH⁺07] J Fawcett, A Crawford, D Hopkin, M Couillard, V Myers, and Benoit Zerr. Computer-aided classification of the citadel trial sidescan sonar images. *Defence Research and Development Canada Atlantic TM*, 162 :2007, 2007.
- [FFM98] John A Fawcett, WLJ Fox, and A Maguer. Modeling of scattering by objects on the seabed. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104 :3296, 1998.
- [FG82] RE Francois and GR Garrison. Sound absorption based on ocean measurements. part ii : Boric acid contribution and equation for total absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72 :1879, 1982.
- [FM05] John A Fawcett and Vincent L Myers. Computer-aided classification for a database of images of minelike objects. Technical report, DTIC Document, 2005.
- [Fol96] James D Foley. *Computer graphics : Principles and practice, in C*, volume 12110. Addison-Wesley Professional, 1996.
- [Fre62] A Freedman. A mechanism of acoustic echo formation. *Acustica*, 12(1) :10–21, 1962.
- [GB95] OOMMEN George and RAJENDAR Bahl. Simulation of backscattering of high frequency sound from complex objects and sand sea-bottom. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 20(2) :119–130, 1995.
- [GCVE10] J Groen, E Coiras, J Del Rio Vera, and B Evans. Model-based sea mine classification with synthetic aperture sonar. *IET radar, sonar & navigation*, 4(1) :62–73, 2010.

- [Gen89] M. Gensane. A statistical study of acoustic signals backscattered from the sea bottom. In *Proceedings Oceanic Engineering, IEEE Journal*, volume 14, pages 84 – 93. IEEE, 1989.
- [Gro06] Johannes Groen. *Adaptive motion compensation in sonar array processing*. PhD thesis, Université de Technologie de Delft, 2006.
- [GSG07] Didier Gueriot, Christophe Sintès, and René Garello. Sonar data simulation based on tube tracing. In *OCEANS 2007-Europe*, pages 1–6. IEEE, 2007.
- [GSG11] SN Geethalakshmi, P Subashini, and Mrs P Geetha. A study on detecting and classifying underwater mine like objects using image processing techniques. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 3(10), 2011.
- [Ham00] E Hammerstad. Backscattering and seabed image reflectivity. *EM Technical Note*, 2000.
- [HBL03] Laurent Hellequin, J-M Boucher, and Xavier Lurton. Processing of high-frequency multibeam echo sounder data for seafloor characterization. *Oceanic Engineering, IEEE Journal*, 28(1) :78–89, 2003.
- [HG04] MP Hayes and PT Gough. Synthetic aperture sonar : A maturing discipline. In *Proc. 7th Eur. Conf. Underwater Acoust*, pages 1101–1106, 2004.
- [HG06] Robert Hickling and Guillermo C Gaunaud. Comment on paper entitled, *An inversion of freedman’s image pulse model in air*. *J. acoust. soc. am.* [bold 119](2), 965–975 (2006)]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120 :589, 2006.
- [HHW65] John Michael Hammersley, David Christopher Handscomb, and George Weiss. Monte carlo methods. *Physics today*, 18 :55, 1965.
- [Hor59] Joseph Warren Horton. *Fundamentals of SONAR*. United states naval institute Annapolis, 1959.
- [Hun06] Alan Joseph Hunter. *Underwater acoustic modelling for synthetic aperture sonar*. PhD thesis, University of Canterbury. Electrical and Computer Engineering, 2006.
- [JA] Timothy J. and Ph.D. Alavosus. New product developments : Multi-beam, bathymetry, and auv side scan sonar advances in seafloor mapping. Technical report, Sonar Products L-3 Klein Associates.

- [Jac94] DR Jackson. Apl-uw high-frequency ocean environmental acoustic models handbook. *Applied Physics Laboratory, University of Washington, Technical Report*, 9407, 1994.
- [Jan] <http://www.janes.com/>.
- [JAN87] Didier JAN. Traitement d'images numerique applique aux sonars a haute resolution. *11ème Colloque sur le traitement du signal et des images, 1987*, pages 357–360, 1987.
- [Jen94] Finn Brunn Jensen. *Computational ocean acoustics*. Springer, 1994.
- [Jen95] Henrik Wann Jensen. Importance driven path tracing using the photon map. In *Rendering Techniques' 95*, pages 326–335. Springer, 1995.
- [JWI86] Darrell R Jackson, Dale P Winebrenner, and Akira Ishimaru. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 79 :1410, 1986.
- [K⁺62] Joseph Bishop Keller et al. Geometrical theory of diffraction. *The Journal of the Optical Society of America*, 1962.
- [Ker51] Donald E Kerr. *Propagation of short radio waves*, volume 24. IET, 1951.
- [Ker94] G Kervern. Applying physical acoustics to near-seafloor object echo-structure estimation. *Le Journal de Physique IV*, 4(C5) :C5–1277, 1994.
- [KFCS99] Lawrence E Kinsler, Austin R Frey, Alan B Coppens, and James V Sanders. *Fundamentals of acoustics*, volume 1. Wiley-VCH, 1999.
- [KJM04] B Kapralos, M Jenkin, and E Milios. Sonel mapping : Acoustic modeling utilizing an acoustic version of photon mapping. In *Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications, 2004. HAVE 2004. Proceedings. The 3rd IEEE International Workshop on*, pages 1–6. IEEE, 2004.
- [KJM05a] Bill Kapralos, M Jenkin, and E Milios. Acoustical diffraction modeling utilizing the Huygens-Fresnel principle. In *Haptic Audio Visual Environments and their Applications, 2005. IEEE International Workshop on*, pages 6–pp. IEEE, 2005.
- [KJM05b] Bill Kapralos, M Jenkin, and Evangelos Milios. Acoustical modeling using a Russian roulette strategy. In *Proceedings of the 118th Convention of the Audio Engineering Society*, pages 28–31, 2005.

- [KJM08] Bill Kapralos, Michael Jenkin, and Evangelos Milios. Sonel mapping : a probabilistic acoustical modeling method. *Building Acoustics*, 15(4) :289–313, 2008.
- [KTN12] Naveen Kumar, Qun Feng Tan, and Shrikanth S Narayanan. Object classification in sidescan sonar images with sparse representation techniques. In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2012 IEEE International Conference on*, pages 1333–1336. IEEE, 2012.
- [Lap09] Pierre-Simon Laplace. Supplément au mémoire sur les approximations des formules qui sont fonction de très grands nombres. *Mémoires de l'Académie Royale des sciences de Paris*, 1810 :559–565, 1809.
- [LB13] D Legland and J Beaugrand. Automated clustering of lignocellulosic fibres based on morphometric features and using clustering of variables. *Industrial Crops and Products*, 45 :253–261, 2013.
- [LC86] L Le Cam. The central limit theorem around 1935. *Statistical science*, 1(1) :78–91, 1986.
- [LC04] Gilles Le Chenadec. *Analyse de descripteurs énergétiques et statistiques de signaux sonar pour la caractérisation des fonds marins*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2004.
- [Leg11] Michel Legris. Systèmes sonars de bathymétrie et d'imagerie. Technical report, ENSIETA, 2011.
- [Leg12] Michel Legris. Systèmes avancés en acoustique sous-marine. Technical report, ENSIETA, 2012.
- [Leo12] Isabelle Leonard. *Reconnaissance des objets manufacturés dans des vidéos sous-marines*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale. Traitement de l'information, 2012.
- [Lur98] Xavier Lurton. Acoustique sous-marine : présentation et applications, 1998.
- [Lur02] Xavier Lurton. *An introduction to underwater acoustics : principles and applications*. Springer, 2002.
- [Lur10] Xavier Lurton. *An introduction to underwater acoustics : principles and applications*. Springer, 2010.
- [MA64] C Mo McKinney and CD Anderson. Measurements of backscattering of sound from the ocean bottom. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 36 :158, 1964.

- [Mac61] KV Mackenzie. Bottom reverberation for 530-and 1030-cps sound in deep water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 33 :1498, 1961.
- [Mal98] Stephane Mallat. A wavelet tour of signal processing, 1998.
- [MC97] Herman Medwin and Clarence S Clay. *Fundamentals of acoustical oceanography*. Access Online via Elsevier, 1997.
- [MCPB00] Max Mignotte, Christophe Collet, Patrick Pérez, and Patrick Bouthemy. Hybrid genetic optimization and statistical model based approach for the classification of shadow shapes in sonar imagery. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(2) :129–141, 2000.
- [MCR⁺08] P-Y Mignotte, E Coiras, H Rohou, Y Petillot, J Bell, and K Lebart. Adaptive fusion framework based on augmented reality training. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2(2) :146–154, 2008.
- [MF10] Vincent Myers and John Fawcett. A template matching procedure for automatic target recognition in synthetic aperture sonar imagery. *Signal Processing Letters, IEEE*, 17(7) :683–686, 2010.
- [MG82] Suzanne T McDaniel and Arthur D Gorman. Acoustic and radar sea surface backscatter. *Journal of Geophysical Research : Oceans (1978–2012)*, 87(C6) :4127–4136, 1982.
- [MGM09] Herman Midelfart, Johannes Groen, and Oivind Midtgaard. Template matching methods for object classification in synthetic aperture sonar images. In *Proceedings of the Underwater Acoustic Measurements Conference*, 2009.
- [MJ89] Pierre D Mourad and Darrell R Jackson. High frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss. In *OCEANS'89. Proceedings*, volume 4, pages 1168–1175. IEEE, 1989.
- [MJ93] Pierre D Mourad and Darrell R Jackson. A model/data comparison for low-frequency bottom backscatter. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94 :344, 1993.
- [MM10] Herman Midelfart and Oivind Midtgaard. Adaptive template matching for sas images. *ECUA 2010*, 2010.
- [MM11] Herman Midelfart and Oivind Midtgaard. Robust template matching for object classification. In *Proc. 4th Underwater Acoustic Measurements Conference*, 2011.

- [MOS⁺07] Jacek Marszal, Zawisza Ostrowski, Jan Schmidt, Lech Kilian, Andrzej Jedel, and Aleksander Schmidt. Time variable gain for long range sonar with chirp sounding signal. *Hydroacoustics Selected full texts*, 10 :117–122, 2007.
- [MW97] Christopher S Meinen and D Randolph Watts. Further evidence that the sound-speed algorithm of del grosso is more accurate than that of chen and millero. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102 :2058, 1997.
- [Mye10] Vincent Myers. Adaptive target classification with imaging sonar as a partially observable markov decision process. Technical report, DTIC Document, 2010.
- [PASS07] Ali Pezeshki, Mahmood R Azimi-Sadjadi, and Louis L Scharf. Undersea target classification using canonical correlation analysis. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 32(4) :948–955, 2007.
- [Pau03] C Paul. Underwater acoustic modeling and simulation, 2003.
- [Ph.07] Courmontagne Ph. Sas images denoising :the jointly use of an auto adaptive mean filter and the stochastic matched filter. In *Electronic Proceedings of OCEANS'07 Aberdeen*, 2007.
- [Phi09] B Philippe. The handbook of sidescan sonar, 2009.
- [PPCB09] Yan Pailhas, Yvan Petillot, Chris Capus, and Keith Brown. Real-time sidescan simulator and applications. In *OCEANS 2009-EUROPE*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [PPLA02] Aleksandra Pizurica, Wilfried Philips, Ignace Lemahieu, and Marc Acheroy. A joint inter-and intrascale statistical model for bayesian wavelet based image denoising. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 11(5) :545–557, 2002.
- [PPS⁺13] Y Petillot, Y Pailhas, J Sawas, N Valeyrie, and J Bell. Target recognition in synthetic aperture sonar and high resolution side scan sonar using auvs. 2013.
- [PRCB06] Yvan Petillot, Scott Reed, Enrique Coiras, and J Bell. A framework for evaluating underwater mine detection and classification algorithms using augmented reality. *IEEE journal of Oceanic Engineering*, 2006.

- [QKSD10] Rebecca T Quintal, John E Kiernan, John Shannon, and Paul S Dysart. Automatic contact detection in side-scan sonar data. In *Technologies for Homeland Security (HST), 2010 IEEE International Conference on*, pages 270–275. IEEE, 2010.
- [QSB⁺10] B.A.J. Quesson, J.C. Sabel, H. Bouma, R.J. Dekker, and J. Lengrand-Lambert. Automatic target recognition in synthetic aperture sonar images for autonomous mine hunting. *ECUA 2010*, 2010.
- [Qui01] Isabelle Quidu. *Classification multi-vues d'un objet immergé à partir d'images sonar et de son ombre portée sur le fond*. PhD thesis, Université de Bretagne occidentale-Brest, 2001.
- [RC97] Emmanuelle RICHARD and Jean-Francois CAVASSILAS. Etude d'une classification d'échos sonar fondée sur un traitement séquentiel. In *16ⁱè; Colloque sur le traitement du signal et des images, FRA, 1997*. GRETSI, Groupe d'Etudes du Traitement du Signal et des Images, 1997.
- [Ric51] Stephen O Rice. Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces. *Communications on pure and applied mathematics*, 4(2-3) :351–378, 1951.
- [Ris96] Philippe Ris. *Parallélisation du lancer de rayon par évaluation dynamique de la topologie de la scène*. PhD thesis, Université de Besançon, 1996.
- [RLDV94] R Raillon, A Lhemery, and D De Vadder. Extension du modèle de freedman de formation des échos au cas transitoire. *Le Journal de Physique IV*, 4(C5) :C5–829, 1994.
- [RPB03] Scott Reed, Yvan Petillot, and Judith Bell. An automatic approach to the detection and extraction of mine features in sidescan sonar. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 28(1) :90–105, 2003.
- [RPB04] Scott Reed, Yvan Petillot, and Judith Bell. Model-based approach to the detection and classification of mines in sidescan sonar. *Applied optics*, 43(2) :237–246, 2004.
- [RRCP06] Scott Reed, Ioseba Tena Ruiz, Chris Capus, and Yvan Petillot. The fusion of large scale classified side-scan sonar image mosaics. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 15(7) :2049–2060, 2006.
- [RS99] Volker Roth and Volker Steinhage. Nonlinear discriminant analysis using kernel functions. In *Advances in neural information processing systems*. Citeseer, 1999.

- [RTF05] James Riordan, Daniel Toal, and Colin Flanagan. Towards real-time simulation of the sidescan sonar imaging process. In *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation*, pages 13–15. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2005.
- [Rud69] Anthony J Rudgers. Acoustic pulses scattered by a rigid sphere immersed in a fluid. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 45 :900, 1969.
- [Sam01] Gary Steven Sammelmann. Propagation and scattering in very shallow water. In *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 1, pages 337–344. IEEE, 2001.
- [Sch71] PB Schmidt. Monostatic and bistatic backscattering measurements from the deep ocean bottom. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 50 :326, 1971.
- [SCL94] Gary Steven Sammelmann, JT Christoff, and JD Lathrop. Synthetic images of proud targets. In *OCEANS'94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation. 'Proceedings*, volume 2, pages II–266. IEEE, 1994.
- [SGH⁺03] TJ Sutton, HD Griffiths, AP Hetet, Y Perrot, and SA Chapman. Experimental validation of autofocus algorithms for high-resolution imaging of the seabed using synthetic aperture sonar. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 150(2) :78–83, 2003.
- [SRL45] John William Strutt, Baron Rayleigh, and Robert Bruce Lindsay. *The theory of sound*, volume 1. Dover New York, 1945.
- [TB95] Eric I Thorsos and Shira Lynn Broschat. An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces. part i. theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97 :2082, 1995.
- [Tho96] Perre. Thourel. *Segmentation d'images sonar par modélisation Markovienne hiérarchique et analyse multirésolution*. PhD thesis, Université de Brest, 1996.
- [TK11] KIM Taehwan and BAE Keunsung. Hmm-based underwater target classification with synthesized active sonar signals. *IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 94(10) :2039–2042, 2011.

- [Ton96] Valérie Tonard. *IMagerie de cibles étednues par synthèse d'ouverture*. PhD thesis, Institut nationale des scineces appliquées de Lyon, 1996.
- [Tsa05] Janos Tsakiris. An inverse model of ultrasonic echolocation. *University of Wollongong Thesis Collection*, page 291, 2005.
- [Uri83] Robert J Urick. Principles of underwater sound. 1983, 1983.
- [Wai02] AD Waite. March 2002. sonar for practising engineers, 2002.
- [Whi05] Turner Whitted. An improved illumination model for shaded display. In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, page 4. ACM, 2005.
- [WJB06] Gorm Wendelboe, Finn Jacobsen, and Judith M Bell. A numerically accurate and robust expression for bistatic scattering from a plane triangular facet. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119 :701, 2006.
- [ZFH09] Benoit Zerr, John Fawcett, and Dave Hopkin. Adaptive algorithm for sea mine classification. In *Underwater Acoustic Measurements (UAM) Conference Proceedings*, 2009.
- [ZWAS09] Yinghui Zhao, Neil Wachowski, and Mahmood R Azimi-Sadjadi. Target coherence analysis using canonical correlation decomposition for sas data. In *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future : Global and Local Challenges*, pages 1–7. IEEE, 2009.

Abstract

Underwater target classification is mainly based on the analysis of the acoustic shadows. The new generation of imaging sonar provides a more accurate description of the acoustic wave scattered by the targets. Therefore, combining the analysis of shadows and echoes is a promising way to improve automated target classification. Some reliable schemes for automated target classification rely on model based learning instead of only using experimental samples of target acoustic response to train the classifier. With this approach, a good performance level in classification can be obtained if the modeling of the target acoustic response is accurate enough.

The implementation of the classification method first consists in precisely modeling the acoustic response of the targets. The result of the modeling process is a simulator called SIS (Sonar Image Simulator). As imaging sonars operate at high or very high frequency the core of the model is based on acoustical ray-tracing. Several phenomena have been considered to increase the realism of the acoustic response (multi-path propagation, interaction with the surrounding seabed, edge diffraction, etc.).

The first step of the classifier consists of a model-based approach. The classification method uses the highlight information of the acoustic signature of the target called "A-scan". This method consists in comparing the A-scan of the detected target with a set of simulated A-scans generated by SIS in the same operational conditions. To train the classifier, a Template base (A-scans) is created by modeling manmade objects of simple and complex shapes (Mine Like Objects or not). It is based on matched filtering in order to allow more flexible result by introducing a degree of match related to the maximum of correlation coefficient. With this approach the training set can be extended increasingly to improve classification when classes are strongly correlated. If the difference between the correlation coefficients of the most likely classes is not sufficient the result is considered ambiguous. A second stage is proposed in order to discriminate these classes by adding new features and/or extending the initial training data set by including more A-scans in new configurations derived from the ambiguous ones.

This classification process is mainly assessed on simulated sidescan sonar data but also on a limited data set of real data.

The use of A-scans have achieved good classification performances in a mono-view configuration and can improve the result of classification for some remaining confusions using methods only based on shadow analysis.

Keywords : Underwater target classification, acoustic highlight, A-scan, sidescan sonar images, sonar image simulation, matched filter, ray tracing, Sonel Mapping.